

Výběr motorů pro konkrétní typ kolového podvozku mobilního robota

Evaluation of Motors for a Predefined Type of Mobile Robot
Wheeled Chassis

Marek Mokráš

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek MOKRÁŠ**
Osobní číslo: **A08111**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**

Téma práce: **Výběr motorů pro konkrétní typ kolového podvozku mobilního robota**

Zásady pro vypracování:

1. Vysvětlete princip elektromotorů.
2. Popište konstrukci moderních elektromotorů.
3. Popište komutátorové stroje.
4. Popište bezkomutátorové motory.
5. Vyberte vhodné elektromotory pro pohon mobilního robota určeného pro bezpečnostní práce.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. ŠTĚPINA, Jaroslav. Jednofázové indukční motory. Praha: SNTL, 1957.
2. ROUBÍČEK, Ota. Elektrické motory a pohony. Brno: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-092-X.
3. PISKAČ, Luděk. Elektrotechnika průmyslových robotů a manipulátorů. Plzeň: ZČU, 1993. ISBN 8070821043, 9788070821046.
4. HENRY-BAUDOT, Jacques. Elektrické stroje pro automatizaci. Praha: SNTL, 1971.
5. KARGER, Adolf a Marie KARGEROVÁ. Základy robotiky a prostorové kinematiky. Praha: CVUT, 2008. ISBN 80-01-02183-1.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Pospíšilík

Ústav počítačových a komunikačních systémů

Datum zadání bakalářské práce:

24. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

8. června 2012

Ve Zlíně dne 24. února 2012

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Abstrakt česky

Svou bakalářskou práci na téma „Výběr motorů pro konkrétní typ kolového podvozku mobilního robota” jsem zpracovával v konkrétní české obchodní společnosti RAVEO s.r.o. Jejím obsahem je seznámení se s různými typy elektromotorů a cílem mé bakalářské práce je navrhnout motor pro pohon robota pro bezpečnostní práce.

Klíčová slova: elektromotor, stator, rotor, převodovka, polohovací systém

ABSTRACT

Abstrakt ve světovém jazyce

My bachelor thesis on a topic „Evaluation of Motors for a Predefined Type of Mobile Robot Wheeled Chassis" I worked in a Czech company RAVEO s.r.o. Its content is familiar with various types of electric motors and the aim of my thesis is to design an engine to drive the robot for safety work.

Keywords: electric motor, stator, rotor, transmission, positioning system

Poděkování, motto

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, Ing. Martinovi Pospíšilíkovi, za odborné vedení, cenné připomínky i rady a čas věnovaný problematice tématu mé bakalářské práce „Výběr motorů pro konkrétní typ kolového podvozku mobilního robota.“

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 PRINCIP ELEKTROMOTORŮ	12
1.1 CO JE ELEKTROMOTOR.....	12
1.2 PRINCIP ELEKTROMOTORU.....	13
1.3 TYPY ELEKTROMOTORŮ	14
1.3.1 Stejnoseměrný motor	14
1.3.2 Střídavý stroj	16
1.3.3 Univerzální stroj.....	19
1.3.4 Komutátorové stroje.....	19
1.3.5 Bezkomutátorové motory	19
2 KONSTRUKCE MODERNÍCH ELEKTROMOTORŮ	20
2.1 ELEKTRICKÝ STROJ.....	20
2.1.1 Elektrický obvod	20
2.1.2 Magnetický obvod.....	20
2.1.3 Mechanická konstrukce.....	21
2.1.4 Chlazení.....	21
2.2 TOČIVÝ STROJ	22
2.2.1 Stator	22
2.2.2 Rotor.....	22
2.3 MATERIÁLY PRO VINUTÍ	22
3 KOMUTÁTOROVÉ STROJE	23
3.1 KOMUTÁTOROVÝ MOTOR SÉRIOVÝ	24
3.2 KOMUTÁTOROVÝ MOTOR DERIVAČNÍ	25
3.3 KOMUTÁTOROVÝ MOTOR S CIZÍM BUZENÍM.....	26
3.4 KOMUTÁTOROVÝ MOTOR BUZENÝ PERMANENTNÍMI MAGNETY	27
3.5 KONSTRUKCE KOMUTÁTOROVÝCH MOTORŮ.....	28
4 BEZKOMUTÁTOROVÉ MOTORY	30
4.1 MOTORY EC.....	32
4.2 STANDARDNÍ MOTORY BLDC	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	34
5 VÝBĚR KOMPONENT POHONU ROBOTA PRO BEZPEČNOSTNÍ PRÁCE	35
5.1 VÝBĚR VHODNÝCH KOMPONENT PRO POHON MOBILNÍHO BEZPEČNOSTNÍHO ROBOTA PRO BEZPEČNOSTNÍ APLIKACE.....	38
5.1.1 Předpoklady pro pohon mobilního robota.....	38
5.1.2 Výběr vhodného elektromotoru.....	38

5.1.3	Výběr vhodné převodovky	39
5.1.4	Elektronické řízení pohonů pro mobilního robota	41
5.1.5	Návrh systému pohonu mobilního robota	42
5.2	VOLBA A VÝPOČET POHONU MOBILNÍHO MANIPULÁTORU	44
5.2.1	Výpočet parametrů pohonu	45
5.2.2	Výběr pohonu z katalogu DKM.	47
6	VÝBĚR VHODNÝCH KOMPONENT PRO TRANSLAČNÍ OSU V ROBOTICE	48
6.1	VÝBĚR VHODNÉHO ELEKTROMOTORU	48
6.1.1	Servomotory	49
6.1.2	Krokové motory	50
6.1.3	Lineární motory	51
6.1.4	Ostatní možnosti motorů	52
6.2	VÝBĚR VHODNÉ PŘEVODOVKY	52
6.2.1	Kuželočelní převodovky.....	53
6.2.2	Předepnuté převodovky.....	53
6.2.3	Planetové převodovky	54
6.2.4	Cykloidní převodovky	55
6.3	VÝBĚR VHODNÉHO POLOHOVACÍHO SYSTÉMU.....	56
6.3.1	Kuličkové šrouby	57
6.3.2	Hřeben s pastorkem.....	58
6.3.3	Lineární vedení.....	59
7	VYHODNOCENÍ A ZVOLENÍ OPTIMÁLNÍ KONCEPCE POHONU PRO TRANSLAČNÍ OSU ROBOTA.....	60
7.1	SERVOMOTOR.....	60
7.2	PŘEVODOVKA.....	61
7.3	LINEÁRNÍ SYSTÉM	61
	ZÁVĚR	66
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	68
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	70
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
	SEZNAM TABULEK.....	74

ÚVOD

Život člověka je již od počátku pevně svázán s prací a lidé vždy vyvíjeli a vyvíjí nové nástroje a stroje, které by jim ulehčily práci. Už v pravěku lidé používali primitivní nástroje, kterými si pomáhali při práci. Postupným vývojem lidstvo vyvinulo velmi složité mechanické stroje, které byly, po objevení elektrické energie, nahrazeny stroji elektrickými. Dnešní technologie využívají automatických strojů, řízených mikroprocesory. Automatických, inteligentně řízených strojů se využívá téměř ve všech odvětvích lidské činnosti. Práce lidí je také nahrazována při výkonu nebezpečných prací nebo prací v extrémních podmínkách. Špičkové technologie umožňují nahrazovat práci lidí s větší přesností, rychlostí a účinností, než jakých je člověk schopen. Stroje, které jsou schopny pracovat v plně autonomním režimu, nazýváme roboty. Robot dokáže reagovat na podněty okolí a své okolí ovlivňovat. Často je vybaven možností sledovat změny, které provedl a provádět korekce svých zásahů.

V teoretické části této práce si přiblížíme vlastnosti, typy a rozdělení různých typů elektromotorů a v praktické části práce se zaměříme na stavbu a výběr typu motoru pro robota sloužícího k bezpečnostním účelům. Tento typ robota je hojně využíván armádou při hledání a zneškodňování výbušnin. Čímž je tento robot velkým přínosem při ochraně lidských životů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PRINCIP ELEKTROMOTORŮ

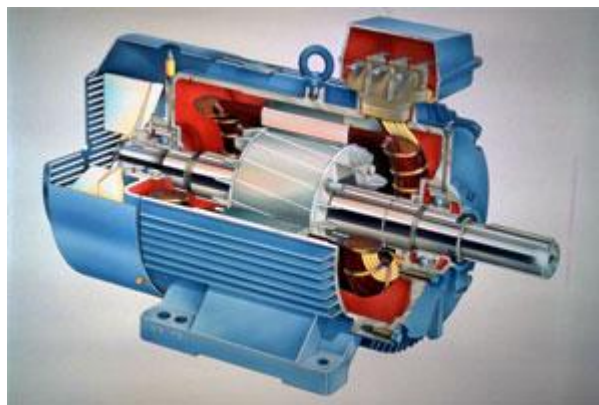
Pro psaní práce, pro užívání jednotek, značek a pro citace použijte následující normy:

- ČSN ISO 5966 (01 0173) *Formální úprava vědeckých a technických zpráv.*
- ČSN ISO 7144 (01 0161) *Dokumentace – Formální úprava disertací a podobných dokumentů.*
- ČSN 01 6910 *Úprava písemností zpracovaných textovými editory nebo psaných strojem.*
- ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura.*
- ČSN ISO 690-2 *Bibliografické citace - Část 2: Elektronické dokumenty nebo jejich části.*
- ČSN ISO 31-11 *Matematické značky.*
- ČSN ISO 1000 *Zákonné měřicí jednotky.*
- ČSN ISO 690 *Citační norma.*

1.1 Co je elektromotor

Elektromotor je elektrický stroj, který slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou práci. Většinou jde o točivý stroj, ale existují i netočivé elektromotory, např. lineární elektromotor. Opačnou přeměnu, tedy změnu mechanické práce na elektrickou energii, provádí generátor, např. dynamo či alternátor. Z hlediska funkce lze na generátor pohlížet jako na elektromotor provozovaný v generátorickém režimu, i když konstrukčně jde o odlišné zařízení. [5]

Elektromotor je elektrický stroj, který za posledních sto let doznal velkého rozmachu. S nástupem elektrizace zasáhl do všech činností člověka, všude tam, kde je třeba pohyb. Výkon elektrických strojů se pohybuje v rozmezí od zlomků wattů po stovky megawattů. [6]



Obr. 1. Elektromotor



Obr. 2. Značka elektromotoru

Různých elektromotorů je celá řada.

Výběr druhu pohonného prostředku znamená volbu soustavy, složené z motorů, zdrojů energie s příslušenstvím, bloku řízení a z části pro styk s obsluhou. [2]

1.2 Princip elektromotoru

Elektromotor přeměňuje elektrickou energii na mechanickou, případně také naopak.

Většina elektromotorů je založena na využití silových účinků magnetického pole. Většinou se využívá působení Lorentzova zákona síly. Na vodič nacházející se v magnetickém poli působí síla úměrná kolmé složce magnetické indukce a velikosti elektrického proudu tekoucího vodičem ($F=B.I.l$ – jednotky N; T, A, m). Kromě Lorentzovy síly se při konstrukci elektromotorů využívá také přitahování ferromagnetického materiálu a elektromagnetu (krokové neboli reluktanční elektromotory).

Kromě elektromagnetické síly musí konstrukce elektromotorů počítat s tím, že na vodiči, který se pohybuje vůči magnetickému poli, vzniká elektrické napětí ($U=B.l.v$ – jednotky V; T, m, $m.s^{-1}$). Tohoto jevu se využívá při konstrukci generátorů.

Zjednodušeně si lze představit, že se využívá vzájemné přitahování elektromagnetů, elektromagnetu a permanentního magnetu, nebo elektromagnetu a železa. Sílu a polaritu elektromagnetu můžeme řídit velikostí elektrického proudu, který do něj pustíme.

Je možné zkonstruovat i elektromotory využívající jiné fyzikální principy, např. elektrostatické síly, piezoelektrický jev, nebo přeměnu elektřiny na teplo, ale v současnosti se tyto jevy pro konstrukci elektromotorů téměř nepoužívají.

Elektrický motor má tři režimy provozu:

- **motorický režim** - motor odebírá elektrickou energii z elektrické sítě nebo z baterie a přeměňuje ji na mechanickou energii na hřídeli.
- **generátorický režim** - motor odebírá mechanickou energii z kinetické nebo polohové energie stroje připojeného na hřídel a dodává ji zpět do elektrické sítě, do baterie, nebo do elektrické zátěže.
- **režim brzdy** - motor odebírá mechanickou energii z kinetické nebo polohové energie stroje připojeného na hřídeli a přeměňuje ji na teplo (zahřívá se). [5]

1.3 Typy elektromotorů

1.3.1 Stejnosměrný motor

Stejnosměrný motor má magnetický obvod statoru i s pólovými nástavci zhotoven z plného materiálu. Magnetický tok obvodu je buzen permanentními magnety nebo budícím vinutím. Dále jsou na statoru instalovány držáky kartáčů a ložiskové štíty. Budící vinutí je k rotoru připojeno sériově, paralelně (derivační), kompaundně (smíšeně), pomocí cizího buzení, permanentním magnetem, apod. Magnetický obvod rotoru, který nese vinutí připojené na komutátor, je vždy zhotoven z transformátorových plechů. [5]

Stejnosměrné stroje jsou historicky nejstaršími elektrickými stroji a nejprve se používaly jako generátory pro výrobu stejnosměrného proudu. [7]



Obr. 3. Stejnosměrný motor

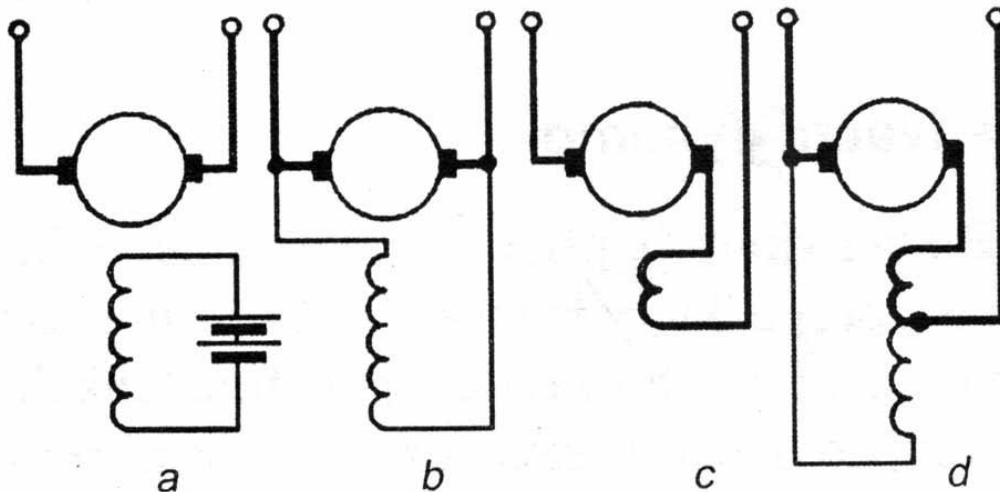
Stejnsměrné stroje s budícím vinutím na hlavních pólech rozdělujeme podle způsobu:

a, stroje s cizím buzením – budící vinutí hlavních pólu je napájeno z nezávislého stejnosměrného zdroje anebo má stroj permanentní magnety (PM).

b, stroje s derivačním buzením – budící vinutí hlavních pólu je zapojeno paralelně ke kotvě

c, stroje se sériovým buzením – budící vinutí hlavních pólu je zapojeno do série s kotvou

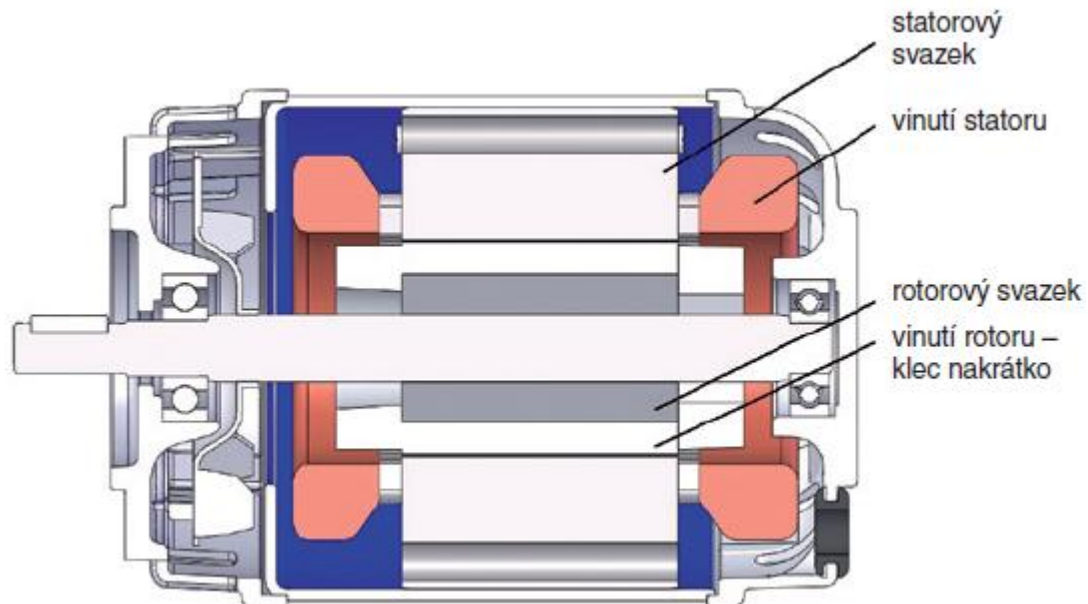
d, stroje s kompaundním (smíšeným) buzením – na hlavních pólech je budící vinutí derivační a sériové. [7]



Obr. 4. a-stroj s cizím buzením, b-stroj s derivačním buzením, c-stroj se sériovým buzením, d-stroj s kompaundním buzením

1.3.2 Střídavý stroj

Asynchronní stroj je nejrozšířenější a nejběžnější typ elektromotoru. Stator nese třífázové nebo jednofázové vinutí. Vinutí rotoru je tvořeno klecí spojeným nakrátko nebo vinutím vyvedeným na kroužky (kroužkový ASM). Rotorové proudy, statorové proudy, moment a otáčky je možno řídit vnějším obvodem zapojeným na kroužky. [5]



Obr. 5. Řez asynchronním motorem

Asynchronní motory, především s kotvou nakrátko, patří k nejrozšířenějším motorům vůbec. Vyrábějí se ve velikostech od jednotek wattů do desítek kilowattů hromadně ve velkých sériích všude na světě. Z principu činnosti se používají všude tam, kde je k dispozici střídavé napájecí napětí. Asynchronními motory, často s převodovkami, je osazena většina technologií v průmyslu a stavebnictví – s výjimkou pohonů v automobilech a v ručním nářadí.

Asynchronní motor je obvykle napájen třífázovým napětím, které je v průmyslu většinou dostupné. Při jednofázovém napájení je nutné použít rozběhový nebo běhový kondenzátor. Je to sice komplikace, ale v motorech o výkonu do asi 1 000 W je zapojení s kondenzátorem široce rozšířeno. Pro jednofázové napájení se dosud používá asynchronní motor se stíněným pólem. Jeho výhodou je nízká výrobní cena, ale významnou nevýhodou je velmi malá účinnost (15 až 20 %). Jeho využití je na ústupu. [6]

Jednofázový asynchronní motor se používá pro pohon malých výkonů a tam, kde není možnost se připojit na třífázovou síť. Používá se pro pohon malých spotřebičů, které umožňují mechanizovat mnoho různých prací v domácnosti, zejména pak chladničky, kuchyňské roboty, ventilátory, odstředivky apod. Stator jednofázového motoru je drážkovaný a má jednofázové vinutí. Rotor má výhradně klecové vinutí. [1]

Asynchronní motor nevyžaduje zvláštní údržbu. Jeho technický život je omezen pouze životností ložisek. Otáčky rotoru asynchronního motoru jsou určeny synchronní otáčivou rychlostí magnetického pole statoru sníženou o tzv. skluz.

Skluz rotoru závisí na momentovém zatížení motoru. S rostoucím zatížením stoupá skluz a klesají otáčky rotoru. Synchronní otáčky magnetického pole statoru závisejí na frekvenci a na počtu pólů podle vztahu:

$$n_s = 60f/2p$$

kde

f je frekvence sítě (Hz),

p počet pólů statoru (–).

Několik příkladů je uvedeno v tabulce. Pro frekvenci 50 Hz (obvyklá v Evropě), jsou synchronní otáčky dvoupólového stroje $3\,000\text{ min}^{-1}$. Při skluzu 5 % jsou otáčky rotoru $2\,850\text{ min}^{-1}$.

Frekvence ^{*)} (Hz)	Počet pólů			
	2	4	6	8
50	3 000	1 500	1 000	750
60	3 600	1 800	1 200	900
400	24 000	12 000	8 000	6 000

Obr. 6. Tabulka pro určení otáček asynchronního stroje v závislosti na frekvenci a počtu pólů statoru.

Asynchronní motory se v minulosti využívaly především v zařízeních, kde nebylo nutné regulovat otáčky, protože jednoduchá regulace změnou napětí nepřináší dobré výsledky. V poslední době s poklesem ceny elektroniky a rozvojem techniky měničů frekvence se otevírají zcela nové oblasti. Měniče frekvence nabízejí pohodlné a energeticky úsporné řízení otáček na různých úrovních – od uživatelsky příjemného prostředí manuálního řízení po měniče frekvence integrované přímo v elektromotorech. Měnič frekvence řeší nejen samotné řízení otáček, ale i rozběhy. Vzhledem k tomu, že otáčky závisejí na frekvenci napájecího napětí, lze změnou frekvence často až do 400 Hz měnit otáčky v rozsahu od nuly k asi 20 000 min⁻¹.

Oblast asynchronních motorů je bezprostředně ovlivněna rostoucí cenou energie s důrazem na význam ekonomiky a ekologie výrobku v provozu. Asi od roku 2005 jsou všude ve světě zaváděny normy, které dovolují vyrábět a uvádět na trh pouze elektromotory, jež splňují dané limity účinnosti (IEC 60034-30, odpovídá ČSN EN 60034-30 *Točivé elektrické stroje – Část 30: Třídy účinnosti jednootáčkových třífázových asynchronních motorů nakrátko /IE kód/*). Výrobci elektromotorů jsou nuceni upravovat konstrukci motorů tak, aby byla splněna podmínka zvýšení účinnosti na danou mez. Jedním z možných řešení je nové použití klecí nakrátko z mědi namísto dosavadních klecí z hliníku a jeho slitin. Úprava umožňuje významně zvýšit účinnost za cenu vyšších nákladů na náročnou technologii a na nákup mědi.

Asynchronní motory jsou nejběžnější pohonné jednotky vůbec. Jsou výrobně jednoduché, materiál je běžně dostupný, napájení nenáročné. Stator asynchronního motoru je tvořen statorovým svazkem (tzv. paketem) vzájemně izolovaných plechů z křemíkové oceli, ve kterém je v drážkách několikařozové vinutí.

Rotor s kotvou nakrátko je opět svazek izolovaných plechů s rotorovými drážkami, ve kterých je tlakovým litím vytvořena tzv. klec nakrátko. Materiál klece nakrátko je buď elektrovedný hliník s čistotou 99,5 %, nebo slitina silumin s definovanou vodivostí.

Vzduchová mezera mezi statorem a rotorem je klíčovou částí asynchronního stroje. S ohledem na účinnost motoru by měla být co nejmenší, ovšem je třeba učinit určité technologické ústupky s ohledem na vyrobiteľnost stroje. S růstem vzduchové mezery se vlastnosti asynchronního motoru zhoršují a naopak. S trochou nadsázky se říká, že vzduchová mezera je nejdražší část asynchronního stroje. [6]

1.3.3 Univerzální stroj

Většina běžných elektrických motorů je konstruována na rotačním principu, ale existují i netočivé varianty elektromotorů, například lineární elektromotor, u něž je stator nebo rotor stroje rozvinut a tvoří pás umístěný podél pojezdové dráhy stroje. Tento druh motorů se v technické praxi používá zejména pro některá speciální dopravní zařízení. [5]

1.3.4 Komutátorové stroje

Viz kapitola 3.

1.3.5 Bezkomutátorové motory

Viz kapitola 4.

2 KONSTRUKCE MODERNÍCH ELEKTROMOTORŮ

2.1 Elektrický stroj

Běžný elektrický stroj (elektromotor nebo generátor) je složen ze čtyř základních funkčních celků.

2.1.1 Elektrický obvod

– proudový obvod, je tvořen vinutím – cívkami s izolací, svorkami nebo přípojnými.
Některé stroje mají komutátor nebo kroužky. Vinutí ve formě cívek (nebo klece) jsou uložena v drážkách magnetického obvodu.

Komutátor

je prstenec složený z mnoha vzájemně izolovaných lamel. K lamelám jsou připojeny jednotlivé vývody cívek kotvy. Ke komutátoru přiléhá dvojice (nebo více) kartáčů. Komutátor dynama slouží jako mechanický usměrňovač indukovaného střídavého napětí a proudu ve vodičích kotvy. Komutátor motoru slouží jako střídač, měnící směr proudu ve vodičích kotvy. V moderních strojích je komutátor nahrazován polovodičovým měničem kmitočtu (BLDC stroje).

Kroužek má tvar prstýnku, na který je připojen el. vývod. Na kroužek dosedá sběrací kartáč. Kroužek nemění směr proudu. Kroužky slouží k elektrickému připojení pohyblivých částí (vinutí). Střídavé (třífázové) elektrické stroje mívají obvykle tři kroužky. Stejnoseměrný budící obvod synchronního stroje má dvojici kroužků.

2.1.2 Magnetický obvod

je tvořen feromagnetem. Magnetický obvod u střídavých strojů a kotev komutátorových strojů (i stejnosměrných) je vždy tvořena vzájemně elektricky izolovanými transformátorovými plechy. Magnetický obvod statorů stejnosměrných strojů bývá opracovaný odlitek.

Magnetický obvod vede magnetický tok vytvářený vinutím nebo permanentními magnety. Vinutí bývají umístěna v drážkách magnetického obvodu.

2.1.3 Mechanická konstrukce

je tvořena nosnými částmi, ložiskovými štíty, patkami, přírubami, kryty, svorkovnicemi, chlazením. Přenáší reakční síly od hřídele stroje. Zajišťuje dostatečnou mechanickou tuhost a pevnost stroje. Chrání před vniknutím cizích částí a vody do stroje. Zajišťuje oddělení vnějšího a vnitřního prostředí ve stroji (např. nebezpečí výbuchu). Chrání před nebezpečným dotykem pohybujících se částí a dotykem s elektrickými částmi pod napětím = úrazem. Zajišťuje odvod tepelné energie vzniklé ve stroji = chlazení. Mechanická konstrukce stroje má zaručovat, že stroj nebude mechanicky kmitat vlastními kmity.

Důležitým parametrem (především u rotačních strojů) je délka vzduchové mezery, která má být minimální.[6]

2.1.4 Chlazení

zajišťuje odvod tepla vznikajícího ohmickými ztrátami ve vinutí, ztrátami v magnetickém obvodu vířivými proudy a mechanickými ztrátami v ložiscích. Chlazení může být provedeno jako přirozené, nucené s vlastním ventilátorem, nucené cizím ventilátorem, kapalinové (vodní), plynem (vodík). Překročením provozní teploty izolace dochází k překotnému stárnutí – degradaci izolací. Vlivem vysoké teploty je životnost izolace zkráceny na zlomek předpokládané životnosti. U strojů s permanentními magnety hrozí odmagnetování při překročení Curieho teploty.

2.2 Točivý stroj

Točivý stroj má dvě části:

2.2.1 Stator

je pevná část stroje, která bývá vnější částí stroje. Na statoru bývají upevněny cívky vinutí s magnetickým obvodem, magnety a elektromagnety. V dutině statoru je pohyblivě umístěn rotor.

2.2.2 Rotor

je otočná část stroje s magnetickým obvodem, vinutím a hřídelí na které jsou nasazeny kroužky nebo komutátor.

Stroj je konstruován tak, aby na sebe vhodně vzájemně působila magnetická pole rotoru a statoru a působením vytvářela kroutící moment. Kroutící moment je přenášen na hřídel stroje. Otáčející rotor se vykonává mechanickou práci. Elektrické točivé stroje jsou obvykle konstruovány tak, že se rotující část stroje nachází obvykle uvnitř statoru. Obrácenou konstrukci mají například stroje, u kterých je požadován zvýšený moment setrvačnosti – například magnetofony napájené napětím o síťovém kmitočtu. [5]

2.3 Materiály pro vinutí

Pro výrobu vinutí se v elektrických strojích používají materiály s velkou elektrickou vodivostí jako je měď, hliník, popř. slitiny těchto kovů. Hliník se používá pro výrobu klecí asynchronních motorů s kotvou nakrátko a také k výrobě vinutí u některých transformátorů. Výhodou hliníku je menší hmotnost, nevýhodou větší měrný odpor, menší mechanická pevnost a rychlé oksidování povrchu, které zhoršuje kvalitu spojů. [3]

3 KOMUTÁTOROVÉ STROJE

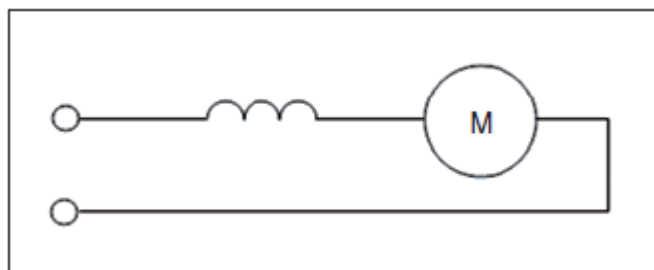
Jeden z prvních rotačních elektromotorů, možná i vůbec první, vynalezl Michael Faraday v roce 1821. Motor se skládal z volně zavěšeného drátu ponořeného do nádrže rtuti. Ve středu nádrže byl umístěn permanentní magnet. Elektrický proud procházel drátem, drát rotující kolem magnetu pak prokazoval, že proud vytvořil kolem drátu točivé magnetické pole.

Moderní motor na stejnosměrný proud byl náhodně objeven v roce 1873, když Zénobe Gramme vodivě spojil roztočené dynamo s druhým stojícím dynamem, z něhož se tím stal napájený motor. [5]

Komutátorové motory mají nezastupitelné místo v oblasti malých pohonů v automobilech, kde je palubní stejnosměrné napětí, a v ručním nářadí a kuchyňských přístrojích při napájení střídavým napětím z elektrorozvodné sítě. Komutátorové motory obsahují komutátor, tj. kontaktní část spojenou s rotorem. Mechanický komutátor je tvořen rotačně uloženými měděnými lamelami, navzájem oddělenými izolací, které vytvářejí spolu s tzv. kartáči (uhlíkovými sběrači) kluzný kontakt určený k přívodu elektrického proudu do rotoru. Kluzný kontakt má omezenou životnost. Pro činnost rotačních pohonů v automobilech a v domácnostech bývá i takto omezená životnost dostačující. Problémy obvykle nastávají v průmyslových aplikacích, zejména při použití v nepřetržitém provozu. Nepříjemnou vlastností kluzného kontaktu mezi komutátorem a kartáči je jiskření, jehož rušivý účinek může velmi negativně ovlivňovat elektromagnetickou kompatibilitu (EMC – *Electro Magnetic Compatibility*) motoru a celého zařízení. S rozvojem elektroniky stále narůstají požadavky na EMC a vyřešení bývá někdy vážným problémem. [6]

3.1 Komutátorový motor sériový

Vinutí statoru (budiče) a rotoru (kotvy) jsou zapojena v sérii (obr. 7). U malých dvoupólových motorů je kotva často zapojena mezi dvě cívky statoru, mj. za účelem snížení nežádoucího rušení.



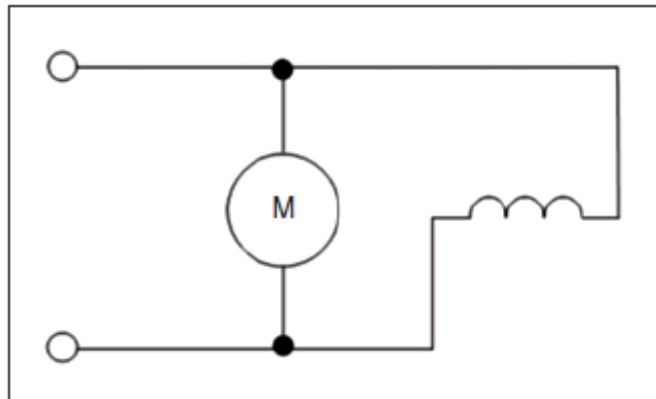
Obr. 7. Schéma buzení sériového motoru

Sériové komutátorové motory mohou pracovat při napájení proudem jak střídavým, tak stejnosměrným. Bývají označovány názvem *univerzální komutátorové motory*. Lepší vlastnosti mají při stejnosměrném napájení. Sériový komutátorový motor má velký záběrný moment i proud a se snižujícím se momentovým zatížením výrazně rostou otáčky a proud klesá. Momentová charakteristika se podobá hyperbole. Jakákoliv změna zatěžovacího momentu výrazně ovlivní otáčky. O takové charakteristice se říká, že je „měkká“.

U větších sériových motorů (výkony nad 200 W) je nepřípustné snížit zatížení k nule, protože by otáčky naprázdno mohly vzrůst natolik, že by odstředivou silou mohlo dojít až k poškození stroje. Sériový motor tedy musí být stále zatížen. Bývá vhodný např. pro pohon ventilátoru, který přirozeně nedovolí běh naprázdno. Otáčky sériového motoru lze řídit změnou velikosti napájecího napětí. Komutátorové sériové motory se ve velké míře využívají pro pohon ručního nářadí a kuchyňských strojů. [6]

3.2 Komutátorový motor derivační

Vinutí statoru a rotoru derivačního motoru jsou zapojena paralelně (obr. 8).



Obr. 7. Schéma buzení derivačního motoru

Derivační motor může pracovat pouze při napájení stejnosměrným napětím. Střídavé napětí by způsobilo fázový posun mezi magnetickými poli rotoru a statoru s negativními důsledky na provoz. Otáčky naprázdno derivačního motoru jsou dány budícím magnetickým tokem, není tedy problém provozovat motor při nulovém zatížení. Momentová charakteristika v pracovní oblasti je výrazně „tvrdá“, tzn. změna momentu má jen nepatrný vliv na otáčky. Při nadměrném zvětšení zatěžovacího momentu způsobí reakce kotvy demagnetizaci budiče a charakteristika strmě klesá.

Reakce kotvy je účinek magnetického toku vytvořeného proudem rotoru – kotvy na magnetický tok statoru – budiče vytvořeného budícím proudem. Obě dvě dílčí pole (budící a kotvy) se skládají ve výsledné pole, které je vlivem reakce kotvy deformováno, zeslabeno a má posunutou magnetickou neutrálu vůči geometrické, a to u generátoru ve směru otáčení a u motoru proti směru otáčení. Magnetický tok reakce kotvy se však může vyvinout pouze pod pólovými nástavci, neboť mezera mezi póly představuje velký magnetický odpor. Pole kotvy je v prostoru nehybné, a proto jej lze kompenzovat tzv. kompenzačním vinutím.

Toto vinutí se umísťuje do drážek pólových nástavců a zapojuje se do série s kotvou. Je navrženo tak, aby jím protékající proud kotvy vytvořil stejně velké pole, jako je reakční, ale opačného směru. Kompenzační vinutí je však výrobně drahé, a proto se používá pouze u velkých strojů. Vliv reakce kotvy potlačují také tzv. komutační póly, které slouží pro zlepšení komutace. [6]

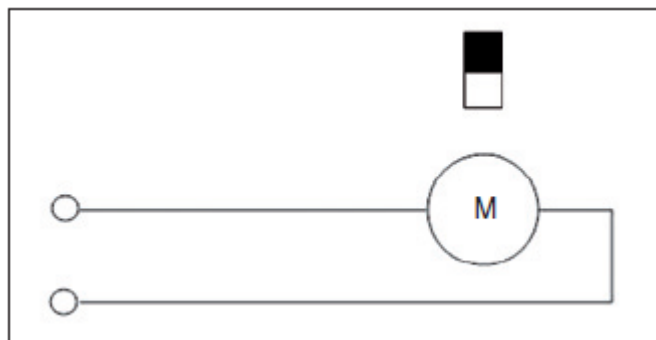
Řízení otáček derivačního motoru změnou napájecího napětí je problematická, protože změny napětí na kotvě a budiči působí proti sobě a může dojít i k odbuzení, což má nepříznivý vliv na otáčky. Derivační motory se využívají velmi zřídka. [6]

3.3 Komutátorový motor s cizím buzením

Komutátorový motor s cizím buzením je ve své podstatě varianta motoru derivačního s tím rozdílem, že napájení kotvy a budiče je odděleno. Napájení je možné opět pouze stejnosměrným napětím. Otáčky lze řídit jak změnou napájecího napětí na kotvě, tak změnou napájecího napětí na budiči. Při řízení prostřednictvím budicího vinutí je nutná velká opatrnost, aby nedošlo k nežádoucímu odbuzení, nebo dokonce k přerušení buzení. Komutátorové motory s cizím buzením se využívají zřídka. Momentová charakteristika motoru s cizím buzením je obdobná jako charakteristika derivačního motoru. [6]

3.4 Komutátorový motor buzený permanentními magnety

Komutátorový motor s buzením permanentními magnety (PM) je z fyzikálního hlediska varianta motoru derivačního nebo derivačního s cizím buzením, kde je však budící magnetický tok vytvářen permanentními magnety (obr. 9). K rozvoji motorů s PM došlo až s vyvinutím permanentních magnetů s velkou měrnou energií, zpočátku ze slitin AlNiCo, dále feritových, a především magnetů na bázi kovů vzácných zemin (SmCo a NdFeB). Magnetický tok PM je stejnosměrný, tudíž i motory jsou vhodné pro napájení stejnosměrným proudem. Momentová charakteristika motoru s PM (obr. 9) je podobná motoru derivačnímu. Její tvrdost a náchylnost na přebuzení reakcí kotvy je podobná jako u derivačního motoru a závisí na energii a magnetické vodivosti použitých magnetů. Magnety AlNiCo se používají jen zřídka; jsou citlivé na podbuzení magnetického obvodu reakcí kotvy, ale velmi stálé při výkyvech teploty. Feritové magnety jsou levné, velmi rozšířené, ale remanentní (zbytková) indukce není příliš velká. Velmi rozšířené jsou magnety na bázi vzácných zemin. Tyto materiály mají velmi velké hodnoty měrné energie (tzv. energetického součinu) a jsou značně drahé. S rozšířením výroby sice cena klesá, ale světové zásoby surovin pro tyto materiály jsou omezené. Otáčky motorů s PM lze řídit změnou napájecího napětí, čehož se také často využívá. Motory s permanentními magnety jsou nejpoužívanějšími motory v automobilové technice. V provedeních s malými výkony se používají i v domácích spotřebičích, ve spojení s malými usměrňovači. [6]



Obr. 8. Schéma komutátorového motoru buzeného permanentním magnetem

3.5 Konstrukce komutátorových motorů

Konstrukci statoru komutátorového motoru (obr. 10) lze volit podle druhu napájení. Pro stejnosměrné napájecí napětí se volí materiál statoru z masivního magneticky měkkého materiálu, pro střídavé napájení je nutné použít svazek – paket ocelových izolovaných plechů, podobně jako u asynchronních strojů. Ve statoru je umístěno budicí vinutí nebo permanentní magnety, které vytvářejí budicí magnetický tok. Rotor komutátorového motoru musí být vždy tvořen svazkem izolovaných plechů z křemíkové elektrooceli s drážkami, ve kterých je vinutí kotvy.



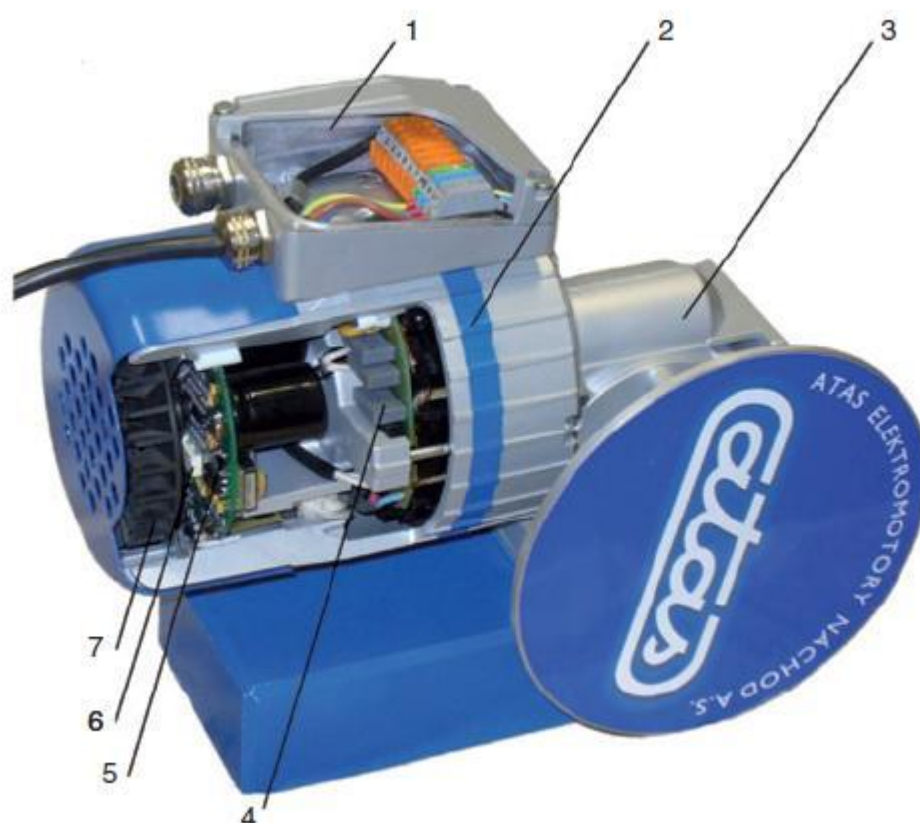
Obr. 9. 1-kostra statoru, 2-magnety, 3-rotorový svazek, 4-komutátor, 5-kartáč(uhlík), 6-držák kartáčků, 7-chladicí ventilátor elektromotoru

Cívky vinutí rotoru jsou zapojeny do lamel měděného komutátoru. Přívod elektrické energie na komutátor zajišťují kartáče (uhlíky) prostřednictvím kluzného kontaktu kartáč–komutátor. Před prvním uvedením komutátorového motoru do provozu je obvykle nutné motor tzv. zaběhnout. Zaběhnutí komutátorového motoru upraví plochu styku mezi kartáči a komutátorem a vytvoří na povrchu komutátoru vrstvu patiny, která je důležitá pro dobrý chod komutátorového stroje. Patina je hladká vrstva ze sloučenin mědi, výrazně tvrdší než samotná měď a s malým součinitelem tření. Má výrazně lepší mechanické a elektrické vlastnosti pro provoz motoru než čistě obrobený povrch mědi.

Základem materiálu kartáčů je uhlík v kombinaci s různými přísadami – podle pracovních podmínek stroje. Kartáč je umístěn v držáku, který musí v provozu zajistit stabilní (nekmitající) přítlak kartáče na komutátor. Volba materiálu kartáče má výrazný vliv na kvalitu provozu komutátorového motoru, na jeho životnost a na elektromagnetické rušení vlivem komutace. Kluzný kontakt kartáč–komutátor je zásadní část komutátorového stroje. Je-li tato část v pořádku, je většina problémů spojených s provozem preventivně odstraněna. [6]

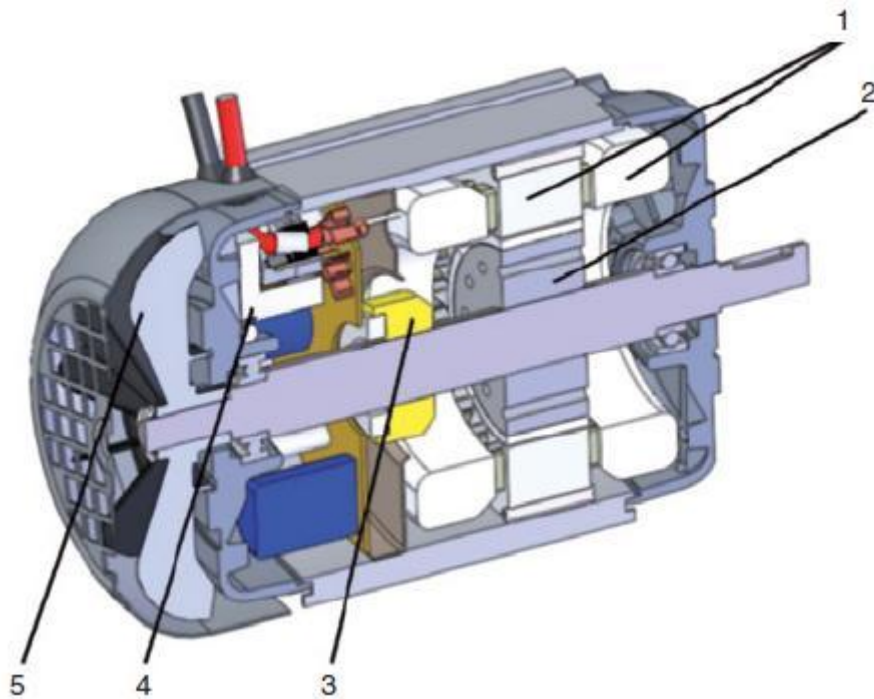
4 BEZKOMUTÁTOROVÉ MOTORY

Pro bezkomutátorové motory se někdy používá název motory EC (*Electronically Commutated*, elektronicky komutovaný), popř. motory BLDC (*Brushless Direct Current*, stejnosměrný bezkartáčový). Jsou to elektromotory, které nemají mechanický rotační komutátor, ale jejich vlastnosti do jisté míry odpovídají motorům s komutátorem. Klasickou mechanickou komutací pomocí komutátoru a kartáčů zde zajišťují elektronické obvody. Nejde o motory asynchronní ani synchronní. Starší obdobou bezkomutátorového motoru je ve své podstatě i krokový motor se zpětnou vazbou. Jejich problematiku ponecháme rovněž stranou. Podobně jako motory střídavé mají i motory EC několikafázové vinutí napájené z výkonového elektronického modulu. Výkonový elektronický modul je ovládán řídicími elektronickými obvody v závislosti na požadované činnosti motoru. Jednou z nutných podmínek řízení motoru je informace o poloze hřídele, což zpravidla zajišťuje optické, indukční nebo magnetické čidlo. [6]



Obr. 10. Konstrukční uspořádání bezkomutátorového motoru EC: motoru 1-svorkovnice, 2-statorový svazek, 3-převodovka, 4-výkonový modul, 5-řídicí modul, 6-čidlo polohy, 7-ventilátor

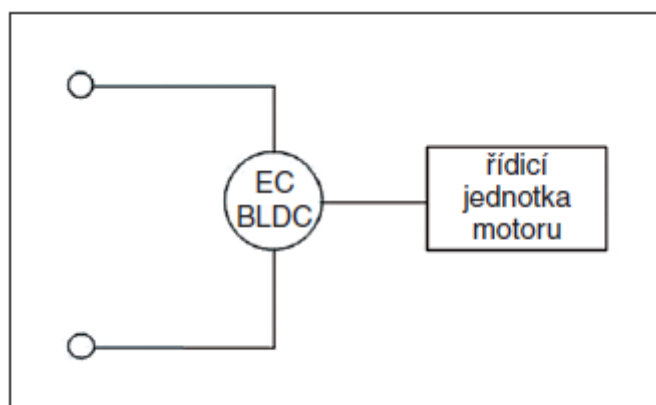
Rozvoj bezkomutátorových motorů v posledních desetiletích byl umožněn rozmachem elektroniky a techniky mikro počítačů, snižováním cen komponent a miniaturizací. Napájení těchto motorů nezávisí na druhu sítě, protože vstupní obvody lze navrhnout podle potřeby pro síť stejnosměrnou i střídavou. Rozdělení a názvosloví bezkomutátorových motorů zatím není ustáleno, pracovně předpokládáme rozdělení na dvě základní skupiny: jednak servomotory EC pro náročné aplikace a jednak levnější a jednodušší motory BLDC, které mohou nahrazovat dosavadní asynchronní a komutátorové motory. [6]



Obr. 11. Konstrukční uspořádání bezkomutátorového motoru BLDC: 1-statorový svazek, 2-rotorový svazek s magnety, 3-čidlo polohy, 4-modul elektroniky, 5-ventilátor

4.1 Motory EC

Motory EC jsou v zásadě synchronní motory. Na rotoru mají permanentní magnety (obr. 13) s velkou měrnou energií, poloha rotoru je velmi přesně indikována čidlem, jednotlivé fáze statoru jsou napájeny z výkonového elektronického modulu ovládaného řídicím elektronickým modulem, obvykle obsahujícím mikroprocesor. Motor EC je schopen pracovat buď zcela autonomně, nebo ve spolupráci s programovatelným automatem, popř. přímo s počítačem. Nejmodernější motory EC mají elektronický modul integrovaný přímo ve své konstrukci. Tím je zjednodušena instalace stroje a omezeny negativní vlivy z hlediska elektromagnetické kompatibility. Základní charakteristika motoru EC je lineární, protože je tu značný účinek zpětné vazby, a navíc je tento motor říditelný. S těmito motory lze v autonomních provozech řešit naprostou většinu pohonných činností od jednoduchého řízení otáček, přes řízení rozběhových i brzdových režimů až po polohování úhlu hřídele, řízení krouticího momentu apod. Proti nežádoucím vlivům a případným chybám lze aplikovat nejrůznější ochrany již v programovém vybavení tak, aby možnost poškození motoru byla minimalizována. Kvalita programového vybavení má na vlastnosti pohonu rozhodující vliv. Motory EC jsou nasazovány ve špičkových mechanizovaných zařízeních všech stupňů automatizace a robotizace. [6]



Obr. 12. Schéma zapojení motoru EC/BLDC

4.2 Standardní motory BLDC

Motor BLDC je po motorické stránce velmi podobný motoru EC. Má vinutý stator, rotor s permanentními magnety, čidlo polohy rotoru (někdy bývá k indikaci polohy rotoru využita volná fáze statoru), jednotlivé fáze statoru jsou napájeny z elektronického modulu. Cílem konstrukce je motor s vlastnostmi komutátorového stroje, kde nevýhoda omezené životnosti komponent kluzného kontaktu je odstraněna elektronickou komutací. Otáčky motoru BLDC je možné řídit změnou napájecího napětí, ovšem není možné komplexní řízení pohonu. Z hlediska uživatele se motor BLDC chová jako stejnosměrný komutátorový motor s permanentními magnety, jehož technický život je omezen pouze životností ložisek (podobně jako u asynchronních strojů).

Při napájení střídavým proudem má motor BLDC životnost srovnatelnou s asynchronním motorem, ovšem při podstatně větší účinnosti. Motory BLDC spojují odstranění nevýhod krátkodobé životnosti komutátorových strojů a malé účinnosti asynchronních strojů, avšak za cenu větších pořizovacích nákladů. Někteří výrobci již nabízejí vedle komutátorových a asynchronních motorů dražší varianty motorů BLDC s lepšími uživatelskými vlastnostmi.

Motory EC a BLDC jsou dosud poměrně drahé jak materiálově, tak výrobně. Svými kvalitativními parametry, velkou účinností a životností si ale dobývají stále pevnější pozici na trhu. Cena údržby elektrických zařízení s malou životností je vysoká, cena energií roste rovněž, zatímco cena dražších motorů EC a BLDC klesá se zvyšujícím se počtem vyrobených kusů. Současný trend vývoje v oboru elektromotorů ve velikostech přibližně do 1 kW směřuje ke koncepci jednoznačné náhrady tradičních elektromotorů asynchronních a komutátorových motory bezkomutátorovými. [6]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 VÝBĚR KOMPONENT POHONU ROBOTA PRO BEZPEČNOSTNÍ PRÁCE

Z kinematického hlediska se robot skládá ze dvou mechanických soustav, pevné a hybné. Pevná soustava se nazývá báze a je pevně spojena s prostorem, v němž se pohyb odehrává. Hybná soustava je pevně spojena s nástrojem případně členem, pomocí kterého robot vykonává výsledný pohyb (end-effector). [4]

V praktické části jsou dva odlišné návrhy koncepce pohonu. První návrh je určen pro mobilní zařízení, kde je požadavek na malou hmotnost, vysokou účinnost a mobilitu. Robota pro bezpečnostní práce si můžeme představit jako mobilní zařízení s váhou obvykle do 50 kg. V praxi jsou tyto zařízení využívány především pro průzkumné práce, vojenství, ale také například pro jakoukoliv práci v nebezpečném nebo úzkém prostoru. Na následujících obrázcích je vidět typické využití.



Obr. 13. Kosmický průzkumný robot Spirit



Obr. 14. Jednoduchý průzkumný Recon Scout (využívá především FBI a SWAT)



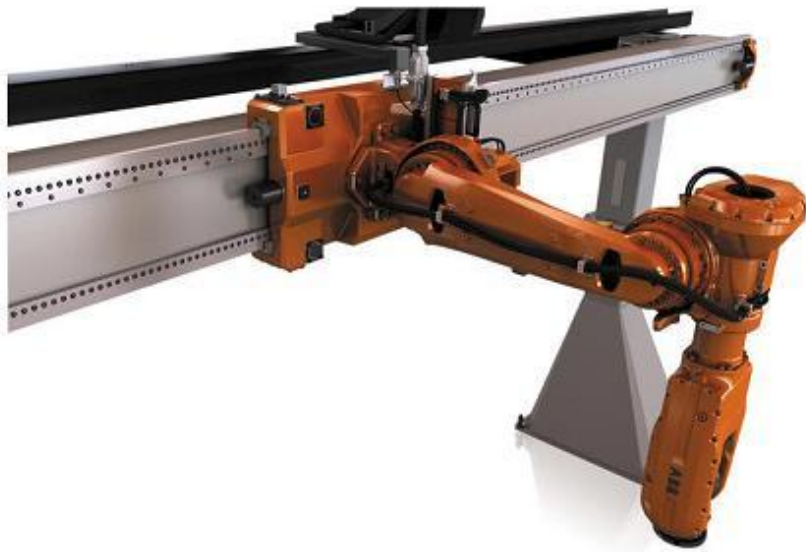
Obr. 15. Průzkumný robot s odstřelovací puškou (Univerzita obrany v Brně)



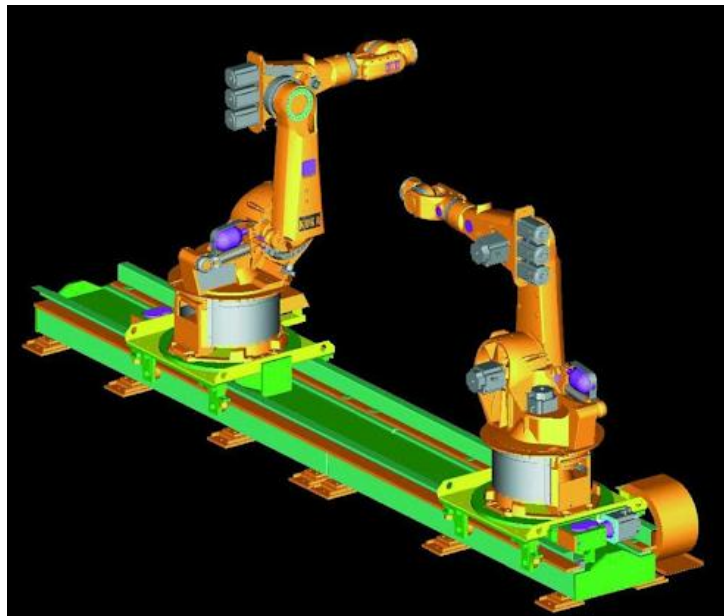
Obr. 16. Univerzální průzkumný robot nachází využití především při přírodních katastrofách, policejních i vojenských operacích (iRobot)

Rozšířil jsem také praktickou část o návrh translačního pohonu klasického průmyslového robota. Jde o velmi využívanou aplikaci v praxi, protože pomocné osy je nutné řešit zejména z pohledu vyšší produktivity průmyslového robota. Známí výrobci robotů jako KUKA, FANUC, REISS, MOTOMAN sice nabízí pomocné osy jako příslušenství, ale cenová náročnost je tak vysoká, že integrátoři robotů radši volí řešení třetích stran. Prakticky jde o

sestavení lineární osy z jednotlivých komponent a ty jsou pak implementovány do robotického systému. Tento postup má však několik úskalí spjatých především s volbou správného pohonu (motor, lineární systém, převodovka, řízení). Tento celek je pak nutné vhodně mechanicky i elektronicky včlenit do celého systému. Tato úloha mi přišla natolik zajímavá, že jsem ji přidal do své bakalářské práce. Za účelem vypracování praktické části bakalářské práce jsem vyhledal společnost RAVEO s.r.o., která se zabývá pohonnou technikou. Tímto děkuji za cenné rady, které mojí práci obohatili především z praktického hlediska.



Obr. 17. Přídavná horizontální translační osa pro robota ABB



Obr. 18. Přídavná vertikální translační osa pro roboty ABB

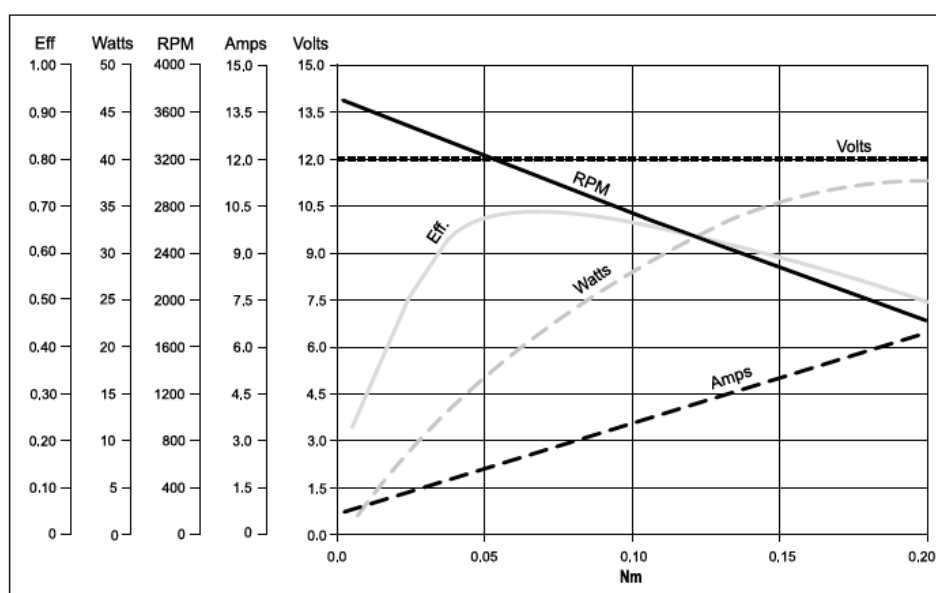
5.1 Výběr vhodných komponent pro pohon mobilního bezpečnostního robota pro bezpečnostní aplikace

5.1.1 Předpoklady pro pohon mobilního robota

- kompaktní a lehké provedení pohonu
- vysoká účinnost pohonu
- jednoduché elektronické řízení
- napájení 24 VDC popřípadě vyšší úroveň napětí (napájení z akumulátoru)
- pohon bude složen z motoru, převodovky včetně řízení

5.1.2 Výběr vhodného elektromotoru

Vzhledem k omezené možnosti napájení je možno použít stejnosměrné kartáčové nebo bezkartáčové motory. Z důvodu napájení musíme zavrhnout koncepci AC motorů. Stejnosměrné motory mají obecně lineární rychlostní i momentovou charakteristiku. Rychlost jde jednoduše řídit pomocí vstupního napětí. Moment je pak ovládaný vstupním proudem. Na následujícím obrázku je typická charakteristika stejnosměrného motoru.



Obr. 19. Typická charakteristika stejnosměrného motoru – závislost účinnosti, výkonu, rychlosti a napájení

Je tedy nutné zvolit mezi kartáčovým DC motorem a BLDC motorem. V teoretické části je více informací o těchto technologiích. Zásadní rozdíl mezi motory je především v životnosti. Kartáčový motor má životnost cca. 5000 hodin provozu. BLDC motor má místo kartáčů zpětnou vazbu z enkodéru. Životnost je tedy prakticky dána životností ložisek motoru (více než 30000 hodin). Velký rozdíl je však v ceně. BLDC motory jsou mnohonásobně cenově náročnější než klasické DC motory.

5.1.3 Výběr vhodné převodovky

Z pohledu převodovky je na trhu mnoho typů a principů. Je nutné uvažovat s celkovou koncepcí pojezdu robota, ale také především s účinností a velikostí převodovky.

Pro moji aplikaci jsou vhodné následující převodovky.

Šnekové převodovky

Tyto převodovky patří principiálně mezi základní typy reduktorů, které redukují rychlost a zvyšují pohybový moment pohonu.

Vlastnosti šnekových převodovek:

- velký převodový poměr 5 - 100 realizovaný pouze jedním převodem
- bezhlučný provoz
- vysoká zatížitelnost
- samosvornost (prakticky není potřeba externí brzdy pro manipulátor)
- snadná integrace do konstrukce stroje díky unifikovaným rozměrům
- nízká účinnost (cca 55 procent)



Obr. 20. Klasická šneková převodovky – výrobce Transtecno

Kuželočelní převodovky

Velmi variabilní a modulární řešení úhlového převodu. Převodovka je tvořena kuželovým soukolím s předstupněm, které zvyšuje převodový poměr. Výstupem je většinou dutá průchozí hřídel, která je uložena ve dvojitém ložiskovém domku. Výhodou převodovek je vysoký převodový poměr a účinnost kolem 95 procent. Oproti šnekové převodovce však kuželočelní převodovka není samosvorná. Pro zastavení manipulátoru je nutná externí brzda.



Obr. 21. Ukázka kompaktní kuželové převodovky CMB - výrobce TRANSTECNO

Čelní převodovky

Z pohledu zástavby jde o přímé reduktory složené z několika stupňů ozubených kol. Čelní převodovky mají vysokou účinnost, kompaktní rozměry a jsou nesamosvorné. Tyto převodovky jsou schopny přenést momenty od jednotek N.m až po tisíce N.m. Pro aplikaci manipulátoru je velmi výhodná výstupní hřídel, na kterou lze připojit samotná pohonná kola vozíku. Hřídel je totiž uložena v ložisku a snese vysoké radiální zatížení.



Obr. 22. Čelní převodovka CMG Transtecno

Ostatní možné převodovky

Pro aplikaci mobilního robota lze použít ještě převodovky planetové a cykloidní. Vzhledem k povaze zadaného zařízení však jsou tyto převodovky zbytečně přesné a robustní což má za následek vysokou cenu. Tyto převodovky jsou podrobně rozebrány v kapitole – návrh translační osy klasického robota.

5.1.4 Elektronické řízení pohonů pro mobilního robota

U řízení motorů je nutné vycházet z použité technologie motorů samotných. Vzhledem k aplikaci je nutné použít DC motory. Pro řízení DC motorů je na trhu mnoho zařízení – driverů. V principu jde o tranzistorové řízení výstupního napětí a proudu. Drivery tak obsahují možnost nastavení rychlosti, zrychlení, přídržného momentu a celou řadu podpůrných parametrů. Drivery také obsahují komunikaci s nadřazenou úrovní – RS 485, CAN Open, PROFIBUS a jiné. V mé práci jsem se nezabýval detailně návrhem řídicí elektroniky, protože by práce přesáhla požadovaný rozsah.

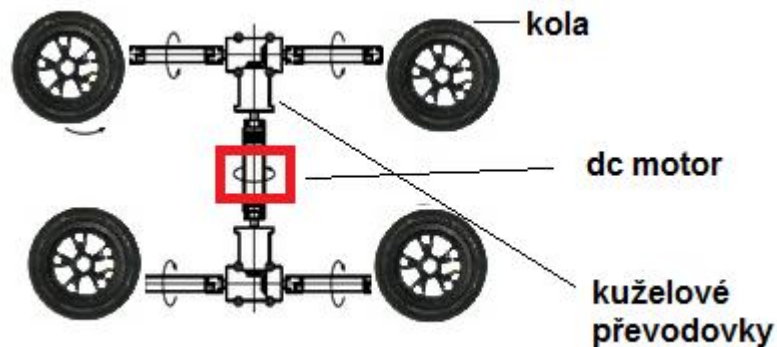


Obr. 23. Řídící jednotka SANYO s BLDC motorem

5.1.5 Návrh systému pohonu mobilního robota

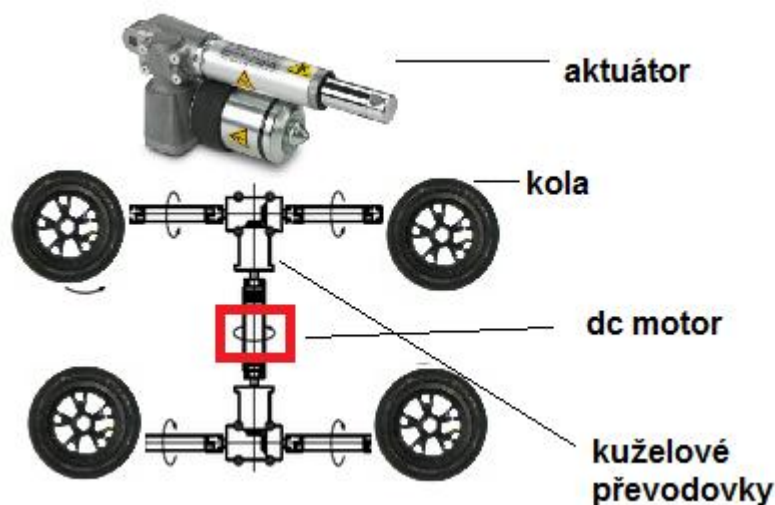
Nad samotným mechanickým návrhem jsem vycházel z následujících možností:

Manipulátor bude mít jeden motor s rozvodem točivého pohybu pomocí kuželových převodovek.



Obr. 24. Schéma pohonu robota

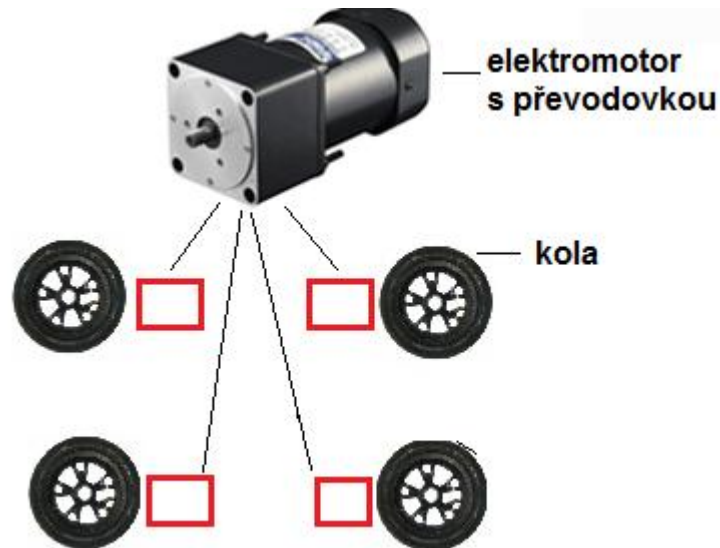
Tento systém je velmi jednoduchý a je třeba pouze jednoho motoru pro všechny kola. Popřípadě by šel náhon použít pouze pro jednu nápravu. Tato konfigurace však není vhodná, protože jde jenom o řešení pohybu jako takového. Systém neřeší řízení směru pohybu manipulátoru. Toto jde řešit tím způsobem, že jedna osa bude v ložiskovém uložení a bude tedy volná. Samotné natáčení pak bude umožňovat další pohybový mechanismus – aktuátor. Jde o elektromechanické zařízení složené z DC motoru, převodovky a pohybového šroubu. Výstup aktuátoru je lineární pohyb pístu, který ovládá zmiňovanou nápravu.



Obr. 25. Schéma pohonu robota s natáčením nápravy pomocí aktuátoru

Mobilní robot bude mít každé kolo hnané separátně

Tato koncepce vyžaduje na každé hnané kolo jeden pohon (motor + převodovka). Případně by bylo možno použít jenom motor bez převodovky. Tento systém pohonu by však vyžadoval vysoký moment motoru, což sebou nese velké rozměry, váhu a především odebíraný proud. Je tedy opodstatněné použít DC motor s převodovkou.



Obr. 26. Separátní ovládání kol pomocí jednotlivých pohonů

Tato varianta pohonu má velkou výhodu především z pohledu ovládání směru manipulátoru. Pomocí ovládání jednotlivých motorů (změny výstupních otáček) lze ovládat směr pohybu. Koncepce také umožňuje ovládání směru s velmi malým rejdem.

Kvůli těmto výhodám jsem zvolil právě tuto koncepci pohonu.

5.2 Volba a výpočet pohonu mobilního manipulátoru

Manipulátory - hojně využívány v mnoha odvětvích. V dnešní době je lze aplikovat do většiny výrobních procesů. Pro pohyb svého těla využívají většinou 6 os ale i více. 7 osa může být např. použita pro přesun po koleji, kdy robot popojíždí vedle výrobku, synchronizován s dopravníkem a po vykonání úlohy se vrací zpět nebo pro sevření kleští při bodovém sváření.

Z výše popisovaných faktů a předpokladů jsem vybral jako optimální pohon DKM. Jde o kompaktní AC i DC pohony, které jsou určeny přímo pro pohon menších zařízení a strojů. K motorům jsou dodávány také čelní i úhlové převodovky. Rozsah výkonu motorů je od 6 do 200W (velikost motorů 60 až 90 mm v průřezu). Převodovky jsou dodávány v rozsahu až do převodu 1:360. Maximální výstupní moment je 40 N.m, což je pro moje zadání více než dostatečný výkon. Vzhledem k možné následné realizaci jsem zvolil EC kartáčový motor, který je cenově velmi dostupný a životnost 5000 hodin by měla být dostačující.



Obr. 27. DC motor DKM

Převodovku jsem zvolil čelní provedení DKM, která splňuje všechny podmínky, které jsem zmiňoval v předešlé kapitole. Převodovky jsou vícestupňové a celokovové. Ozubení je frekvenčně kalené. Tento parametr je velmi důležitý, protože pokud dojde k nouzovému zastavení výstupní hřídele, převodovka vydrží kritický moment a nedojde k destrukci ozubení.



Obr. 28. Čelní převodovka DKM



Obr. 29. Výsledný pohon - spojení motoru a převodovky DKM

5.2.1 Výpočet parametrů pohonu

Při návrhu pohonů jsem vycházel z následujících parametrů. Výpočet jsem uvažoval pro jeden hlavní motor. Po výpočtu parametrů jednoho motoru provedu integraci čtyř motorů.

Hmotnost vozíku w_1 ml	30 kg
Hmotnost kola w_p mp	0,5 kg
Účinnost převodovky m_i	90%
Rychlost v	50 mm/s
Bezpečnostní koeficient S_f	1,5
Gravitační zrychlení g	$9,81\text{m/s}^2$
Průměr jednoho kola D_p	100 mm
Materiál kola ρ	nylon
Počet kol n	4
Součinitel tření mezi koly a podlahy L_p	0,5 (nylonové kolo v udusaném písku)
Max. úhel sklonu α	20 stupňů
Přesnost zastavení Δl	5 mm

Tabulka 1. Parametry pro výpočet motoru

Výpočet momentu setrvačnosti J:

$$J_m = m \cdot \left(\frac{D_p \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 = 30 \cdot \left(\frac{100 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 = 7,500 \cdot 10^{-2} [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (1)$$

$$J_{Dp} = \frac{1}{8} \cdot m_p (D_p \cdot 10^{-3})^2 \cdot n = \frac{1}{8} \cdot 0,5 \cdot (100 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 4 = 2,500 \cdot 10^{-3} [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (2)$$

$$J_{Dp1} = \frac{1}{8} \cdot m_{p1} (D_{p1} \cdot 10^{-3})^2 \cdot n = \frac{1}{8} \cdot 0,1 \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 4 = 1,250 \cdot 10^{-8} [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (3)$$

$$J_{Dp2} = \frac{1}{8} \cdot m_{p2} (D_{p2} \cdot 10^{-3})^2 \cdot n = \frac{1}{8} \cdot 0,1 \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 4 = 1,250 \cdot 10^{-8} [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} J_L &= (J_m + J_{Dp} + J_{Dp2}) \cdot \left(\frac{J_{Dp1}}{J_{Dp2}}\right)^2 + J_{Dp1} = \\ &= 7500 \cdot 10^{-2} + 2500 \cdot 10^{-3} + 1250 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{1}{1}\right)^2 + 1250 \cdot 10^{-8} = \\ &= 7,750 \cdot 10^{-2} [\text{oz} \cdot \text{in}^2] [\text{kgm}^2] \end{aligned} \quad (5)$$

Výpočet požadované rychlosti V:

$$V_m = V_1 \cdot \frac{60}{\pi \cdot D_p} \cdot \frac{D_{p2}}{D_{p1}} = 50 \cdot \frac{60}{3,14 \cdot 100} \cdot \frac{1}{1} = 9,554 [\text{r} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (6)$$

Výpočet požadovaného momentu T:

$$T = (T_a + T_L) (\text{Safety Factor}) = (0,000 + 11,73) \cdot 1,5 = 17,59 [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (7)$$

Výpočet zatěžovacího momentu a síly F:

$$F = F_a + (m \cdot 9,8) \cdot (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) =$$

$$= 0 + (30 \cdot 9,8) \cdot (\sin 20 + 0,4 \cdot \cos 20) = 211,1 [\text{N}] \quad (8)$$

$$T_L = \frac{F \cdot (D_p \cdot 10^{-3})}{2 \cdot \eta \cdot 0,01} \cdot \frac{D_{p1}}{D_{p2}} = \frac{211,1 \cdot (100 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 90 \cdot 0,01} \cdot \frac{1}{1} = 11,73 [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (9)$$

Výpočet požadované přesnosti zastavení Θ :

$$\Delta \Theta = \Delta l \cdot \frac{360^\circ}{\pi \cdot D_p} \cdot \frac{D_{p2}}{D_{p1}} = 5 \cdot \frac{360}{3,14 \cdot 100} \cdot \frac{1}{1} = 5,732 [\text{deg}] \quad (10)$$

Vypočtené hodnoty jsou pro jeden centrální motor. Vzhledem k tomu, že koncepce vyžaduje 4 motory, je nutné provést přepočítání. Dle výpočtu vyšlo, že při použití jednoho motoru je potřeba

nominální moment 18 N.m při rychlosti 10 ot/min. Pokud jednoduše podělíme vypočtené parametry jednoho motoru 4 tak dostaneme požadovaný moment 4,5 N.m při rychlosti 10 ot/min.

5.2.2 Výběr pohonu z katalogu DKM.

Požadované parametry:

Výstupní rychlost - 10 ot/min

Výstupní nominální moment – 4,5 N.m

V katalogu jsem vyhledal dvě možnosti:

6DCG24-15-30 + 6GBD250BMH (15W DC motor 24 VDC + čelní převodovka $i = 250$ viz, předcházející kapitola).

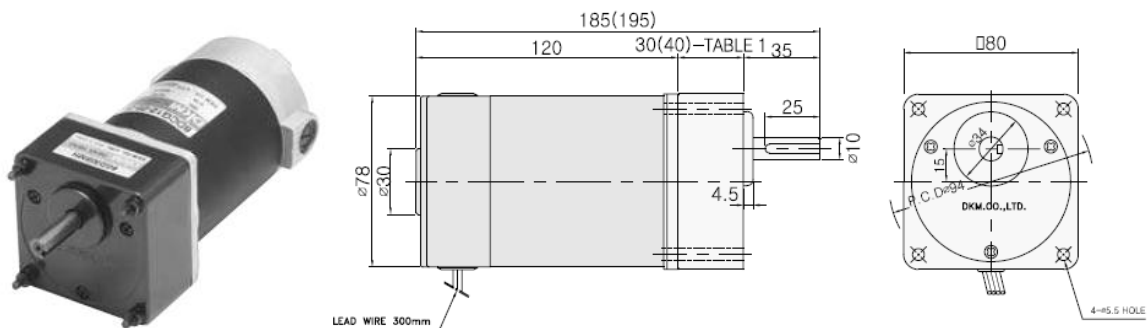
Výstupní rychlost 12 ot/min při 3 N.m.

8DCG24-25-30 + 8GBK300BMH (25W DC motor 24 VDC + čelní převodovka $i = 300$ viz, předcházející kapitola).

Výstupní rychlost 10 ot/min při 8 N.m.

Zvolil jsem tedy 25W pohon, protože plně vyhovuje vypočteným hodnotám. Vzhledem k velmi kompaktní zástavbě jde o velmi vhodný pohon, který má velkou rezervu ve výkonu. Toto eliminuje zahřívání motoru a z pohledu napájení by neměl motor způsobovat vysoké špičkové proudy.

Rozměry pohonu 8DCG24-25-30 + 8GBK300BMH jsou následující:



Obr. 30. rozměry pohonu DKM 8DCG24-25-30 + 8GBK300BMH

Motor má výstupní přírubové provedení, které lze jednoduše připojit ke konstrukci manipulátoru.

6 VÝBĚR VHODNÝCH KOMPONENT PRO TRANSLAČNÍ OSU V ROBOTICE

6.1 Výběr vhodného elektromotoru

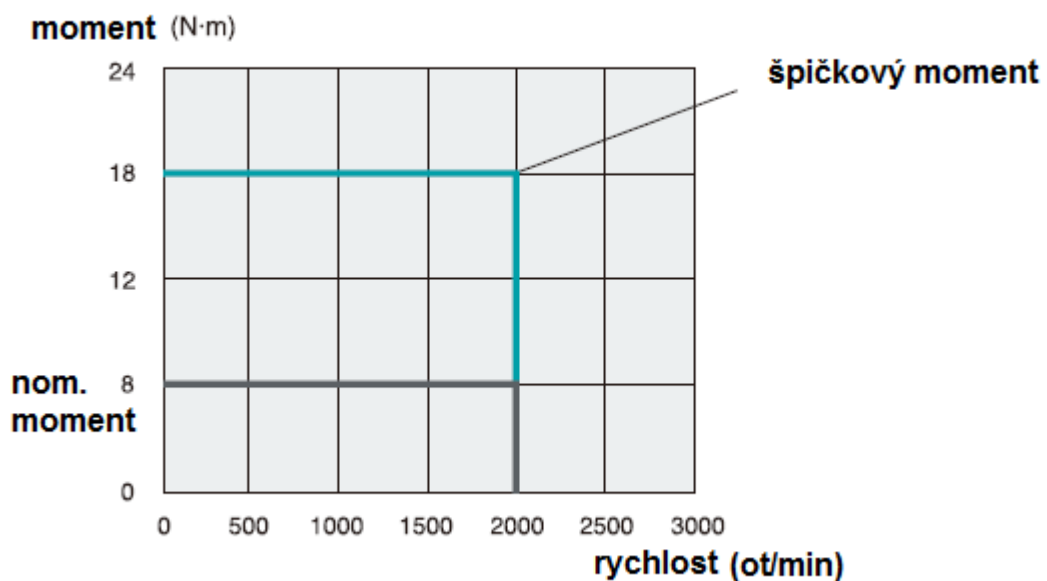
Elektromotor jako takový je zařízení pracující na různých principech viz. teoretická část. Při volbě vhodného motoru je nutné vycházet z následujících předpokladů a požadavků:

- motor musí umožňovat přesné polohování (velmi časté použití robotů jsou svařovací, osazovací, montážní aplikace)
- motor musí umožňovat vysokou akceleraci / deakceleraci a rychlost (vyžaduje především produktivita výroby)
- motory musí splňovat vysokou tuhost (při zatížení výstupního členu pohonu je požadavek, aby motor byl schopný držet požadovanou pozici i při působení vnějších vlivů)
- motory musí vykazovat minimální setrvačnost (při vysoké setrvačnosti je velmi těžké elektronicky řídit požadované parametry)
- motory musí mít lineární projev momentu (je velmi náročné uřídit nelineární momentový výstup)
- motor musí mít unifikované napájení (přizpůsobení stávající technologii)

Na základě jmenovaných požadavků lze využít následujících motorů: viz kapitoly 6.1.1, 6.1.2., 6.1.3. a 6.1.4.

6.1.1 Servomotory

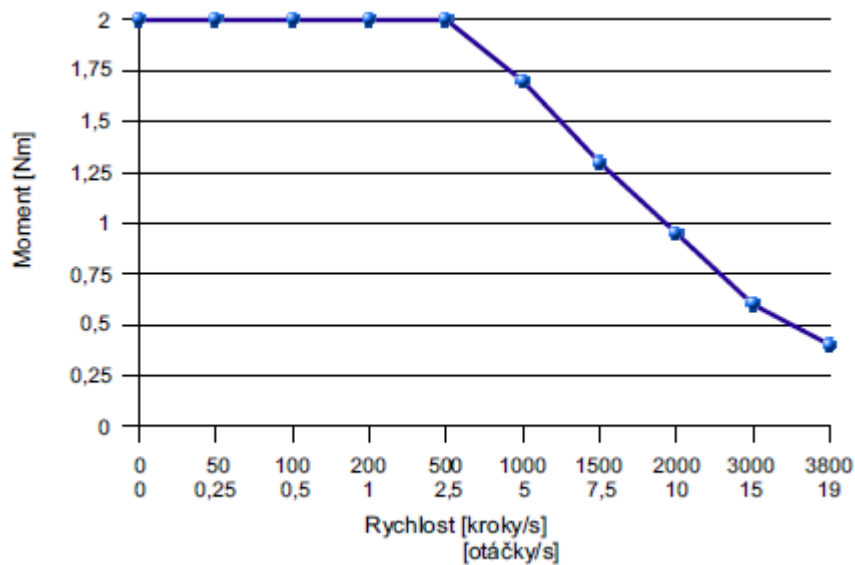
Servomotory jsou většinou AC synchronní rotační elektromotory používané především pro polohovací aplikace. U těchto motorů se dá velmi dobře řídit přesná poloha natočení výstupní hřídele, moment či rychlost. Jsou tedy nejčastěji využívány pro všechny stroje a CNC aplikace. Servomotory mají velmi plochou křivku výkonu v závislosti na otáčkách. Další velkou výhodou je krátkodobý špičkový moment, který lze využít pro akcelerace (prakticky jenom AC servomotory popřípadě lineární motory umožňují tuto vlastnost). Vzhledem k minimálním rozměrům konstrukce servomotorů je setrvačnost velmi malá. Servomotory vyžadují specifické drivery, které spolupracují se zpětnou vazbou elektromotoru enkodérem. Jde tedy o zpětnovazební systém. Běžné rozlišení enkodérů je 17 bit. Enkodéry jsou buď inkrementální či absolutní.



Obr. 31. Typická momentová charakteristika servomotoru

6.1.2 Krokové motory

Krokové motory lze díky svým vlastnostem použít pro přesné polohování při zachování velmi dobré ceny. Klasické krokové motory mají však nevýhodu kvůli momentové charakteristice. Klasický krokový motor lze využít max. do 900 ot/min při zachování použitelného pohybového momentu. Velmi zajímavou alternativou k servomotorům jsou krokové motory s enkodérem, kterými lze nahradit servomotor (pokud není vyžadována vysoká výstupní rychlost). Tyto motory jsou výhodné pro aplikace kde je třeba velkého rozběhového momentu (řádově do 15 N.m). Úhel kroku je jmenovitý úhel, který odpovídá změně polohy rotoru po příchodu jednoho impulzu na vstup. Na velikost úhlu kroku má vliv konstrukce motoru tj. počet fází statoru, počet pólů rotoru a způsob řízení krokového motoru. Krokový motor má otáčení výstupní hřídele po krocích 1,8 stupně (elektronicky až 10ky tisíc kroků).



Obr. 32. Typická momentová charakteristika krokového motoru

6.1.3 Lineární motory

Lineární motory jsou dnes prakticky hi-tech řešení pro lineární polohování. Lineární motor pracuje na indukčním principu. Můžeme si ho představit jako klasický rotační motor rozvinutý do roviny, který umožňuje přímočarý pohyb bez zprostředkujícího převodu. Lineární motor se často využívá u moderních přesných obráběcích strojů a tam kde je kladen důraz na vysokou dynamiku pohybu. Tyto motory umožňují zrychlení až 10G a rychlost posuvu 10ky m/s. Tato technologie má však několik nevýhod mezi, které patří:

- relativně nízký pohybový moment (nemožnost použít převodovku)
- motor musí být přesně uložený (nutnost připravit přesné lože a vymezení vzdáleností)
- motor je velmi náchylný na vnější nečistoty (nutnost vysokého krytí což je v praxi náročné technicky i cenově)
- obecně vyšší požadavky na řízení
- vysoká cena

I přes negativní vlivy jde o technologii, která bude v budoucnu velmi často používána pro lineární polohování.



Obr. 33. Lineární motor zakomponovaný do lineárního systému (rotor tvoří jednotlivé magnety a stator je pohyblivá část)

6.1.4 Ostatní možnosti motorů

Pro zadanou aplikaci by šli dále ještě použít stejnosměrné motory EC a BLDC. EC motory však nejsou využívány kvůli malé životnosti, což způsobují kartáče. BLDC motory eliminují životnost, protože neobsahují kartáče. Tato technologie je z cenového pohledu velmi blízko AC servomotorům, které však BLDC motory převyšují v mnoha aspektech (lineární ploché průběhy veličin, špičkový moment, vyšší výkony). Prakticky jde o opačnou situaci jako při návrhu motoru pro mobilního bezpečnostního robota.

6.2 Výběr vhodné převodovky

Převodovky slouží obecně k redukci rychlosti a zvýšení momentu. U převodovek jsou velmi sledované parametry převod, přenos momentu, servisní faktor, rozměry, účinnost a provedení. Principů převodovek je celá řada. V následujících bodech je shrnutí vhodných převodovek pro lineární manipulátor. U převodovek jsem sledoval především tyto parametry:

- převodový poměr (obecně u aplikací lineárního posuvu je požadován vyšší převodový poměr)
- výstupní moment (v závislosti na vybraném motoru)
- radiální, axiální zatížení výstupní hřídele/příruby (nezbytný parametr pro návrh lineárního systému)
- rozměry (v praxi se obecně nejvíce prosazuje kompaktní řešení)
- přetížitelnost (vzhledem k požadavku na vysokou akceleraci je nutné sledovat parametr krátkodobého momentového zatížení)
- přesnost (robotická pracoviště vyžadují maximální přesnost)
- setrvačnost (při vysoké setrvačnosti je velmi těžké elektronicky řídit požadované parametry)

6.2.1 Kuželočelní převodovky

Velmi variabilní a modulární řešení úhlového převodu. Převodovka je tvořena kuželovým soukolím s předstupněm, které zvyšuje převodový poměr. Výstupem je většinou dutá průchozí hřídel, která je uložena ve dvojitěm ložiskovém domku.



Obr. 34. Ukázka kompaktní kuželové převodovky CMB (výrobce TRANSTECNO)

6.2.2 Předepnuté převodovky

Jde o speciální systém reduktoru s dvěma mechanickými předepnutými výstupními pastorky. Převodovka je určena pro lineární systém hřeben/pastorek. Předepnutí je obzvláště výhodné pro přesné aplikace. Tento systém umožňuje bezvúlový a tuhý přenos rotační energie na lineární mechanismus. Tento systém je využíván pro těžké a velké stroje jako jsou gantry systémy, velké soustruhy, brusky a CNC stroje.

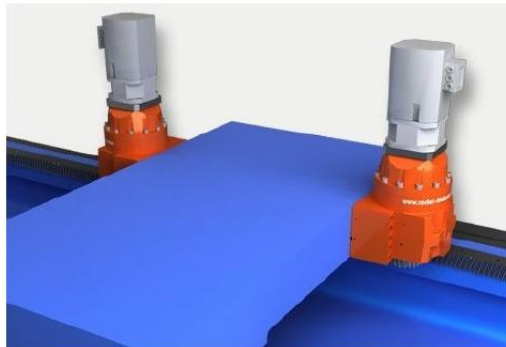


Obr. 35. Předepnuté převodovky (výrobce LICAT)

6.2.3 Planetové převodovky

Planetové převodovky mají obecně mnoho výhod oproti klasickým převodovkám, ale v minulosti byly díky vysoké ceně méně používané. Hlavními výhodami jsou malé rozměry, vysoká přesnost a účinnost. Pro přenos rotační energie na hřebenový systém se velmi často využívá systém master-slave. Jde o využití dvou planetových převodovek, které jsou navzájem proti sobě předepnuté. Na následujícím obrázku je vidět předpnutí pomocí dvou planetových převodovek, které jsou osazeny servomotory. Elektronické řízení servomotorů pak předepíná převodovky proti sobě na hřebenu. Při rozjezdu se začíná zvyšovat velikost momentu master motoru, přičemž slave motor dodává stále záporný moment, takže vůle je stále vymezena. Při dalším zvyšování momentu aster motoru dosáhne motor slave hodnoty nulového momentu a začne nabývat kladných hodnot a začíná se také podílet na pohybu vpřed. Zpomalování probíhá na stejném principu jako zrychlování, pouze v obráceném sledu.

Velkou výhodou je, že na pohybu vpřed se podílejí oba motory, celková síla potřebná pro zrychlení stolu je potom součtem těchto momentů, což je pozitivní pro dynamické vlastnosti systému.



Obr. 36. Master-slave systém REDEX



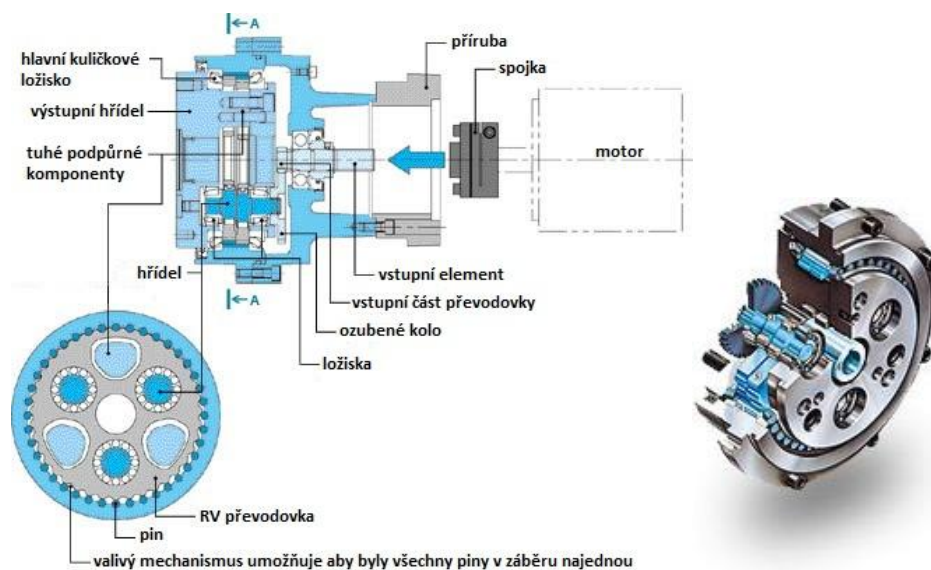
Obr. 37. Klasické provedení planetové převodovky EISELE EPL

6.2.4 Cykloidní převodovky

Cykloidní převodovky jsou v robotice prakticky nepoužívanější typ reduktoru. Jsou totiž velmi přesné, přetížitelné, kompaktní a na výstupu převodovky je integrování axiálně/radiální ložisko. Na převodovku tedy lze mechanicky připojit břemeno bez nutnosti ložiskového domku. Pro svou práci jsem vybral japonské cykloidní převodovky Nabtesco, které jsou světovým lídrem ve výrobě převodovek pro robotiku (70 procent výrobců celosvětově využívá převodovky Nabtesco). Nabtesco jako jediný výrobce nabízí rozsah převodových poměrů od 27 do 258. Cykloidní převodovky lze přetížit až o 500 procent. Převodovky lze prakticky připojit k jakémukoliv motoru.

Hlavní výhody cykloidních převodovek:

- vysoká přesnost < 1 arcmin
- vysoká torzní tuhost
- kompaktní rozměry
- vysoká účinnost
- vysoká přetížitelnost (až 5krát nominální zatížení)
- vysoká vnější zatížitelnost
- nízké vibrace a setrvačnost
- velký rozsah vysokých převodových poměrů



Obr. 38. schematické znázornění cykloidní převodovky RD

6.3 Výběr vhodného polohovacího systému

Lineární polohovací systém slouží k přenosu rotačního pohybu na pohyb lineární. Pro lineární pohyb se nejčastěji používá šroubový systém, hřebenový systém a řemenový systém. Při použití těchto principů je nutné ještě použít mechanické vedení, které zprostředkovává valivé zatížení a polohovací systém pak obstarává pohyb jako takový.

Při výběru lineárního systému jsem definoval následující požadavky:

- vysoká rychlost a zrychlení (požadavek na rychlou manipulaci)
- účinnost (neúčinné lineární systémy zvětšují požadavky na motor a převodovku)
- rozměry (obecně je vyžadováno kompaktní provedení)
- momentová zátěž (dle požadavků)

6.3.1 Kuličkové šrouby

Jedná se o nejpoužívanější metodu náhonu lineárních os. Tyto pohony se vyznačují jednoduchým vymezením vůle předepnutím. Nejběžnější uspořádání je pevná matice a poháněný šroub, což je vhodné pro malé a středně velké stroje do délky 4-5 m. Jiná možnost uspořádání vznikne, pokud poháníme matici. Toto uspořádání umožňuje vyšší posuvové rychlosti, protože šroub je pevný a odpadají tak omezující kritické otáčky šroubu. Vzhledem k vysoké účinnosti jsou kuličkové šrouby nesamosvorné, proto se používá motorů s brzdami nebo externí brzdy.

Základní parametry kuličkových šroubů:

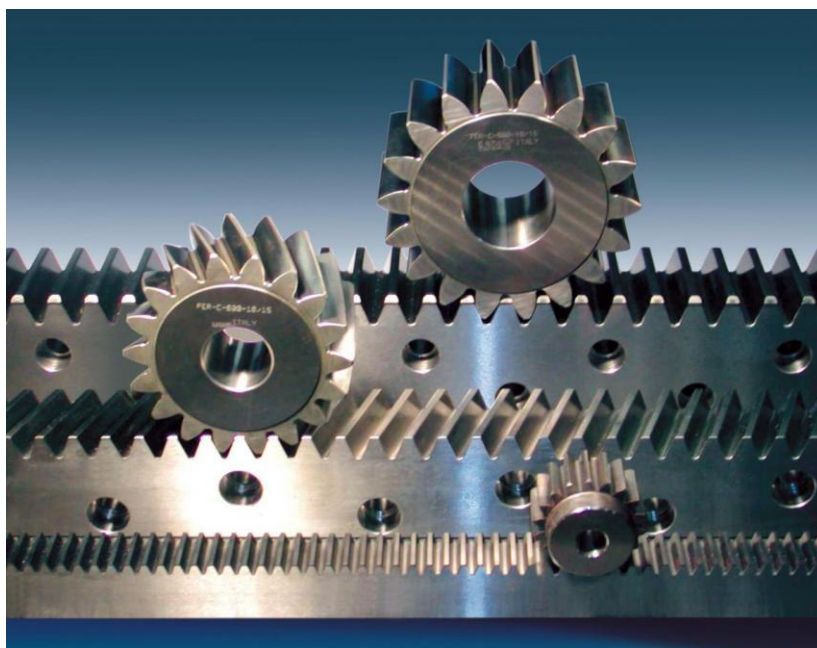
- kuličkový šroub opakovatelnost: ± 0.025 mm.
- maximální rychlost pro lineární kuličkový šroub: 1 m/s
- maximální zrychlení na kuličkový šroub: 10 m/s^2
- montážní poloha: libovolná.



Obr. 39. Kuličkový šroub

6.3.2 Hřeben s pastorkem

Pohony pomocí pastorku a hřebene se běžně používají pro převod rotačního pohybu na translační pro svoji jednoduchost. Své uplatnění nachází, protože mají na rozdíl od kuličkového šroubu malý převod a umožňují při nízkých hmotnostech posuvných hmot vysoké zrychlení a posuvové rychlosti. Velkou výhodou je to, že umožňují stavebnicovou koncepci a jejich tuhost a maximální rychlost není na rozdíl od kuličkového šroubu ovlivněna délkou posuvu a je možné je proto použít pro prakticky neomezenou délku. Účinnost je přibližně 96%. Mezi nevýhody pastorku a hřebene tedy patří především nutnost vymezení vůle a nesamosvornost. Pro řešení zadání jsem pracoval s hřebeny Licat. Tento výrobce vyrábí hřebeny s modulem od 0,79 až po 12 v provedení s přímým a šikmým ozubením. Moduly 4, 5, 6, 8, 10 a 12 jsou také vyráběny se speciálním patentovaným extra-vysokým profilem s širokou základnou zubu. Tento druh profilu, zaručuje neustálý záběr dvou zubů, což značně zvyšuje zátěž přenesenou na hřebenu a taktéž plynulost a přesnost pohybu i při vysokém zatížení. Všechny hřebeny jsou vyráběny ve třech materiálových verzích dle náročnosti aplikace – A, B, C. Typy hřebenů "B" a "C" mají povrch zubů dokončen povrchovým broušením. Třída přesnosti ozubení 5 DIN 3962 s maximální roztečnou chybou 0.0035 mm, zaručuje strojům vybavených těmito hřebeny velmi vysoké úrovně přesnosti a spolehlivosti. Maximální tangenciální zatížení hřebenů je 36.000 daN.



Obr. 40. Hřebeny s pastorky

6.3.3 Lineární vedení

Lineární vedení je nezbytné pro uložení vozíku, na kterém bude usazen robot. V současné době je hojně využíváno lineární kuličkové vedení. Valivé vedení je zprostředkováno pomocí rotujících cirkulujících kuliček v obloukových drážkách, které jsou integrovány ve vozíku. Vozík tak přenáší sílu na vodící kolejnici, která je vyrobena z tvrzené oceli. Vozíčky standardně disponují maznicí, která zaručuje optimální mazací film, snižuje tření a chrání kovové části před korozi. Profilované kolejnice vynikají svou přesností a velkou tuhostí.

Vlastnosti kuličkového lineárního vedení:

- vysoká tuhost konstrukce
- vynikající dynamické funkce: rychlost $V_{max} > 5 \text{ m/s}$, zrychlení $A_{max} > 300 \text{ m/s}^2$
- ekvivalentní nosnost v jakémkoliv směru
- lehký a kompaktní vozík
- ochrana proti prachu pomocí dvojitého koncového těsnění



Obr. 41. Lineární vedení – výrobce cpc

7 VYHODNOCENÍ A ZVOLENÍ OPTIMÁLNÍ KONCEPCE POHONU PRO TRANSLAČNÍ OSU ROBOTA

Jako optimální konfiguraci pohonu translační osy robota jsem po pečlivém zvážení zvolil prvky (základní selekce je v předchozích kapitolách):

7.1 Servomotor

Motor vyhovuje požadavkům na přesnost, tuhost, zatížitelnost i dynamiku. Nevýhodou je vyšší cena a složitější elektronické řízení. V robotice se však používá především těchto motorů. Z praktického pohledu je vhodné využít stejného výrobce servomotoru, který používá výrobce robotů. Odpadá pak složitá parametrizace servomotoru v nadřazeném řízení celého robota. Pro svoji práci jsem pracoval s roboty FANUC, které mají vlastní servomotory FANUC BETA.



Obr. 42. Servomotor FANUC BETA

7.2 Převodovka

Jako optimální převodovku jsem zvolil planetovou převodovku APEX typ AD. Jde o přesnou planetovou převodovku s vysokou přesností. Velkou výhodou této převodovky je výstupní příruba, ke které lze jednoduše a efektivně připojit pastorek.



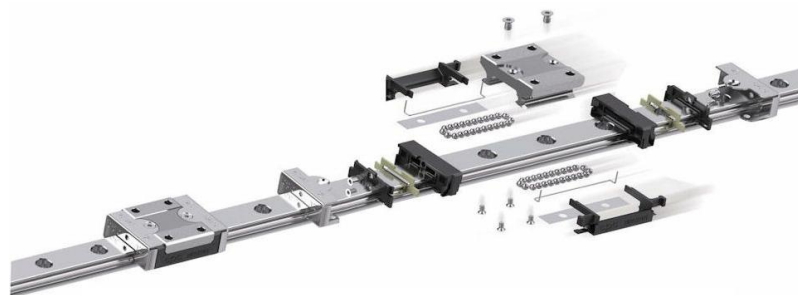
Obr. 43. Planetová převodovka APEX DYNAMICS typ AD

7.3 Lineární systém

Vzhledem k vysokým požadavkům na vzdálenost, přesnost a dynamiku je nejvhodnějším řešením hřebenový systém hřeben/pastorek. Pro moje základní zadání jsem vybral pouze master systém bez předepnutí. Převodovka AD je dostatečně přesná (5 arc.min). Zpracování systému master-slave by přesáhl požadovanou velikost této práce. Pro valivý pohyb jsem zvolil kuličkové čtyřřadé vedení cpc. Jde o nezbytnou součást supportu.



Obr. 44. Hřeben s pastorkem s přímým ozubením



Obr. 45. Lineární kuličkové vedení

Vycházel jsem z následujících základních počátečních podmínek:

Zrychlení a	2m/s^2
Hmotnost vozíku m	1000 kg
Kolmé zatížení vedení P	1000 daN
Účinnost hřebene u	0,95
Rychlost v	1,5 m/s
Koeficient tření kt	0,05
Bezpečnostní koeficient C	3
Gravitační zrychlení g	$9,81\text{m/s}^2$

Tabulka 2. Počáteční podmínky

Vybral jsem motor **Fanuc Beta is 22/2000**, který má následující parametry (jde o motor podporovaný řídicím systémem FANUC):

výkon	3.8 kW
nominální moment	22 Nm
rychlost	2000 ot/min

Tabulka 3. Parametry motoru Fanuc Beta

Planetovou převodovku jsem zvolil **AD140** s výstupní přírubou. Koncepce převodovky je určena pro hřebenový systém. Převodovku lze velmi jednoduše nasadit pro požadovanou aplikaci.

Parametry převodovky AD140 007 jsou:

převodový poměr i	7
vůle v ozubení	<5 arcmin
Nominální výstupní moment	550 Nm
Maximální výstupní moment	1650 Nm
Torzní tuhost	151 Nm/arcmin
Axiální zatížení	6200 N
Klopný moment	1300 Nm

Tabulka 4. Parametry převodovky (nerozová ocel těla a výstupní příruby)

Pro hřeben je nutné spočítat tangenciální zatížení z následujících vztahů:

Tangencionální síla:

$$F_{or} = P \cdot (g \cdot kt + a) = 249 \text{ daN} \quad (11)$$

Virtuální tangencionální síla:

$$F_{vr} = C \cdot F_{or} = 747 \text{ daN} \quad (12)$$

Z těchto parametrů je nutné vybrat dostatečně pevný materiál hřebenu a pastorku.

Nyní jsem vybral hřeben střední třídy materiálu UNI C45 (AISI-SAE 1045) z důvodu optimální ceny a požadované kvality. Na základě předpokládané rychlosti a zatížení vyšel požadovaný modul $M=3$. V obrázku 46 je vidět závislost tangenciální síly a rychlosti při uvažovaném materiálu UNI C45 (AISI-SAE 1045). Červenými čarami je naznačen průřez požadavku. Vzhledem k servisnímu faktoru jsem zvolil velikost hřebenu modul 3.

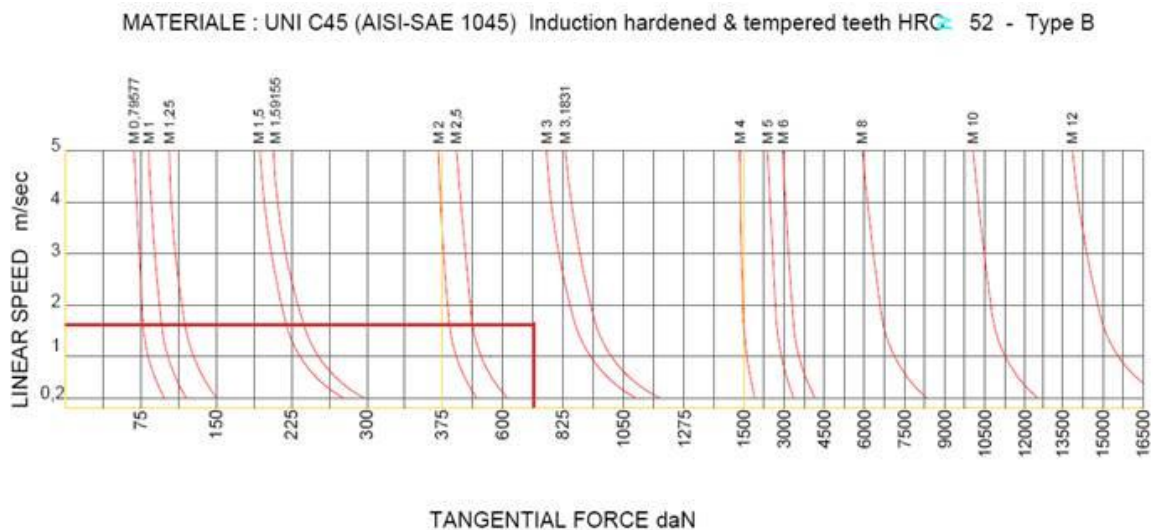
V závislosti na použitém hřebenu jsem vybral pastorek z materiálu o řadu vyšší UNI 18NiCrMo5 (AISI-SAE 4320). Je nutné, aby pastorek byl vždy z odolnějšího materiálu, protože musí mít vyšší životnost než hřeben samotný.

Nyní následuje vybrání optimálního počtu zubů pastorku. Po více pokusech jsem dospěl k hodnotě počtu zubů $Z = 24$. Níže je uveden ověřovací výpočet pro průměr pastorku. Je uvažováno použití převodovky s převodem $i = 5$. Výstupní moment pohonu se tudíž pohybuje kolem hodnoty 100 Nm při 400 ot./min.

Střední průměr pastorku:

$$D_p = \frac{M \cdot 100 \cdot 2 \cdot u}{F_{or}} = 76,3 \text{ mm} \quad (13)$$

Z katalogu LICAT jsem vybral pastorek s nejbližším počtem zubů -> 24.



Obr. 46. Závislost tangenciální síly a rychlosti (hřeben LICAT)

Pro lineární vedení jsem vybral dle zadaných parametrů kuličkové lineární vedení s dvěma řadami kuliček od výrobce cpc.

Vozík jsem zvolil vozík HRC 30 + kolejnici ARC/HRC30

vysoko-zátěžový blok	
standardní provedení	N
předepnutí V0	0,02C
délka / šířka	118 mm / 90 mm
dynamické zatížení C100B	39,6 kN
statické zatížení C0	56,6 kN
statický moment: M_{r0} / M_{p0} / M_{y0}	960 N.m / 950 N.m / 950 N.m
vysoko-zátěžová verze kolejnice	
velikost profilu	45x28 mm
délka	1000 mm (délku jde jednoduše nadstavovat)
precizní stupeň provedení	H

Tabulka 5. Parametry vozíku a kolejnice

Pro zadanou aplikaci je nutné použít dvě lineární vedení, ve vodorovném uspořádání. Při montáži je nutné, aby bylo usazení co nejpreciznější. V případě špatného usazení hrozí křížení vedení a tím nelineární průběh chodu.

ZÁVĚR

Ve své bakalářské práci jsem se věnoval návrhu pohonu pro mobilního robota určeného pro bezpečnostní práce. Bakalářskou práci jsem dále rozšířil o velmi zajímavou úlohu řešení translačního pohybu pomocné osy, která se využívá v robotice. Prakticky jde o velmi podobnou úlohu jako je mobilní robot. Jde však o odlišný příklad návrhu, který se běžně řeší v praxi.

V teoretické části jsem se snažil jednoduše shrnout základní principy a konstrukce elektromotorů. Pohony patří mezi základní prvky automatizace a v podstatě není mnoho strojů, kde se pohony nevyužívají. Obecně oblast motorů a pohonů je velmi rychle se rozvíjející odvětví a mnoho technologií se jen stěží dá najít ve starší literatuře. V teoretickém popisu jsem zachytil spíše základní principy a prvky elektromotorů. V teoretické části je také popsána pohonná technologie, kterou jsem využil v praktické části.

V praktické části jsem definoval a analyzoval jednotlivé možnosti komponent pro pohon dle zadání:

- a. pohon pro mobilního robota určeného pro bezpečnostní práce
- b. pohon pro translační pomocnou osu pro konvenčního průmyslového robota (rozšíření bakalářské práce)

Z možností, které jsem zhodnotil, jako vhodné jsem poté vybral neoptimálnější pohon z pohledu požadavků a kritérií, které jsem taktéž deterministicky definoval.

Následně jsem spočítal veškeré důležité výpočty pro návrh obou zadání.

Výsledkem praktické části jsou:

1. Optimální pohon pro mobilního robota určeného pro bezpečnostní práce je stejnosměrný pohon s čelní převodovkou o rychlosti 10 ot/min a momentu 8 N.m. Navrhl jsem také koncept ovládání směru pohybu na základě řízení jednotlivých hnaných kol. Prakticky jde o jakýsi elektronický diferenciál. Vybral jsem také konvenčně vyráběný pohon 8DCG24-25-30 + 8GBK300BMH .
2. Optimální pohon pro translační osu konvenčního robota je AC synchronní servomotor s planetovou převodovkou, hřebenovým

systemem a lineárním vedením. Spočítal jsem dle zadaných parametrů všechny potřebné údaje pro návrh pohonu dle zadání. Dále jsem zpracoval analýzu možností pro zadanou úlohu a vybral reálné nejvhodnější komponenty. Jde o servomotor Fanuc Beta is 22/2000, planetová převodovka s výstupní přírubou AD140007 a hřebenový systém LICAT modul 3 s pastorkem v materiálové provedení UNI C45 (AISI-SAE 1045) pro hřeben a UNI 18NiCrMo5 (AISI-SAE 4320) pro pastorek.

Vzhledem k rozsahovému omezení této práce jsem se nezabýval detailně řídicí elektronikou motorů. Myslím, že nejvhodnější řešení je použití jednoduchých driverů, které by komunikovali s nadřazenou úrovní pomocí sběrnice CAN. Pro nadřazenou řídicí úroveň bych pak použil standardní PLC nebo IPC, které by bylo pro testování jednodušší pro parametrizaci. Myslím, že samotná úloha řízení je velmi vhodné téma na další rozpracování a analýzu.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

In my thesis I worked the drive design for a mobile robot designed for security work. Bachelor's thesis, I further expanded the role of a very interesting solution to translational movement of the auxiliary axis, which is used in robotics. Practically it is a very similar role as a mobile robot. But it is a different example of design that is commonly dealt with in practice.

In the theoretical part, I simply tried to summarize the basic principles and design of electric motors. Drives are among the fundamental elements of automation and basically not a lot of machines where drives are not used. General area of motors and drives is very fast growing industry and many technologies can hardly be found in the older literature. The theoretical description I caught rather basic principles and elements of electric motors. The theoretical part is also described propulsion technology that I used in the practical part.

In the practical part, I define and analyze various options for the drive components to specification:

- a. drive for a mobile robot designed for safety work
- b. auxiliary propulsion for translational axis for conventional industrial robot (extension of the thesis)

The options that I have reviewed, as appropriate, I then chose the most optimal in terms of power requirements and criteria, which I also defined deterministically. Then I calculated all the relevant calculations for the design of both tasks.

The result of the practical part:

1. The optimum drive for the mobile robot designed for security work is a direct drive transmission with front speed of 10 rev / min and torque 8 Nm. I suggested the concept of controlling the direction of motion control based on individual drive wheels. Almost as a kind of electronic differential. I chose the conventionally produced power 8DCG24-25-30 + 8GBK300BMH.
2. The optimum drive for the translational axis of the robot is a conventional AC synchronous servo motor with planetary gear, rack

and pinion system and the linear guide. I calculated according to the parameters given all the necessary data for a drive to specification. I also prepared an analysis of options for a given task and choose the most suitable real components. It is a servo motor with Fanuc Beta 22/2000, planetary gearbox output flange AD140007 Licata ridge system and module 3 with the material of the pinion UNI C45 (AISI-SAE 1045) for ridge and UNI 18NiCrMo5 (AISI-SAE 4320) for the pinion.

Due to the limitations of this work range I didn't dealt in detail with engine control electronics. I think the most simple solution is to use drivers that communicate with a superior level using the CAN bus. For a superior level of control would use standard PLC or IPC then, which would be easier to test for parameterization. I think that the role of management is very suitable topic for further elaboration and analysis.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Monografie:

- [1] ŠTĚPINA, Jaroslav. Jednofázové indukční motory. Praha: SNTL, 1957.
- [2] ROUBÍČEK, Ota. Elektrické motory a pohony. Brno: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-092-X.
- [3] UHLÍŘ, Ivan a KOLEKTIV. *Elektrické stroje a pohony*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03730-0.
- [4] KARGER, Adolf a Marie KARGEROVÁ. Základy robotiky a prostorové kinematiky. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 80-01-02183-1.

Internetové zdroje:

- [5] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromotor#Literatura>
- [6] http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=42921
- [7] <http://elektrotechnika.netstranky.cz/stejnoserne-stroje/stejnoserne-stroje.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AC	<i>Alternating current</i> , střídavý proud
DC	<i>Direct current</i> , stejnosměrný proud
EC	<i>Electronically Commutated</i> , elektronicky komutovaný.
EMC	<i>Electro Magnetic Compatibility</i> , elektromagnetická kompatibilita
BLDC	<i>Brushless Direct Current</i> , stejnosměrný bezkartáčový.
CAN	<i>Controller Area Network</i> , sériový komunikační protokol
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> , programovatelný logický automat
PM	Permanentní magnet
IPC	<i>Inter-process communication</i>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Elektromotor	12
Obr. 2. Značka elektromotoru	13
Obr. 3. Stejnoseměrný motor	14
Obr. 4. a-stroj s cizím buzením, b-stroj s derivačním buzením, c-stroj se sériovým buzením, d-stroj s kompaundním buzením	15
Obr. 5. Řez asynchronním motorem	16
Obr. 6. Tabulka pro určení otáček asynchronního stroje v závislosti na frekvenci a počtu pólů statoru.	17
Obr. 7. Schéma buzení derivačního motoru.....	25
Obr. 8. Schéma komutátorového motoru buzeného permanentním magnetem.....	27
Obr. 9. 1-kostra statoru, 2-magnety, 3-rotorový svazek, 4-komutátor, 5-kartáč(uhlík), 6-držák kartáčků, 7-chladicí ventilátor elektromotoru	28
Obr. 10. Konstrukční uspořádání bezkomutátorového motoru EC: motoru 1- svorkovnice, 2-statorový svazek, 3-převodovka, 4-výkonový modul, 5-řídící modul, 6-čidlo polohy, 7-ventilátor.....	30
Obr. 11. Konstrukční uspořádání bezkomutátorového motoru BLDC: 1-statorový svazek, 2-rotorový svazek s magnety, 3-čidlo polohy, 4-modul elektroniky, 5- ventilátor.....	31
Obr. 12. Schéma zapojení motoru EC/BLDC.....	32
Obr. 13. Kosmický průzkumný robot Spirit	35
Obr. 14. Jednoduchý průzkumný Recon Scout (využívá především FBI a SWAT)	35
Obr. 15. Průzkumný robot s odstřelovací puškou (Univerzita obrany v Brně).....	36
Obr. 16. Univerzální průzkumný robot nachází využití především při přírodních katastrofách, policejních i vojenských operacích (iRobot).....	36
Obr. 17. Přídavná horizontální translační osa pro robota ABB	37
Obr. 18. Přídavná vertikální translační osa pro roboty ABB	37
Obr. 19. Typická charakteristika stejnosměrného motoru – závislost účinnosti, výkonu, rychlosti a napájení	38
Obr. 20. Klasická šneková převodovky – výrobce Transtecno.....	39
Obr. 21. Ukázka kompaktní kuželové převodovky CMB - výrobce TRANSTECNO	40
Obr. 22. Čelní převodovka CMG Transtecno	40

Obr. 23. Řídící jednotka SANYO s BLDC motorem	41
Obr. 24. Schéma pohonu robota	42
Obr. 25. Schéma pohonu robota s natáčením nápravy pomocí aktuátoru.....	42
Obr. 26. Separátní ovládání kol pomocí jednotlivých pohonů	43
Obr. 27. DC motor DKM.....	44
Obr. 28. Čelní převodovka DKM	44
Obr. 29. Výsledný pohon - spojení motoru a převodovky DKM.....	45
Obr. 30. rozměry pohonu DKM 8DCG24-25-30 + 8GBK300BMH.....	47
Obr. 31. Typická momentová charakteristika servomotoru.....	49
Obr. 32. Typická momentová charakteristika krokového motoru	50
Obr. 33. Lineární motor zakomponovaný do lineárního systému (rotor tvoří jednotlivé magnety a stator je pohyblivá část)	51
Obr. 34. Ukázka kompaktní kuželové převodovky CMB (výrobce TRANSTECNO).....	53
Obr. 35. Předepnuté převodovky (výrobce LICAT)	53
Obr. 36. Master-slave systém REDEX	54
Obr. 37. Klasické provedení planetové převodovky EISELE EPL.....	54
Obr. 38. schematické znázornění cykloidní převodovky RD	55
Obr. 39. Kuličkový šroub.....	57
Obr. 40. Hřebeny s pastorky	58
Obr. 41. Lineární vedení – výrobce cpc.....	59
Obr. 42. Servomotor FANUC BETA	60
Obr. 43. Planetová převodovka APEX DYNAMICS typ AD	61
Obr. 44. Hřeben s pastorkem s přímým ozubením	61
Obr. 45. Lineární kuličkové vedení	62
Obr. 46. Závislost tangenciální síly a rychlosti (hřeben LICAT).....	64

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Parametry pro výpočet motoru.....	45
Tabulka 2. Počáteční podmínky.....	62
Tabulka 3. Parametry motoru Fanuc Beta.....	62
Tabulka 4. Parametry převodovky (nerezová ocel těla a výstupní příruby).....	63
Tabulka 5. Parametry vozíku a kolejnice.....	65

