VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

Elektrické pohony ve strojírenství

Electric Drives in Engineering

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Vojtěch Štos
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	**Vojtěch Štos**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.**
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Elektrické pohony ve strojírenství

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Elektrický pohon je označení pro soubor všech prostředků zajišťujících pohyb nějakého strojního mechanizmu za pomocí elektrické energie, za pomocí určitého elektrického motoru. Problematika elektrických pohonů se vyvíjela, od chápání pohonu pouze jako motoru, který pohání nějaký pracovní mechanizmus až do dnešní doby. V současné době se již jedná o označení poměrně složité struktury, a to jak z hlediska části výkonové, kam patří především oblast různých a dnes poměrně propracovaných motorů, tak i z hlediska řízení těchto struktur, kde velkou úlohu hraje i oblast automatizace. Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na zpracování rešerše z oblasti elektrických pohonů dle stanovených cílů.

Cíle bakalářské práce:

Definujte z hlediska dnešního pojetí elektrický pohon a tento popište blokovým schématem. Jednotlivé bloky charakterizujte.
Pojednejte o vývoji definice elektrického pohonu.
Rozeberte mechanické a elektrické vlastnosti elektrických pohonů.
Popište vlastnosti vybraných motorů, které nacházejí uplatnění v elektrických pohonech.
Rovněž popište vlastnosti motorů pohonů, které nachází uplatnění v automatizační technice.
Stručně pojednejte o základech regulace elektrických pohonů.

Seznam doporučené literatury:

MICHALÍK, Ján a Jozef BUDAY. Elektrické stroje. 1. vydání. Žilina: EDIS –vydavatel´stvo ŽU, 2006. 192 s. ISBN 80-8070-568-2.

HAMMER, Miloš. Elektrotechnika a elektronika. Přednášky. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno. Učební texty Vysokého učení technického v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2006. 134 s. ISBN 80-214-3334-5.

PITTERMANN, Martin. Elektrické pohony. 1. vydání. Základy. Západočeská univerzita v Plzni, 2008. 100 s. ISBN 978-80-7043-729-2.

VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír NOVOTNÝ a Pavel MINDL. Elektromechanické měniče. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015. 219 s. ISBN 978-80-01-04875-7.

HŰTTNER, L.; KLUG,L. Elektrické stroje. 1. vydání. Bratislava: Vydavatelství Slovenské technické univerzity v Bratislave, 2005. 172 s. ISBN 80-227-2234-0.

KOBRLE, Pavel a Jiří PAVELKA. Elektrické pohony a jejich řízení. 3. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 200 s. 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.

JAVŮREK, J. Regulace moderních elektrických pohonů. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, 2003. 263 s. ISBN 80-247-0507-9.

FITZGERALD, A. E., Charles KINGSLEY a Stephen D. UMANS. Electric machinery. 6th ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, 2003. 703 s. ISBN 00-711-2193-5.

HRABOVCOVÁ, Valéria, Pavol RAFAJDUS. Elektrické stroje. Teória a príklady. 1. vydání. Žilinská univerzita v Žiline, 2009. 415 s. ISBN 978-80-554-0101-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Pavel Heriban, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

V této bakalářské práci je věnována pozornost základům elektrických pohonů ve strojírenství. Počáteční kapitola je věnována jejich definici a rozdělení. Následující kapitola se zabývá obecnými mechanickými a elektrickými vlastnostmi elektrických pohonů. Zbývající část práce se věnuje podrobnému popisu jednotlivých druhů elektrických poháněcích strojů a zvláštní kapitola je věnována strojům, které své uplatnění nachází především v automatizační technice. Poslední kapitola se zabývá řízením a regulací s přihlédnutím k řízení a regulaci elektrických pohonů.

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the basics of electric drives in mechanical engineering. The initial chapter includes their definition and classification. The following chapter deals with the general mechanical and electrical properties of electric actuators. The remaining part of the thesis is devoted to a detailed description of the different types of motors. A special chapter is devoted to motors that find their application mainly in automation technology. The last chapter focuses on the control and regulation with regard to the control and regulation of electrical drives.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrický pohon, vlastnosti elektrických pohonů, vlastnosti elektrických motorů, asynchronní motory, synchronní motory, stejnosměrné motory, motory v automatizační technice, řízení a regulace

KEYWORDS

Electric drive, properties of electric drives, properties of electric motors, asynchronous motors, synchronous motors, direct current motors, motors in automation technology, control and regulation

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

2024

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠTOS, Vojtěch. *Elektrické pohony ve strojírenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, 2024, 54 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 23. 5. 2024 ……

Vojtěch Štos

OBSAH

1 ÚVOD ... 13

2 DEFINICE, JEJÍ VÝVOJ A BLOKOVÉ SCHÉMA ELEKTRICKÝCH POHONŮ ... 15

2.1 Definice a blokové schéma elektrického pohonu ... 15
2.2 Vývoj definice elektrického pohonu ... 15
2.3 Rozdělení elektrických pohonů ... 16

3 VLASTNOSTI ELEKTRICKÝCH POHONŮ ... 17

3.1 Mechanické vlastnosti elektrických pohonů ... 17
3.2 Elektrické vlastnosti elektrických pohonů ... 17

4 VLASTNOSTI VYBRANÝCH ELEKTRICKÝCH MOTORŮ ... 18

4.1 Třífázové asynchronní motory ... 18
4.1.1 Třífázový asynchronní motor s kotvou nakrátko ... 18
4.1.2 Spouštění asynchronních motorů s kotvou nakrátko ... 19
4.1.3 Třífázový asynchronní motor s kroužkovou kotvou ... 21
4.1.4 Spouštění asynchronních motorů s kroužkovou kotvou ... 21
4.1.5 Řízení otáček třífázových asynchronních motorů ... 22
4.1.6 Brzdění asynchronních motorů ... 23
4.2 Jednofázové asynchronní motory ... 24
4.2.1 Jednofázový indukční motor ... 24
4.2.2 Jednofázový asynchronní motor s pomocným vinutím ... 25
4.2.3 Jednofázový asynchronní motor s rozběhovým a provozním kondenzátorem ... 25
4.2.4 Jednofázový asynchronní motor se stíněným pólem ... 26
4.3 Synchronní motory ... 27
4.3.1 Synchronní motor s hladkým rotorem ... 29
4.3.2 Synchronní motor s vyniklými póly ... 29
4.4 Stejnosměrné motory ... 30
4.4.1 Stejnosměrný komutátorový motor s cizím buzením ... 31
4.4.2 Stejnosměrný motor s derivačním buzením ... 31
4.4.3 Stejnosměrný motor se sériovým buzením ... 32
4.4.4 Stejnosměrný motor s kompaudním buzením ... 32
4.4.5 Stejnosměrný komutátorový motor buzený magnety ... 33
4.4.6 Řízení stejnosměrných motorů ... 33
4.4.7 Brzdění stejnosměrných motorů ... 34

5 ELEKTRICKÉ MOTORY V AUTOMATIZAČNÍ TECHNICE ... 35

5.1 BLDC motory ... 35
5.2 Prstencové motory ... 36
5.3 Krokové motory ... 37
5.4 Lineární motory ... 38

6 ZÁKLADY ŘÍZENÍ A REGULACE ... 40

6.1 Řízení ... 40
6.2 Ovládání ... 41
6.3 Regulace ... 42
6.3.1 Regulační obvody ... 42
6.3.2 Regulátory ... 43
6.3.3 Kvalita regulace ... 46

7 ZÁVĚR 47

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 49

9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK 53

9.1 Seznam zkratek 53

9.2 Seznam symbolů 53

9.3 Seznam obrázků 54

1 ÚVOD

Elektrické pohony jsou často používané pohony ve strojírenství, prochází neustálým vývojem, jak po stránce teoretické, tak i praktické.

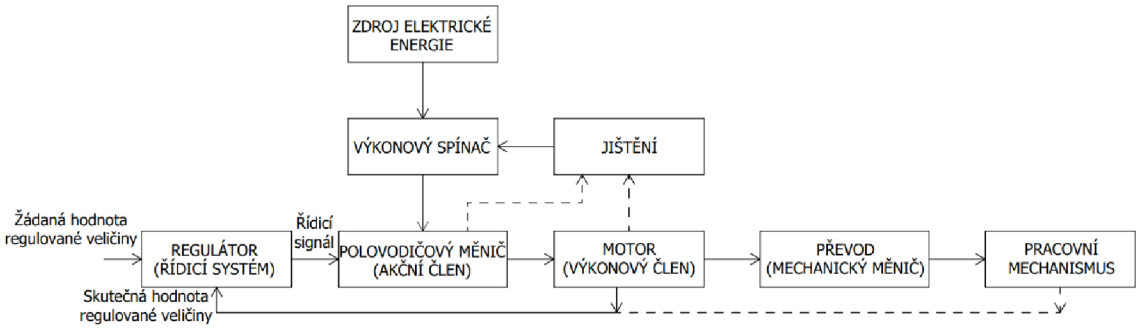
Předkládaná práce je dle zadání prací rešeršního charakteru. Jedná se tedy o souhrn základních informací týkajících se elektrických pohonů. Z tohoto důvodu je třeba věnovat pozornost definici elektrického pohonu. Určitě je nutné zmínit vývoj této definice. Na základě rozvoje znalostí z oblasti elektrických strojů je důležité popsat základní vlastnosti těchto strojů, které nachází využití v technické praxi. Podle zadání je třeba se rovněž zaměřit na základy elektrických strojů používaných v automatizační technice. S tímto souvisí nutnost pojednat o základech regulace elektrických pohonů, která se stále více uplatňuje v technické praxi.

Výše uvedenému odpovídá i zvolený obsah práce. Zpracování práce bude vycházet z dostupné literatury.

2 DEFINICE, JEJÍ VÝVOJ A BLOKOVÉ SCHÉMA ELEKTRICKÝCH POHONŮ

2.1 Definice a blokové schéma elektrického pohonu

Elektrické pohony jsou v dnešní době definovány většinou jako soustava vytvořená z vhodné kombinace elektrotechnických zařízení pro elektromechanickou přeměnu energie a pro vytváření, přenos a zpracování signálů řídících tuto elektromechanickou přeměnu, jejíž vstupní signály jsou určeny obsluhou nebo nadřazeným řídicím, regulačním nebo automatizačním členem a jejíž výstupní veličiny jsou parametry mechanického pohybu. [1]



Obrázek 1 Blokové schéma elektrického pohonu

Elektrický pohon obsahuje členy pro přeměnu a přenos energie, těmi jsou výkonový člen (elektrický motor), akční člen (polovodičový měnič) a mechanický převod, a členy pro řízení, jištění a signalizaci tohoto procesu, tedy regulátor (řídicí systém) a spínací a jistící přístroje, všechny tyto prvky lze vidět na obrázku výše.

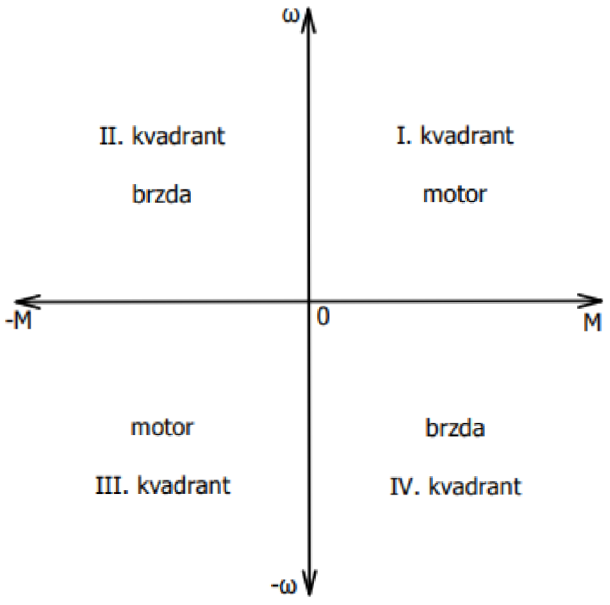
2.2 Vývoj definice elektrického pohonu

Pojem elektrický pohon byl v minulosti definován normou ČSN 34 5170 z 27.12.1965, která byla 1.5.1978 nahrazena normou se stejným označením (ČSN 34 5170), jež platila až do 1.2.2003, kdy byla bez náhrady zrušena. Norma ČSN 34 5170 stanovovala české a slovenské názvy používané v oboru elektrických pohonů a jejich definice. Pojem elektrický pohon byl touto normou definován následovně: Elektrický pohon je zařízení pro elektromechanickou přeměnu energie (včetně řízení této přeměny), které slouží k tomu, aby předepsaným způsobem uvedlo poháněný pracovní mechanismus nebo zpracovávanou látku do požadovaného pohybového stavu [5]. Avšak zrušení platnosti této normy může v budoucnu vést k různým výkladům pojmu „Elektrický pohon“.

2.3 Rozdělení elektrických pohonů

Elektrické pohony lze rozdělit [1]:

- Podle způsobu přenosu mechanické energie na pracovní mechanismus
  - Točivé
  - Netočivé
- Podle stupně řiditelnosti
  - Jednorychlostní
  - Dvourychlostní
  - Vícerychlostní
  - S plynule nastavitelnou rychlostí
- Podle počtu pracovních kvadrantů (Obrázek 2)
  - Jednokvarantové
  - Dvoukvadrantové
  - Čtyřkvadrantové
- Podle funkce
  - Hlavní
  - Vedlejší nebo pomocné
  - Nouzové
  - Záskokové
- Podle způsobu řízení
  - S ručním řízením
  - S logickým řízením
  - Se samočinnou regulací
- Podle druhu použitého motoru
  - S elektrickými motory na stejnosměrný proud
  - S elektrickými motory na střídavý proud



Obrázek 2 Kvadranty M-ω diagramu

3 VLASTNOSTI ELEKTRICKÝCH POHONŮ

3.1 Mechanické vlastnosti elektrických pohonů

Elektrické pohony mají celou řadu kladných vlastností. Elektrické pohony mohou být konstruovány pro širokou škálu výkonů (jednotky mW až stovky MW), točivých momentů (tisíciny Nm až milion Nm) a provozních otáček (od 15 ot/min až po 100 000 ot/min). Elektrické pohony jsou také velmi přizpůsobitelné, lze je konstrukčně provést tak, aby byly schopny pracovat ve vlhkém nebo i mokrém prostředí, lze je upravit i do prostředí prašného nebo výbušného. A lineární elektrické pohony mohou být zase použity v aplikacích s přímočarým pohybem, protože disponují nejvyšší přesností řízení polohy ze všech typů pohonů, a navíc poskytují úplnou kontrolu nad průběhem pohybu. Velkou výhodou elektrických pohonů je také jejich snadná údržba, možnost krátkodobého přetížení, a tedy i dlouhá životnost, také je lze poměrně rychle uvést do provozu, za všechny tyto vlastnosti elektrické pohony vděčí své poměrně jednoduché konstrukci, díky té je snadná také jejich řiditelnost, což snižuje nároky na obsluhu. Symetrická konstrukce rotoru eliminuje vznik vibrací. Jejich další zásadní výhodou je jejich ekologičnost. Elektrické pohony jsou pohony poměrně ekologické, a to díky své vysoké účinnosti, tomu že svým provozem nevytváří škodlivé zplodiny, při jejich provozu také nehrozí únik provozních kapalin a zpravidla ani nebývají moc hlučné, takže okolní prostředí není zatíženo těmito emisemi. Elektrické pohony je možno také zkonstruovat tak, aby pracovaly ve všech čtyřech kvadrantech momentové charakteristiky znázorňující činnost motoru v závislosti na momentu a otáčkách (kvadranty jsou znázorněny na Obrázku 2), to poté umožňuje provádět například tzv. rekuperační brzdění, při kterém je možno získat část elektrické energie zpět, taková mechanická charakteristika se nazývá aktivní.

3.2 Elektrické vlastnosti elektrických pohonů

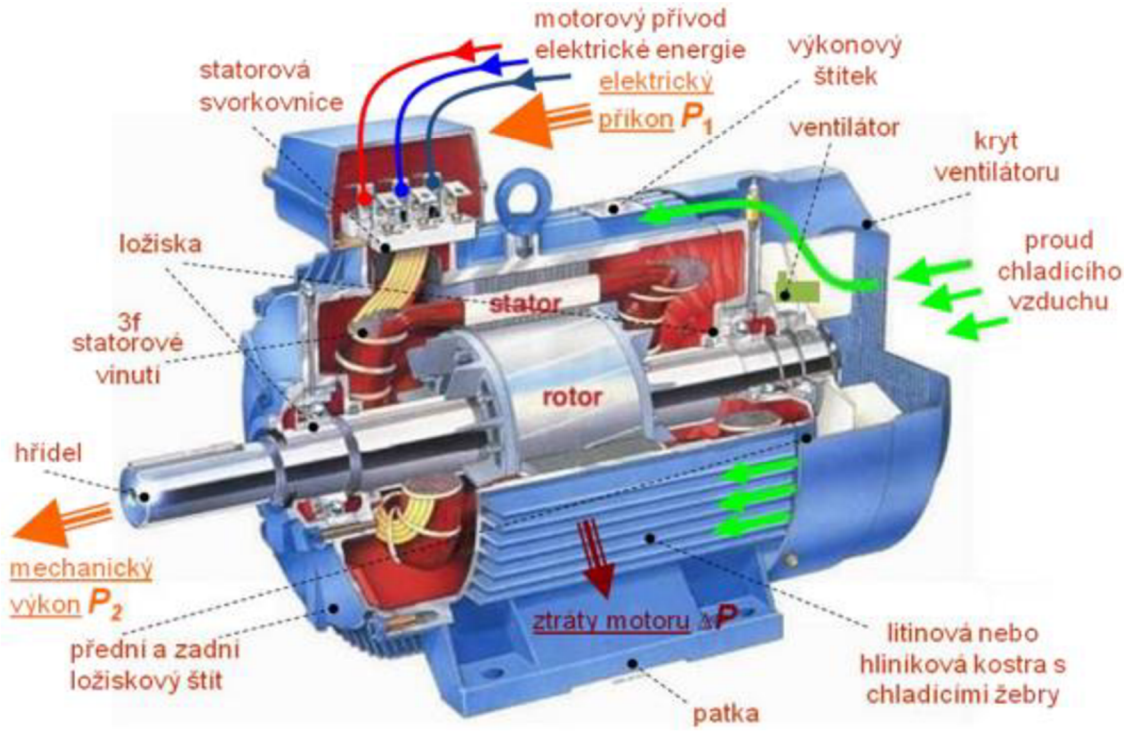
Zásadní negativní vlastností elektrických pohonů je nutnost okamžité dodávky elektrické energie. Přeměna elektrické energie na energii mechanickou s sebou navíc nese také vznik ztrát, ty se projevují zejména jako energie tepelná, takže je nutné u elektrických pohonů zajistit chlazení. I tak jsou však elektrické pohony velmi účinné, jejich účinnost je navíc vyžadována Evropskou komisí. Aktuální požadavky na účinnost elektrických pohonů jsou definovány normou IEC 61800-9-2, jež obsahuje limity pro jednotlivé třídy účinnosti. Elektrické motory musí splňovat třídu účinnosti IE2, výjimkou jsou motory o výkonech 75-200 kW, ty musí od 1.7.2023 spadat do třídy účinnosti IE4, výjimku v tomto případě mají brzdové motory a motory s nevýbušným provedením. Frekvenční měniče používané pro řízení motorů musí splňovat třídu účinnosti IE2. Kompaktní pohony, tzn. motory v konstrukční kombinaci s měničem, mají vlastní třídy účinnosti značené IES. [8]

4 VLASTNOSTI VYBRANÝCH ELEKTRICKÝCH MOTORŮ

4.1 Třífázové asynchronní motory

Asynchronní motory jsou v současné době nejpoužívanějšími elektrickými motory vůbec, a to zejména díky jejich univerzálnosti použití. Tyto motory disponují širokými výkonovými rozsahy. Asynchronní motory bývají spolehlivé, a to zejména díky své poměrně jednoduché konstrukci. Vzhledem k jejich univerzálnosti se zpravidla vyrábí hromadně nebo ve velkých sériích, čímž se snižují náklady na jejich výrobu, a tedy i jejich prodejní cena bývá přívětivá, což opět napomáhá k jejich oblíbenosti u zákazníků. Asynchronní motory se podle konstrukčního provedení rotoru dělí na motory s kotvou nakrátko, s vinutou, nebo také kroužkovou kotvou a speciální. Dělí se také podle druhu napájení na motory třífázové a jednofázové. Jednofázové motory oproti třífázovým motorům disponují menším záběrným momentem a při jejich zatěžování se rychleji zvětšuje skluz.

4.1.1 Třífázový asynchronní motor s kotvou nakrátko



Obrázek 3 Asynchronní motor [47]

Konstrukce asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Asynchronní motor s kotvou nakrátko se skládá ze dvou hlavních částí, statoru a rotoru. Stator je tvořen nosným tělesem, statorovými plechy a statorovým vinutím, jehož konce jsou vyvedeny na svorkovnici. Rotor neboli kotva je tvořena rotorovými plechy a měděnými nebo hliníkovými tyčemi (hliníkové slitiny se používají za účelem

zvýšení impedance rotoru, což má za následek zmenšení fázového posunu mezi magnetickým polem statoru a proudem v rotoru a snížení rozběhového proudu) umístěnými v drážkách rotorových plechů. Vodivé tyče jsou na čelních stranách svazku rotorových plechů pomocí zkratovacích kroužků spojeny nakrátko, tím dojde k vytvoření konstrukce podobné kleci, proto je tento typ rotoru také nazýván klecový. Aby se zabránilo ztrátám způsobeným vířivými proudy, skládá se rotor i stator z jednostranně izolovaných elektroplechů. Zároveň s cílem co nejvíce zmenšit ztráty při provozu motorů se rotory konstruují jako tzv. hlubokodrážkové, ovšem tato konstrukce způsobuje větší odpor při spouštění motoru.

Princip činnosti asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Přivedením napětí na vinutí statoru dojde k vytvoření točivého magnetického pole, následkem toho dojde v rotoru k indukci napětí a rotorem začne protékat proud. Proud indukovaný v rotoru vytvoří vlastní magnetické pole, které interakcí s točivým magnetickým polem statoru způsobí roztočení rotoru, ten se podle Lenzova pravidla začne otáčet stejným směrem jako je směr otáčení točivého pole vyvolaného statorovým vinutím. Otáčky rotoru jsou však oproti otáčkám točivého pole zpožděné, tomuto rozdílu mezi otáčkami točivého pole a otáčkami rotoru se říká skluz. Skluz má přímý vliv na velikost točivého momentu rotoru a klesá s rostoucí zátěží motoru. Pokud by skluz byl nulový, tedy otáčky rotoru by se rovnaly otáčkám točivého pole, nedošlo by k indukci napětí na vodičích rotoru a tím pádem by byl nulový i točivý moment. Skluz má většinou hodnotu tří až osmi procent jmenovitých otáček motoru [4].

4.1.2 Spouštění asynchronních motorů s kotvou nakrátko

Asynchronní motory s kotvou nakrátko lze spouštět různými způsoby, mezi ně např. patří:

- Spouštění přímým připojením k elektrické síti
- Spouštění sníženým napětím na statoru
  - Statorový spouštěč
  - Autotransformátor
  - Přepínač hvězda - trojúhelník
- Soft start

Spouštění přímým připojením k elektrické síti

Jedná se o nejlevnější a nejjednodušší způsob spouštění asynchronních motorů, jelikož k jeho realizaci není nutné použití dalšího zařízení. Záběrný proud motoru je při spouštění tímto způsobem omezen pouze impedancí energetické sítě a samotného motoru. Při spouštění asynchronního motoru je hodnota záběrného proudu 3 až 8krát vyšší než hodnota proudu jmenovitého [1]. I při poměrně malém záběrném momentu tak v energetické síti vznikají velké proudové rázy. Spouštění přímým připojením k síti je tak nejběžnějším způsobem spouštění motorů do výkonu cca 5 kW v sítích nn [1]. Pro motory s výkony nad 5,2 kVA je již vyžadováno spouštění s omezením záběrného momentu [4].

Spouštění sníženým napětím

U asynchronních motorů se záběrný proud mění přímo úměrně s napětím a záběrný moment se mění s jeho čtvercem. Spouštění motoru sníženým napětím je tedy možno použít tam, kde není problémem pokles záběrného momentu. Samotné snížení napětí je možno provést:

- Statorovým spouštěčem
- Autotransformátorem
- Přepínačem hvězda – trojúhelník

Statorový spouštěč – souměrná impedance na statoru

Pro tento způsob rozběhu se do obvodu statoru přidává impedance. Pro motory menších výkonů se do obvodu přidávají rezistory, které se předřadí do obvodu statorového vinutí, rezistory mohou být zařazeny i až za ono vinutí, ovšem v tomto případě musí být svorkovnice zapojena do hvězdy (tento způsob spouštění se nazývá hvězdové spouštění), protože přidání činných odporů má za následek zvětšení tepelných ztrát, tak pro motory větších výkonů se do obvodu místo rezistorů předřazují tlumivky (cívky), ty však zhoršují účiník v síti. Častěji se používá tzv. statorový spouštěč (nebo také spouštěcí reaktor), jehož použitím se lze zbavit ztrát jež vznikají přidáním impedance do vinutí.

Autotransformátor

Jedná se o poměrně nákladný způsob rozběhu, využívá se ke spouštění klecových motorů o velkých výkonech. Samotný autotransformátor je navržen tak, aby vydržel pouze zatížení po dobu, jež je potřebná k rozběhu motoru. Při tomto způsobu rozběhu snižujeme autotransformátorem proud v síti. Ono snížení proudu je závislé na čtverci převodu transformátoru a také na snížení napětí na motoru. Snížení proudu v síti také způsobí pokles momentu na motoru.

Přepínač hvězda – trojúhelník

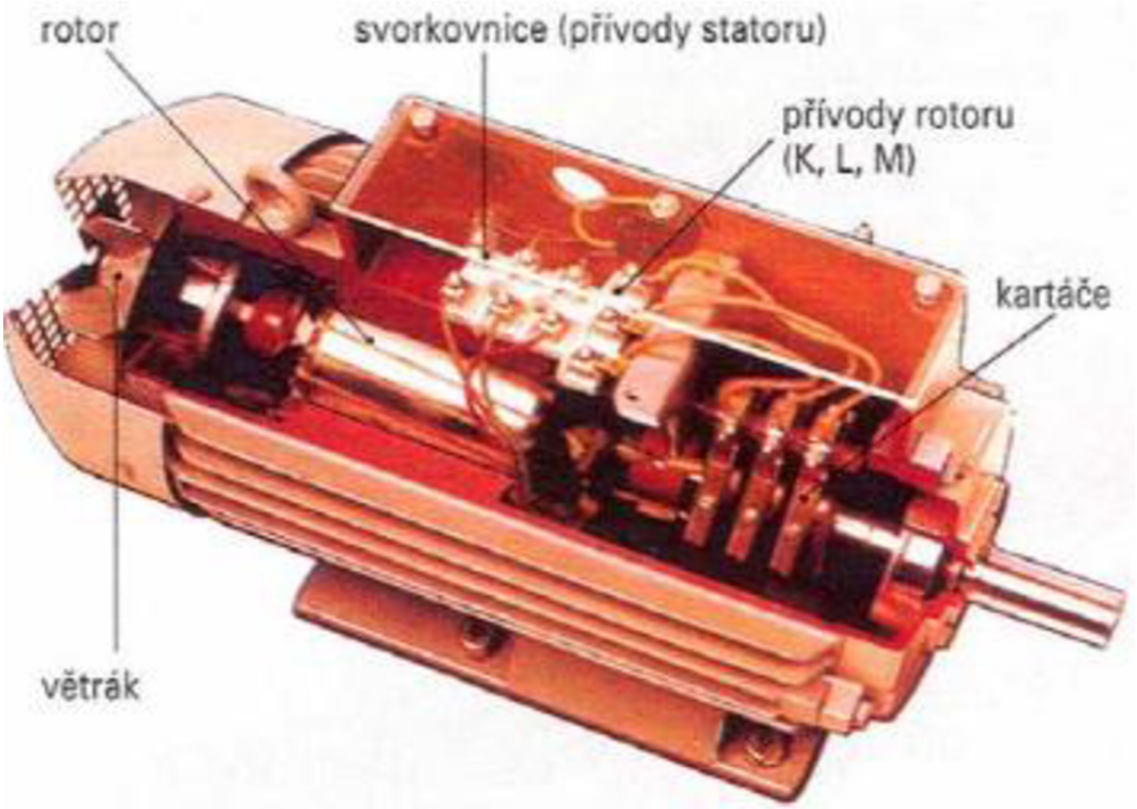
Spouštění pomocí přepínače hvězda – trojúhelník se používá u motorů menších výkonů připojených do energetických sítí nízkého napětí. Při dlouhodobém chodu motoru je jeho statorové vinutí zapojeno do trojúhelníku. Pro spuštění motoru je však výhodnější použít zapojení do hvězdy. Protože při zapojení statorového vinutí do hvězdy je síťový proud oproti zapojení do trojúhelníku třikrát menší. Tím lze tedy významně zmenšit vliv motoru, při jeho spouštění, na proud v síti. Při zapojení do hvězdy je však třikrát menší i velikost záběrného momentu, a proto je po rozběhnutí motoru potřeba přepnout zapojení svorkovnice zpět na zapojení do trojúhelníku. Při přepínání zapojení statorového vinutí by mohlo dojít k zániku magnetického pole a kvůli tomu by poté při sepnutí došlo k proudovému nárazu. Tomuto se předchází použitím odporových mezistupňů, které při nabuzení motoru udržují ve vinutí napětí.

Soft start - elektronický spouštěč

Elektronický spouštěč je třífázový tyristorový spínaný spouštěč sloužící ke změně napětí. Skládá z antiparalelně zapojených tyristorů, kdy je na každé fázi antiparalelně zapojena dvojice tyristorů. Tyristory jsou spínány fázově při pevném kmitočtu. Díky spínání lze

dosáhnout plynulého řízení a plynulé regulaci odebíraného výkonu a velikosti točivého momentu.

4.1.3 Třífázový asynchronní motor s kroužkovou kotvou



Obrázek 4 Asynchronní motor s kroužkovou kotvou [4]

Konstrukce asynchronního motoru s kroužkovou kotvou

Asynchronní motor s kroužkovou kotvou má shodnou konstrukci statoru s asynchronním motorem s kotvou nakrátko, tyto motory se tedy liší pouze v konstrukci rotorů. Rotor asynchronního motoru s kroužkovou kotvou je tvořen rotorovými plechy a třífázovým vinutím umístěným v drážkách těchto plechů. Vinutí bývá zpravidla zapojeno do hvězdy a je spojeno se třemi sběracími kroužky, ono spojení mezi sběracími kroužky a vinutím rotoru je zprostředkováno pomocí přítlačných uhlíkových kartáčů, přes něž lze do obvodu vinutí rotoru přidat rezistory, které usnadní rozběh motoru a zároveň mohou sloužit k regulaci otáček, tento způsob regulace otáček je však velmi neefektivní u motorů vyšších výkonů.

Princip činnosti asynchronního motoru s kroužkovou kotvou

Princip činnosti asynchronního motoru s kroužkovou kotvou je totožný s principem činnosti asynchronního motoru s kotvou nakrátko, jelikož se jedná pouze o konstrukční úpravu tohoto asynchronního motoru.

4.1.4 Spouštění asynchronních motorů s kroužkovou kotvou

Asynchronní motory s kroužkovou kotvou se spouští tzv. rotorovým spouštěním. Tento typ spouštění se používá k omezení záběrného proudu, nebo ke zvětšení akceleračního

momentu při rozbíhání. Zvětšení impedance v rotoru lze dosáhnout přidáním prvků zvětšujících činný odpor nebo impedanci, popřípadě jejich paralelní kombinací do rotorového obvodu. Omezení záběrného proudu pomocí reaktance v rotoru funguje na principu, kterého je využito při omezování záběrného proudu pomocí reaktance ve statoru, tento princip byl popsán v odstavci o statorovém spouštěči (kapitola 4.1.2). Jelikož je využito stejného principu přenáší se i nevýhody tohoto řešení, a proto se omezování záběrného proudu přidáním impedance do obvodu rotoru nepoužívá. U motorů větších výkonů se však používá tzv. kapalinový spouštěč, který ke změně odporu v rotorovém obvodu využívá velikost plochy ponořených desek, ty jsou ponořeny do vody s příměsí sody, ta se přidává ke zvýšení její vodivosti.

4.1.5 Řízení otáček třífázových asynchronních motorů

Rychlost otáčení rotorů asynchronních motorů lze řídit následujícími způsoby:

- Změnou statorového napětí
- Změnou počtu pólpárů
- Změnou skluzu
- Změnou frekvence

Řízení rychlosti změnou statorového napětí
Snížením napětí dojde k poklesu otáček na hodnotu, při které nastane rovnováha mezi zátěžným momentem a momentem motoru. [6]

Řízení rychlosti změnou počtu pólpárů
Tento způsob řízení lze využít pouze u motorů s kotvou nakrátko. U motorů s kotvou kroužkovou by totiž bylo nutné počet pólů měnit i na rotoru stroje, a to by bylo velmi složité. Různého počtu pólů lze docílit rozdělením jednoho statorového vinutí na více větví, z důvodu jednoduchosti nejčastěji 2. Druhou možností docílení různého počtu pólů je přepínáním několika samostatných statorových vinutí, která jsou umístěna společně v sérii v drážkách statoru. K vytvoření různých počtů pólů lze využít i kombinaci obou způsobů.

Řízení rychlosti změnou skluzu
Řízení rychlosti tímto způsobem je možno provádět jen u motorů s kroužkovou kotvou. Snížení otáček motoru se docílí připojením rezistoru do obvodu rotoru, tím dojde ke zvětšení skluzu a pokud nedojde ke změně záběrného momentu začnou se otáčky snižovat. Brzdný účinek lze zvýšit vytvořením protimomentu. Veškerá skluzová energie je poté přeměněna v rezistoru na energii tepelnou. Jedná se tedy o poměrně jednoduchý, ale velmi neekonomický způsob řízení otáček. Druhým způsobem řízení rychlosti skluzem je regulace protiproudem. Ta tkví v přivedení protiproudu do obvodu rotoru. Výhodou tohoto způsobu řízení je ekonomičnost, jelikož se skluzová energie netransformuje na tepelnou, ale je dodávána zpět do sítě, více v kapitole 4.1.6 – Brzdění asynchronních motorů. [6]

Řízení rychlosti změnou frekvence

V současné době jde o nejdokonalejší, nejekonomičtější a zároveň nejpoužívanější způsob bezkontaktního řízení rychlosti. Tento způsob řízení vyžaduje frekvenční statický polovodičový měnič. Mimo změnu frekvence je nutno měnit také statorové napětí. Při snižování frekvence by totiž bez změny velikosti napájecího napětí docházelo k vzrůstu magnetického toku, což by mělo za následek přehřívání motoru.

4.1.6 Brzdění asynchronních motorů

Elektrické pohony s třífázovými asynchronními motory disponují dvěma způsoby brzdění, brzděním mechanickým a elektrickým. Elektrické brzdění se dále rozděluje, podle použitého principu na brzdění protiproudem, brzdění stejnosměrným proudem a rekuperační brzdění, známé také jako brzdění generátorové.

Mechanické brzdění

Existují dva typy brzdicích systémů pro mechanické brzdění, oba však k brzdění využívají třecí odpor, proto jsou také nazývaný brzdami třecími. Prvním typem jsou brzdy čelisťové, ty se sestávají z čelistí a brzdového kotouče (disku). Při brzdění jsou čelisti přitlačeny k brzdovému kotouči a tím je vyvoláno tření, které způsobí zpomalení otáčení. Druhým typem jsou brzdy bubnové (lamelové). Při mechanickém brzdění dochází ke vzniku tepla (mechanická energie je přeměňována na tepelnou) a jedná se tedy o tzv. ztrátové brzdění. Jelikož se nejedná o brzdění motorem, ale externím brzdicím systémem, nedochází při tomto typu brzdění k zatěžování vinutí motoru teplem. Mechanické brzdy jsou u elektrických pohonů zpravidla drženy v poloze zabrzděné pomocí pružin, v odbrzděné poloze jsou poté drženy elektromagnetem. Důvod tohoto provedení je čistě bezpečnostní, pokud by došlo k výpadku elektrické energie, pohon buď zůstane v režimu brzdění nebo brzdit začne.

Elektrické brzdění

Funguje na principu Lenzova pravidla, indukci elektrického proudu ve vodiči pohybujícím se v magnetickém poli. Zásadní nevýhodou tohoto způsobu brzdění tedy je, že s klesajícími otáčkami klesá i brzdný moment, protože čím je otáčení tělesa v magnetickém poli pomalejší tím méně proudu se v něm indukuje.

Brzdění protiproudem

Jde o brzdění pomocí skluzu, pokud skluz přesáhne hodnotu 100 % mechanický výkon motoru je záporný a motor se dostane do II. nebo IV. kvadrantu (Obr. 2 Kvadranty M-ω diagramu na straně 18). Skluzu většího než 100 % dosáhneme přepólováním (reverzací) motoru. Při přepólovaní však dojde na kotvě k indukci velkých proudů a vinutí se začne velmi zahřívat. Při dosažení nulových otáček musí být motor odpojen od elektrické energie jinak dojde k jeho roztočení v opačném směru. Ke zjištění momentu zastavení motoru, kdy je potřeba provést odpojení motoru od elektrické energie, slouží snímač nulových otáček, který se umisťuje na hřídel. Brzdění při aktivní zátěži lze tímto způsobem provádět pouze u motorů s kroužkovou kotvou.

Brzdění stejnosměrným proudem
K dosažení brzdného účinku je využito stojícího magnetického pole. K jeho vytvoření je nutné odpojit motor od střídavého zdroje energie a poté motor připojit ke zdroji stejnosměrnému. Tím dojde k vytvoření stojícího magnetického pole a v pohybujícím se vinutí rotoru se začne indukovat proud vytvářející brzdný moment. Výhodou tohoto způsobu brzdění je schopnost brzdit až k téměř nulovým otáčkám. Nevýhodou je nerovnoměrné tepelné zatěžování jednotlivých fází.

Rekuperační brzdění
Jedná se o tzv. nadsynchronní brzdění, protože motor je brzděným mechanizmem roztáčen na nadsynchronní otáčky. Skluz je tedy menší než 0 a motor pracuje v generátorickém režimu. Dochází tak ke změně mechanické energie na energii elektrickou. Tento způsob se využívá zejména při spouštění břemen. Tímto způsobem brzdění nelze dosáhnout nulových otáček, proto je potřeba použít mechanickou brzdu na dobrzdění.

4.2 Jednofázové asynchronní motory

4.2.1 Jednofázový indukční motor

Konstrukce jednofázového indukčního motoru
Stator se skládá ze statorových plechů a dvojího vinutí, hlavního a pomocného. Hlavní vinutí vyplňuje dvě třetiny drážek statoru, zbylá jedna třetina je pak vyplněna o 90° pootočeným vinutím pomocným se zvýšenou indukčností (lze také použít vinutí bez zvýšené indukčnosti a zvýšit impedanci obvodu tohoto vinutí pomocí rezistoru či kondenzátoru. Rotor je klecového provedení.

Princip činnosti jednofázového indukčního motoru
Po připojení k elektrické síti začne statorovým vinutím protékat střídavý proud. Průtokem tohoto proudu jednofázovým statorovým vinutím dojde ke vzniku střídavého magnetického toku, rotor zůstává v klidu a indukuje se v něm transformační proud, ten vytvoří magnetický tok opačného směru. Tyto dva magnetické toky jsou vůči sobě posunuty o 180° takže k vytvoření mechanického momentu nedojde, motor není schopen samostatného rozběhu. Mechanickým roztočením rotoru (v libovolném směru) však dojde k vytvoření pohybového napětí na rotoru. Toto napětí v součtu s transformátorovým napětím způsobí zmenšení fázového posunu mezi magnetickými poli statoru a rotoru na hodnotu menší než 180° a dojde k vytvoření točivého momentu. Aby byl motor schopen samostatného rozběhu je nutno použít pomocné vinutí s rezistorem, tlumivkou nebo kondenzátorem.

Spouštění jednofázového asynchronního motoru
Po připojení k elektrické síti začne hlavním i pomocným vinutím téct proud, ovšem kvůli vyšší indukčnosti obvodu pomocného vinutí dojde k fázovému posunu těchto dvou proudů, takže magnetická pole vytvořená jednotlivými vinutími jsou vzájemně časově

posunuta a současně jsou posunuta i prostorově, to je zajištěno pootočením pomocného vinutí. Tím dojde k vytvoření dvou vzájemně se ovlivňujících střídavých magnetických polí a roztočení rotoru.

4.2.2 Jednofázový asynchronní motor s pomocným vinutím

Konstrukce asynchronních motorů s pomocným odporovým vinutím
Stator obsahuje dvě vinutí, hlavní a pomocné. Pomocné fázi se předřadí rezistor, činný odpor lze také vytvořit použitím odporového drátu. Pomocné vinutí má provedení zdvojeného protisměrného neboli bifilárního vinutí. Pomocné vinutí je tvořeno odporovým drátem z toho důvodu, aby při přímém připojení k síti mělo oproti vinutí hlavnímu fázový posun o velikosti 90°, to je potřeba pro vytvoření točivého magnetického pole. Pomocné vinutí se zpravidla provádí jako bifilární z toho důvodu, že při tomto provedení je snížena indukčnost, protože magnetická pole vytvořená oběma vodiči se vzájemně ruší.

Princip činnosti asynchronních motorů s pomocným odporovým vinutím
Tento typ motoru funguje na stejném principu jako jednofázový indukční motor, jelikož se jedná pouze o jeho konstrukční úpravu.

Spouštění asynchronních motorů s pomocným odporovým vinutím
Po připojení k elektrické síti způsobí fázový posun mezi proudy protékajícími hlavním a pomocným vinutím vznik točivého magnetického pole, čímž dojde k roztočení rotoru. Po spuštění motoru se pomocné vinutí odpojí, aby nedošlo k přehřátí motoru. K tomuto odpojení pomocného vinutí je využíváno odstředivého vypínače.

4.2.3 Jednofázový asynchronní motor s rozběhovým a provozním kondenzátorem

Konstrukce asynchronního motoru s rozběhovým a pomocným kondenzátorem
Fázový posun v pomocné fázi je vytvořen kondenzátorem připevněným na krytu motoru, proto se tyto motory nazývají kondenzátorové.

Princip činnosti asynchronního motoru s rozběhovým a pomocným kondenzátorem
Tento typ motoru funguje na stejném principu jako jednofázový indukční motor, jelikož se jedná pouze o jeho konstrukční úpravu.

Spouštění asynchronních motorů s rozběhovým a pomocným kondenzátorem
Tyto motory se spouští za pomoci kondenzátoru, který se po roztočení motoru odpojí. Rozběh pomocí kondenzátoru se provádí buď pomocí rozběhového nebo provozního kondenzátoru. Použitím obou těchto kondenzátorů může být rozběhový moment vzhledem k jejich kapacitě zvětšen až na trojnásobek jmenovitého momentu, díky tomu lze rozbíhat i zatížený motor. Po rozběhnutí motoru je rozběhový kondenzátor odpojen, aby nedošlo k přehřátí pomocného vinutí.

4.2.4 Jednofázový asynchronní motor se stíněným pólem

Konstrukce asynchronního motoru se stíněným pólem

Stator jednofázového asynchronního motoru se stíněným pólem má dva póly, které jsou vzájemně odděleny drážkou. Menší z těchto pólů se nazývá odstíněný a je na něm uloženo vinutí nakrátko.

Princip činnosti asynchronního motoru se stíněným pólem

Po připojení k elektrické síti začnou statorovým vinutím a vinutím nakrátko protékat proudy, které jsou vzájemně fázově posunuty. Tím dojde ke vzniku magnetického pole, jehož póly se posouvají od hlavních pólů statoru k vedlejším statorovým pólům, tímto je zajištěno otáčení rotoru.

Spouštění asynchronních motorů se stíněným pólem

Jednofázový asynchronní motor se stíněným pólem se spouští přímým zapojením k jednofázové síti. Po připojení motoru k síti začne statorové vinutí generovat magnetické pole, skrz nějž se v závitu nakrátko začne indukovat napětí, tím dojde k narušení rovnováhy sil a dojde k roztočení rotoru.

Řízení jednofázových asynchronních motorů [18]

Regulaci otáček jednofázových asynchronních motorů lze provádět:

- Změnou frekvence napájecího napětí
- Změnou amplitudy napájecího napětí

Řízení otáček změnou frekvence napájecího napětí

Probíhá stejným způsobem jako u motorů třífázových a nese s sebou tedy stejné nevýhody. K realizaci tohoto způsobu řízení je opět potřeba měnič frekvence, v tomto případě jednofázový. Největší nevýhodou tohoto řízení je, že regulace otáček je možná pouze v rozsahu 50-110 %.

Řízení otáček změnou amplitudy napájecího napětí

Změnou amplitudy se docílí změny skluzu, jedná se tedy vlastně o řízení změnou skluzu. Jelikož se jedná o regulaci skluzem je potřeba, aby byl řízený motor zatížen momentem výrazně závislým na otáčkách. Snížením napětí dojde ke snížení proudu protékajícího vinutím statoru a k poklesu momentu, s momentem poté klesnou i otáčky.

Brzdění jednofázových asynchronních motorů

Brzdění jednofázových asynchronních motorů se provádí stejnými způsoby, které jsou využity pro brzdění asynchronních motorů třífázových. Tyto způsoby jsou popsány v kapitole Brzdění asynchronních motorů (4.1.5).

4.3 Synchronní motory

Synchronní stroje začínaly jako generátory pro výrobu střídavé elektrické energie. Jako motory se synchronní stroje začaly používat až ve čtyřicátých letech dvacátého století, kdy se podařilo vyřešit problémy s jejich spouštěním. V dnešní době nacházejí synchronní motory uplatnění v pohonech velkých výkonů, které pracují při konstantní rychlosti, s téměř neproměnným zatížením a nevyžadují časté spouštění, proto se používají zejména pro pohon čerpadel, kompresorů nebo ventilátorů. Díky tyristorovým měničům se synchronní motory také používají v regulačních pohonech.

Spouštění synchronních motorů
Synchronní motory nelze kvůli jejich konstrukci rozběhnout z klidu přímo do synchronního běhu. Proto se synchronní motory spouští jako motory asynchronní, a to na otáčky blízké synchronním, poté se provede synchronizace.

Spouštění asynchronním rozběhem s přímým připojením k síti
Jedná se o nejvíce používaný způsob rozběhu. Na rotoru synchronního motoru se kromě budicího vinutí nachází i vinutí zkratové, jež při rozběhu motoru vytváří asynchronní moment a rozbíhá motor až do ustálené rychlosti. Konstrukce tzv. rozběhového vinutí se u rotorů synchronních motorů liší od té u asynchronních motorů tím, že u synchronních motorů není ono vinutí po obvodu rotoru rozmístěno rovnoměrně, což má za následek, že asynchronní moment, který vinutí generuje má kromě střední hodnoty i střídavou složku. Při tomto typu spouštění musí být budicí vinutí zkratováno nebo připojeno na tzv. spouštěcí odpor. Pokud by budicí vinutí zůstalo rozepnuto, mohlo by na jeho vývodech vzniknout nebezpečně vysoké napětí a mohlo by dojít přeskoku nebo k průrazu izolace. Při zkratovém zapojení budicího vinutí může dojít k poklesu momentu, což může vést ke zhoršení podmínek pro synchronizaci. Kromě tohoto způsobu asynchronního rozběhu lze také použít způsoby rozběhů, jež byly popsány v kapitole o asynchronních motorech, a to asynchronní rozběh se zvětšenou impedancí ve statorovém vinutí a asynchronní rozběh rozběhovým transformátorem.

Rozběh pomocí rozběhového motoru
Na společné hřídeli je připojen samostatný asynchronní kroužkový motor, ten má, aby bylo zajištěno dosažení synchronních otáček, o jednu pólovou dvojici méně než rozbíhaný synchronní motor. Tento způsob spouštění je vhodný pouze pro spouštění naprázdno.

Frekvenční rozběh
Zdrojem proměnné frekvence bývá zpravidla tyristorový frekvenční měnič s proudovým vyjádřeným meziobvodem sloužící k plynulé změně frekvence. Lze však použít i synchronní generátor.

Synchronizace

Jedná se o přechodný děj mezi stavem s otáčkami blízkými synchronním a synchronním chodem. Existují dva způsoby synchronizace: synchronizace po asynchronním rozběhu a synchronizace po ostatních způsobech rozběhu.

Synchronizace po asynchronním rozběhu

Při tomto typu synchronizace je statorové vinutí připojeno k síti a generuje točivé magnetické pole, v němž se se skluzem v řádu jednotek procent otáčí rotor, jehož vinutí je zapojeno do zkratu nebo připojeno přes spouštěcí odpor. Průběh synchronizace se liší podle velikosti zátěžného momentu.

Jestliže zátěžný moment je menší než reluktanční moment, k synchronizaci dojde tímto momentem.

Jestliže je zátěžný moment větší než reluktanční moment, ale zároveň menší, než kritický moment dojde k tzv. krátkodobé synchronizaci. Ke krátkodobé synchronizaci dochází kvůli rozdílu mezi statickou a dynamickou mezí stability. Při krátkodobé synchronizaci se rotor sesynchronizuje, avšak následně je ze svého nově nabytého synchronního stavu vytažen, dojde k prokluzu o jeden pól a děj se opakuje. Pokud dojde k nabuzení vinutí ve chvíli, kdy je rotor ve správné poloze rotor již v synchronním chodu zůstane, pokud k onomu nabuzení dojde ve chvíli, kdy je rotor v poloze přesně opačné, dojde k prokluzu o jeden pól a následně dojde k synchronizaci.

Jestliže je zátěžný moment větší než reluktanční i kritický moment ke krátkodobé synchronizaci nedojde a synchronizace nastává až po nabuzení vinutí. Velikost budicího proudu je definována velikostí synchronního momentu, jež urychlí rotor do synchronního chodu. Potřebnou velikost budicího proudu lze snížit zmenšením zátěžného momentu.

Krátkodobé synchronizace lze však dosáhnout i bez ohledu na velikost zátěžného momentu, a to zařazením diody do budicího vinutí.

Synchronizace po jiném rozběhu než asynchronním

Při tomto způsobu synchronizace je rotorové vinutí odpojeno od elektrické sítě a nabuzeno je pomocí budicího zdroje, díky tomu dochází k tzv. přesné synchronizaci, kdy je na motor přivedeno stejné napětí a stejný sled fází jako je v energetické síti, aby motor dosáhl téměř shodné úhlové rychlosti a shodné polohy fázoru napětí jako je v síti. Poté se sepne síťový spínač a dojde k připojení motoru k síti.

Řízení synchronních motorů

Řízení otáček synchronních strojů je realizováno pomocí polovodičových měničů frekvence. Přepínání počtu pólů pro řízení otáček se u synchronních strojů nepoužívá. [19]

Brzdění synchronních motorů

Provádí se stejně jako u motorů asynchronních, způsoby brzdění asynchronních motorů jsou popsány v kapitole Brzdění třífázových asynchronních motorů (4.1.5).

4.3.1 Synchronní motor s hladkým rotorem

Konstrukce synchronního motoru s hladkým rotorem

Stator synchronního motoru s hladkým rotorem má konstrukci shodnou se statorem asynchronních motorů. Konstrukční rozdíly se tedy týkají rotoru. Ten je v tomto případě konstruován jako ocelový válec s podélnými drážkami po obvodu, v nichž se nachází budicí vinutí, to je přes sběrné kroužky napájeno stejnosměrným proudem. V podstatě se tedy jedná o elektromagnet, který má stejný počet pólů jako stator.

Princip činnosti synchronního motoru s hladkým rotorem

Po připojení k elektrické síti dojde ke vzniku točivého magnetického pole, jehož otáčky jsou definovány frekvencí v síti a počtem pólů. Póly rotoru jsou přitahovány opačnými póly statoru a současně odpuzovány těmi shodnými. Motor se od počátku netočí synchronně s magnetickým polem, k tomu je potřeba provést synchronizaci, po jejím provedení již motor pracuje v synchronních otáčkách.

4.3.2 Synchronní motor s vyniklými póly

Konstrukce synchronního motoru s vyniklými póly

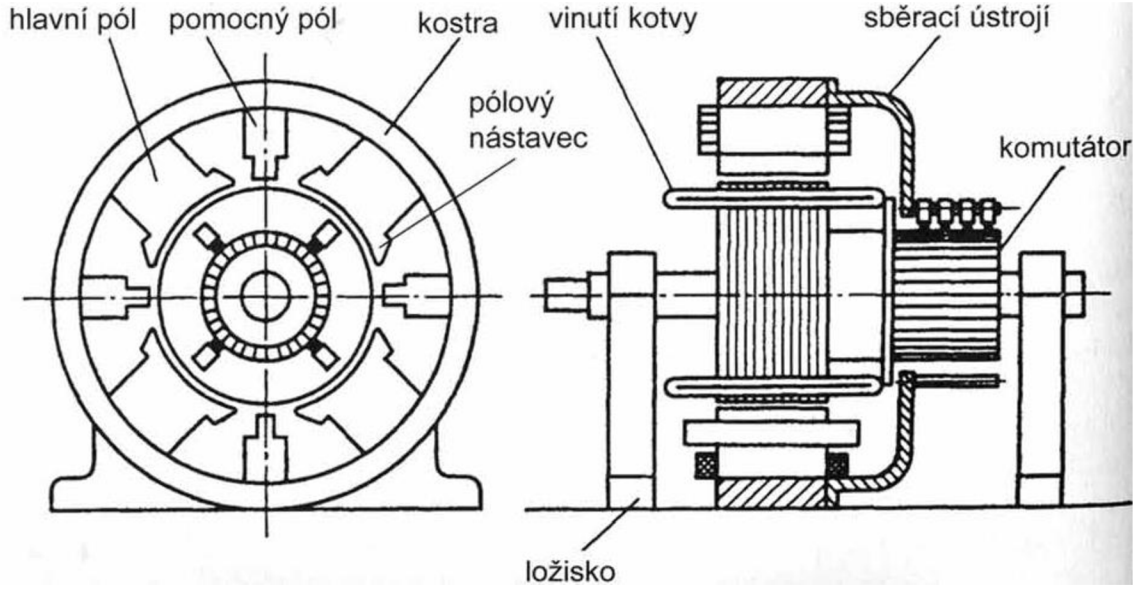
Stator synchronního motoru s vyjádřenými neboli vyniklými póly má konstrukci shodnou se statorem synchronního motoru s hladkým rotorem. Konstrukční úprava se týká pouze rotoru, který se v tomto případě sestává z hřídele s magnetovým kolem, ke kterému jsou připevněny póly, na nichž se nachází budicí vinutí s pólovými nástavci. Vinutí jsou zapojena do série a jsou spojena s kroužky, na něž dosedají kartáče, přes které je přiváděn budicí proud.

Princip činnosti synchronního motoru s vyniklými póly

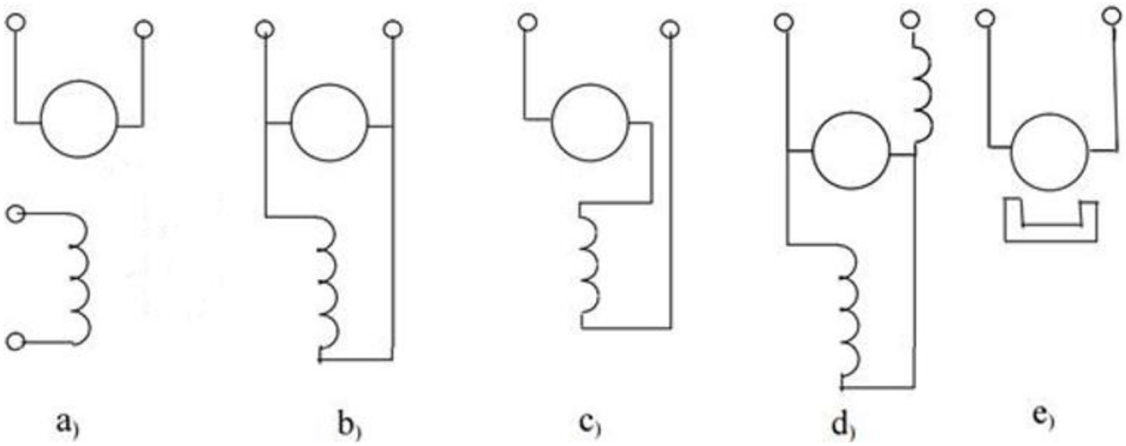
Princip činnosti je shodný jako u synchronního motoru s vyniklými póly, jelikož se jedná pouze o jiné konstrukční provedení.

4.4 Stejnosměrné motory

Stejnosměrné motory se v současné době používají především v regulačních pohonech, protože disponují snadnou změnou směru otáčení, snadným řízením rychlosti a velkým rozsahem otáček a výkonů. Vzhledem k tomu mají široký rozsah použití a používají se například v automobilovém, výrobním nebo lodním průmyslu.



Obrázek 5 Stejnosměrný motor [48]



Obrázek 6 Způsoby zapojení budicího vinutí [49]

Na obrázku Obrázku 6 jsou vyobrazeny možné způsoby zapojení budicích vinutí stejnosměrných motorů. První schéma zapojení (v obrázku označen symbolem a) vyobrazuje zapojení obvodu tzv. cizího buzení. Buzení je nazýváno cizí, protože je nezávislé na obvodu motoru. Připojením budicího vinutí do obvodu podle schématu označeného písmenem b, tedy paralelně ke kotvě motoru, vznikne motor s tzv. derivačním buzením. Schéma označené písmenem c vyobrazuje zapojení budicího obvodu do série s obvodem kotvy, proto je tento způsob buzení nazýván buzením sériovým. Schéma označené písmenem d poté znázorňuje kombinaci paralelního a sériového buzení, tento hybridní způsob buzení je nazýván buzení kompaudní. Poslední schéma (označeno písmenem e) zobrazuje buzení permanentním magnetem.

4.4.1 Stejnosměrný komutátorový motor s cizím buzením

Konstrukce stejnosměrného komutátorového motoru s cizím buzením
Stator se skládá z tělesa stroje, to je tvořeno ocelovým prstencovým jádrem a obsahuje vnitřní póly, pólové nástavce a jádra cívek, na nichž je navinuto statorové vinutí. Na statoru se také nahází nosič kartáčů, na němž jsou upevněny držáky uhlíkových kartáčů. Rotor se skládá z ocelového hřídele, rotorových plechů na něm nalisovaných a rotorového vinutí napojeného na komutátor. Komutátor je válec s pláštěm tvořeným lamelami z tvrdé měděné slitiny, jednotlivé lamely jsou od sebe odděleny slídou a jsou k nim připájeny vývody rotorových vinutí.

Princip činnosti stejnosměrného komutátorového motoru s cizím buzením
Po připojení motoru k elektrické síti začne budicím vinutím protékat stejnosměrný proud, ono vinutí vytvoří magnetické pole, jehož tok se uzavře přes jádro kotvy. Tím dojde ke vzniku síly na základě Lorenzova pravidla, a to má za následek vznik momentu a roztočení rotoru. Avšak při otáčení rotor prochází bodem, kde se točivý moment ztrácí, tomuto bodu se říká neutrální zóna. Aby došlo k zachování velikosti točivého momentu a směru otáčení je potřeba změnit směr toku proudu protékajícího rotorem. Tato změna směru toku je zajištěna komutátorem. Protože je kotva napájena z jiného zdroje než buzení, motor zachovává konstantní otáčky i při kolísání napětí, stejně tak pokles napětí v rotoru nemá vliv na buzení.

Spouštění stejnosměrných komutátorových motorů s cizím buzením
Při rozběhu musí být před připojením k síti motor nabuzen, aby nedošlo k nebezpečnému nárůstu otáček. Ke snížení napětí na kotvě při rozběhu motoru lze použít spouštěcí odpor. Po připojení statorového vinutí k elektrické síti dojde k vytvoření statického statorového magnetického pole, připojením rotoru ke zdroji elektrické energie dojde k průchodu elektrického proudu skrz vinutí rotoru, to způsobí vznik vlastního magnetického pole. Následně dojde k interakci mezi magnetickým polem rotoru a magnetickým polem statoru motor se pootočí komutátor změní směr toku proudu v kotvě a motor provede celou otáčku.

4.4.2 Stejnosměrný motor s derivačním buzením

Konstrukce stejnosměrného motoru s derivačním buzením
Budicí vinutí motoru s derivačním buzením je zapojeno paralelně k vinutí kotvy. U velkých strojů se do drážek pólových nástavců ještě umisťuje tzv. kompenzační vinutí, to se zapojuje do série s vinutím kotvy. Kompenzační vinutí, jak jeho název naznačuje, slouží ke kompenzaci nehybného magnetického pole, to vzniká v prostoru kotvy kvůli konstrukční mezeře mezi póly, která představuje velký magnetický odpor. Kompenzační vinutí se používá výhradně u motorů velkých výkonů, protože je výrobně poměrně drahé.

Princip činnosti stejnosměrného motoru s derivačním buzením
Proud protékající kotvou protéká zároveň i kompenzačním vinutím, jeho vlastnosti jsou takové, aby došlo k vytvoření magnetického pole opačného směru o velikosti shodné

s velikostí reakčního magnetického pole vytvořeného kotvou. Zmenšení vlivu reakce kotvy je také dosahováno pomocí tzv. komutačních pólů.

Spouštění stejnosměrných motorů s derivačním buzením
Po připojení motoru k elektrické síti začne budicím a rotorovým vinutím procházet proud, vinutí jsou napájena ze stejného zdroje, aby byla splněna podmínka nabuzení při spouštění, z toho důvodu nelze provést spuštění sníženým napětím (nedošlo by k plnému nabuzení). Spouštění poté pokračuje stejným způsobem jako u ostatních komutátorových motorů. Budicí a rotorové vinutí si vytvoří svá vlastní magnetická pole, která se vzájemně ovlivňují a způsobí pootočení motoru, komutátor poté změní směr toku proudu protékajícího vinutím kotvy a tím se docílí udržení otáček motoru.

4.4.3 Stejnosměrný motor se sériovým buzením

Stejnosměrné motory se sériovým buzením jsou vhodné pro použití v pohonech, ve kterých nedojde k jejich zastavení, proto se používají zejména pro pohon ventilátorů.

Konstrukce stejnosměrného motoru se sériovým buzením
Budicí (statorové) vinutí motoru se sériovým buzením je zapojeno v sérii s vinutím kotvy, a může obsahovat předřazený rezistor, ten slouží k rozběhu a regulaci otáček motoru. U dvoupólových motorů s malými výkony bývá kotva zapojena mezi dvě statorové cívky, tím se docílí snížení rušení.

Princip činnosti motoru se sériovým buzením
Motor se sériovým buzením je možno provozovat i při napájení střídavým proudem, ale při napájení proudem stejnosměrným dosahuje lepších vlastností.

Spouštění stejnosměrných motorů se sériovým buzením
Jelikož je při spouštění tohoto typu motoru rozběhový proud omezen pouze impedancí statoru a kotvy nesmí být motor rozbíhán bez zátěže, proto se provádí tzv. odporový rozběh, při kterém se do obvodu sériově ke kotvě přidá rezistor, nevýhodou tohoto provedení jsou ztráty způsobené rezistorem. Další možností je rozběh pomocí spouštěče, kterým lze omezit napájecí napětí, v tomto případě se již jedná o bezztrátový rozběh.

4.4.4 Stejnosměrný motor s kompaudním buzením

Konstrukce stejnosměrného motoru s kompaudním buzením
Stejnosměrný motor s kompaudním buzením disponuje tzv. sériově-paralelním budicím vinutím. Jedná se o jakýsi hybrid, tedy spojení, sériového a derivačního budicího vinutí. Cílem je odstranit nevýhody jak sériového, tak derivačního zapojení budicího vinutí.

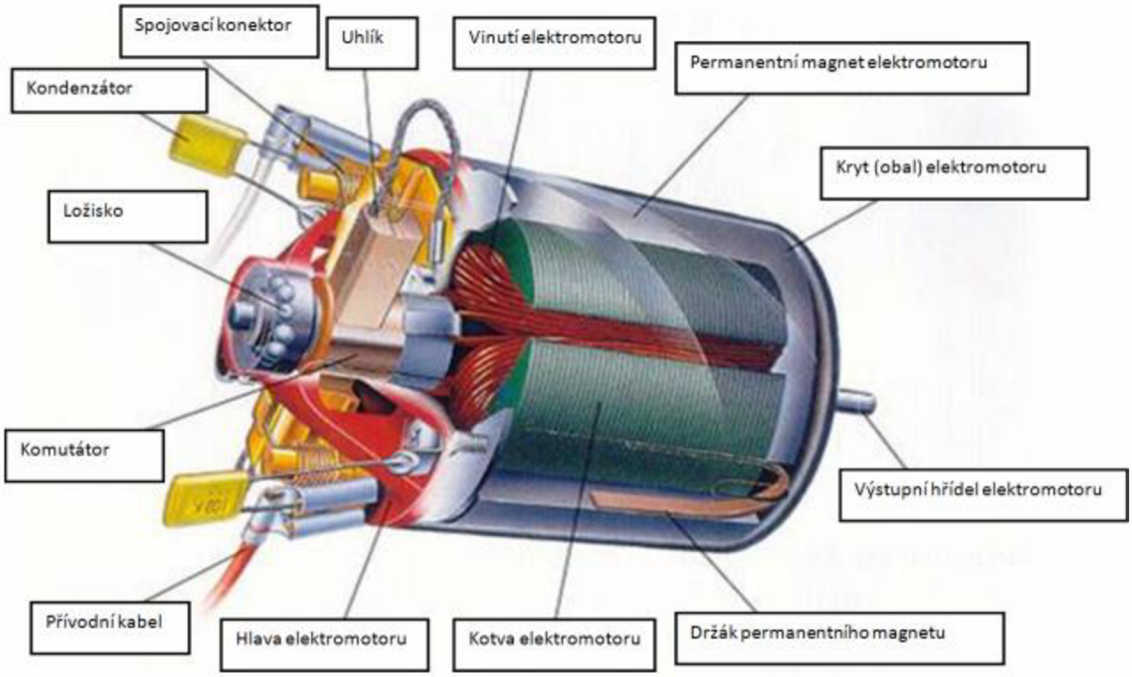
Princip činnosti stejnosměrného motoru s kompaudním buzením
Fungování motoru se liší podle způsobu buzení, buď se motor chová jako derivační nebo jako sériový. Pokud budicí toky působí souhlasně, má motor oproti paralelnímu zapojení větší točivý moment a při zatěžování je pokles otáček menší, než je u sériového zapojení. Naopak, pokud vinutí působí proti sobě tak při změně zatížení se motor snaží zachovat

konstantní otáčky, to je způsobeno tím, že při zvětšení zátěže dojde k poklesu otáček, tím dojde k zeslabení buzení a otáčky se opět zvýší.

Spouštění stejnosměrných motorů se sériovým buzením
Spouštění probíhá při maximálním budicím proudu bez sériového spouštěcího rezistoru.

4.4.5 Stejnosměrný komutátorový motor buzený magnety

Stejnosměrný motor s permanentními magnety lze považovat za konstrukční úpravu motoru s cizím buzením. Konstrukce, princip funkce i způsob spouštění těchto dvou stejnosměrných komutátorových motorů jsou tedy takřka totožné.



Obrázek 5 Stejnosměrný motor s permanentními magnety [50]

Konstrukce stejnosměrného komutátorového motoru buzeného magnety
Konstrukce je téměř shodná s konstrukcí derivačního motoru s cizím buzením, jediným rozdílem v konstrukci je využití permanentních magnetů namísto budicích cívek.

Princip činnosti stejnosměrného komutátorového motoru buzeného magnety
Princip činnosti je shodný s principem činnosti derivačního motoru s cizím buzením. Avšak budicí magnetický tok je v tomto případě vytvářen permanentními magnety.

4.4.6 Řízení stejnosměrných motorů

Řízení otáček odporem v obvodu kotvy
Tento způsob regulace je velmi neekonomický, jelikož s sebou nese trvalé ztráty, které jsou způsobeny řídicím rezistorem, jež je předřazen v obvodu kotvy. Tento způsob je tedy téměř nepoužívaný a jeho použití je omezeno na motory velmi malých výkonů, kde ztráty nedosahují tak vysokých hodnot.

Řízení otáček budicím proudem

Tento způsob regulace spočívá ve změně smyslu magnetického toku. K tomu je využíván tyristorový měnič, tím lze snížit velikost proudu pod hodnotu jmenovitou. Tím dojde k tzv. odbuzování a otáčky mohou být zvýšeny až nad jmenovitou hodnotu. Podmínkou odbuzování je, aby byl zátěžný moment nižší než moment odbuzeného motoru. Při odbuzování motorů s velkým zatížením by mohlo dojít k zastavení stroje.

Řízení otáček pomocí napětí na kotvě

Tento způsob řízení slouží k reverzaci otáček motoru a spočívá ve změně polarity napětí procházejícího kotvou. Pro dosažení změny polarity je využíváno třífázových reverzačních můstků.

4.4.7 Brzdění stejnosměrných motorů

Brzdění do odporu

Pro tento způsob zpomalení, nebo spíše zastavení motoru, je potřeba běžící motor odpojit od energetické sítě a motor se poté začne chovat jako generátor. Proto se na jeho svorky připojuje rezistor (tzv. brzdový odpor), který spotřebuje onu vygenerovanou energii. Jedná se tedy o brzdění ztrátové, jelikož všechna kinetická energie je v rezistoru přeměněna v teplo. [24]

Brzdění protiproudem

Při tomto způsobu brzdění se brzdový odpor připojí do obvodu mezi usměrňovač a motor a přepojí se svorky motoru, aby došlo k otočení polarity a docílilo se tak opačného směru toku proudu. Kinetická energie je opět za pomoci brzdového odporu přeměňována na tepelnou. A protože, na rozdíl od brzdění do odporu, je při tomto způsobu brzdění motor stále připojen k elektrické síti, je ze sítě navíc stále odebírána elektrická energie. [24]

Brzdění rekuperací

K dosažení rekuperace je nutno snížit napětí na svorkách usměrňovače, motor se začne chovat jako generátor, tím dojde ke změně směru toku proudu protékajícího motorem. Kinetická energie je tedy přeměňována na energii elektrickou a ta je dodávána zpět do sítě. [24]

5 ELEKTRICKÉ MOTORY V AUTOMATIZAČNÍ TECHNICE

5.1 BLDC motory

BLDC motor (Bruchless Direct Current motor), tedy bezkartáčový, jinak také nazývaný elektronicky komutovaný motor má konstrukci a princip funkce shodný se stejnosměrnými motory s permanentními magnety. Konstrukčním rozdílem jsou permanentní magnety sloužící k rozběhu stroje, ty jsou připevněny na rotoru motoru. Zásadním rozdílem je absence komutátoru, ten je nahrazen regulátorem otáček, který je zodpovědný za správné spínání jednotlivých rotorových vinutí. [25]

Konstrukce statoru
Shodná se statorovou konstrukcí synchronního motoru.

Konstrukce rotoru
Rotor má lichoběžníkový tvar se zabudovanými permanentní magnety. Obecně platí, že čím vyšší je počet magnetických pólů, tím plynulejší je výsledný pohyb. Jako permanentní magnety se do BLDC motorů používají tzv. neodymové magnety NdFeB (neodym-ferit-bor). Tyto magnety ze vzácných hornin jsou totiž kvalitnější, motory jsou poté efektivnější a díky tomu mohou být celkově menší. [25]

Řízení BLDC motorů

Statické řízení
Statické řízení spočívá v udržování stálého proudu v požadovaném vinutí a tím je zabráněno pootočení rotoru. [37]

Trapézové řízení
Jde o nejjednodušší a nejčastěji využívaný způsob řízení BLDC motorů. Jedna elektrická otáčka je rozdělena na šest sektorů po 60 stupních. Jednotlivé sektory jsou popsány v komutační tabulce. Ke zjištění, ve kterém sektoru se rotor nachází, slouží Hallovy sondy. Díky známé poloze rotoru je možno udržovat úhel mezi magnetickým tokem statoru a rotoru na hodnotě devadesáti stupňů, při této hodnotě dosahuje motor nejvyššího točivého momentu.

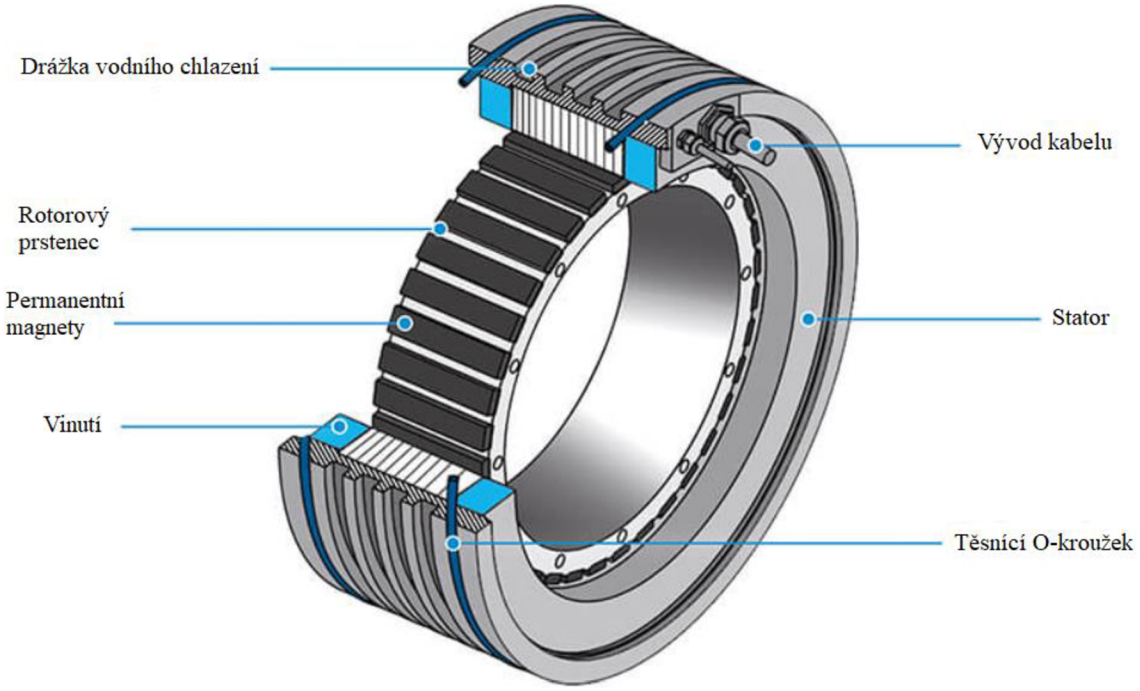
Sinusové řízení
Sinusové řízení je velmi podobné řízení trapézovému. Rozdíl spočívá v průběhu proudů tekoucích rotorem stroje. Sinusové řízení totiž pracuje s harmonickými proudy a je podobné řízení třífázových motorů. Otáčky a moment motoru lze tedy upravovat změnou sinusového průběhu pomocí měniče. [37]

Aktuální praktické uplatnění BLDC motorů
BLDC motory jsou využívány v počítačové technice pro pohon počítačových ventilátorů nebo pevných disků. Takřka nenahraditelné jsou v akumulátorových strojích.

Kterými jsou například ruční vrtačky nebo úhlové brusky. Dále jsou používány například v pračkách a klimatizacích, a to z důvodu bezpečnosti (díky jejich bezjiskrovému provozu je sníženo riziko úrazu elektrickým proudem). [38]

5.2 Prstencové motory

Prstencové motory se konstruují jako synchronní, stejnosměrné nebo krokové. Prstencové motory disponují velkým točivým momentem při velmi nízkých otáčkách. Principem činnosti a řízením jsou prstencové motory shodné s výše popsanými BLDC motory.



Obrázek 6 Prstencový motor [51, 52]

Konstrukce prstencového motoru

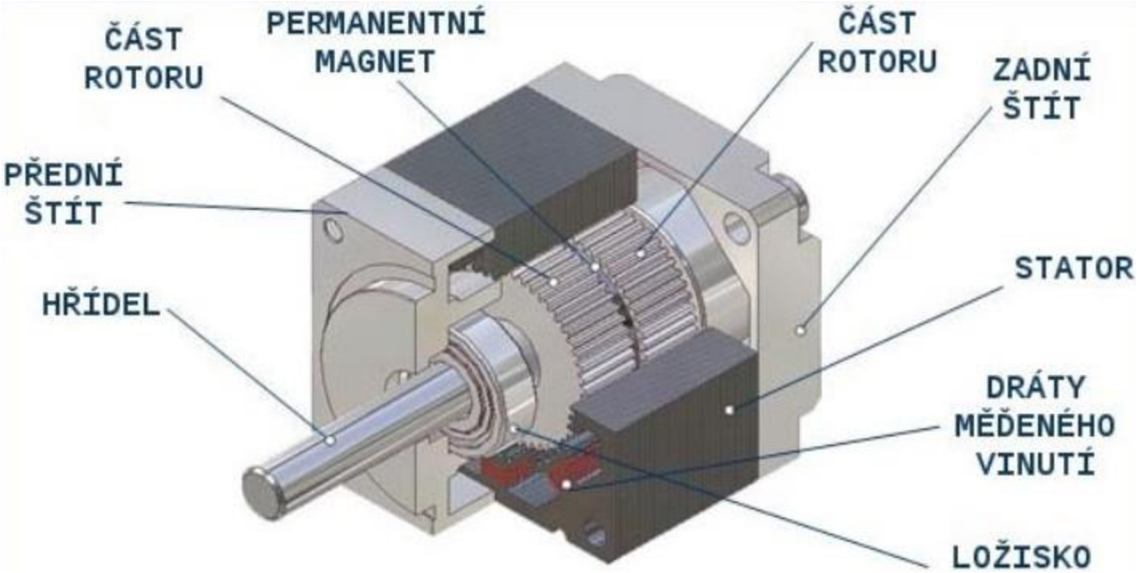
Stator i rotor mají tvar prstenců a umisťují se přímo do konstrukce stroje. Trojfázové statorové vinutí v zapojení do hvězdy je umístěno na kostře, ta bývá svařované konstrukce z nerezové oceli nebo slitiny hliníku. Prstencové motory mají vysoký počet pólpárů (v řádu desítek). Na vnější straně kostry jsou vytvořeny drážky pro chlazení vodou. Rotor je tvořen prstencem, po jehož obvodě jsou rozmístěny neodymové permanentní magnety. Rotor může podle konstrukce rotovat buď uvnitř nebo vně statoru. Motory s vnějším rotorem mají při stejném výkonu znatelně menší hmotnost (rozdíl 15%). [33]

Aktuální praktické uplatnění prstencových motorů

Prstencové motory jsou využívány zejména v robotice. Pro pohon robotických ramen jsou využívány firmami ABB, FANUC, KUKA. A to, protože volným prostorem uvnitř prstence lze vést kabeláž a hadice s hydraulickou kapalinou až do koncového bodu robotu. Prosazují se také v obráběcích strojích, kde jsou využívány pro pohon otočného stolu. [33]

5.3 Krokové motory

Jedná se o synchronní stejnosměrné motory velmi podobné BLDC motorům, se kterými sdílejí i způsoby řízení. Princip pohybu krokových motorů spočívá v pootáčení rotoru o určitý počet poloh neboli kroků. Dělí se na unipolární (využívající napětí jedné polarity) a bipolární (využívají napětí se dvěma polaritami, střídavý proud).



Obrázek 7 Krokový motor [53]

Konstrukce statoru

Stator obsahuje vyniklé póly, na nichž se nachází vinutí, cívky jedné fáze jsou zapojeny v sérii a jsou umístěny naproti sobě.

Konstrukce rotoru

Existují dva typy rotorů, těmi jsou rotory pasivní a rotory aktivní.

Pasivní rotory se skládají z rotorových plechů, jejichž tvar je navržen tak, aby vznikla nerovnoměrná vzduchová mezera, a to proto aby se měnila reluktance. Této změny se totiž využívá při jejich řízení, jelikož rotor se vždy natočí směrem nejnižší reluktance.

Aktivní rotory jsou tvořeny různě uspořádanými permanentními magnety nebo jedním permanentním magnetem s mnoha nástavci. Rotory jsou polarizovány buď radiálně nebo axiálně, od toho se pak odvíjí velikost kroku.

Krokové motory s pasivním rotorem

Motory s pasivním rotorem se nazývají reluktanční motory a jedná se o nejstarší typ krokových motorů (tzv. první generace). Reluktanční motory jsou jednoduché, a to jak z hlediska konstrukce, tak z hlediska řízení. V dnešní době jsou motory s proměnnou reluktancí využívány velmi ojediněle. Jejich výhodou je schopnost dosažení vyšších otáček, než jakých jsou schopny ostatní typy krokových motorů. Další výhodou je nezávislost na okolní teplotě (tento motor neobsahuje permanentní magnet, a proto vyšší teploty nemají na jeho funkčnost vliv). Protože však neobsahují permanentní magnet, nemají ve vypnutém stavu žádný brzdný moment. Další nevýhodou těchto motorů je

poměrně nízký točivý moment, jehož hodnoty se pohybují v rozsahu tisícin až jednotek Nm. Tyto motory jsou většinově konstruovány na velikost kroku 1-5 °.

Krokové motory s aktivním rotorem

Motory s aktivním rotorem jsou složitější (obsahují komplikovanější magnetický obvod) a tím pádem i dražší. Vzhledem k jejich konstrukci obsahující permanentní magnety, mají tyto motory brzdný moment i při vypnutém stavu, zároveň jsou však náchylné na velmi vysoké teploty. Momenty těchto motorů se pohybují v rozsahu od tisícin do desítek Nm. Velikost kroku u motorů s magnety polarizovanými radiálně bývá zpravidla větší než 15°. U motorů s magnety polarizovanými axiálně se velikost kroku pohybuje od 0,36 do 5°.

Hybridní krokové motory

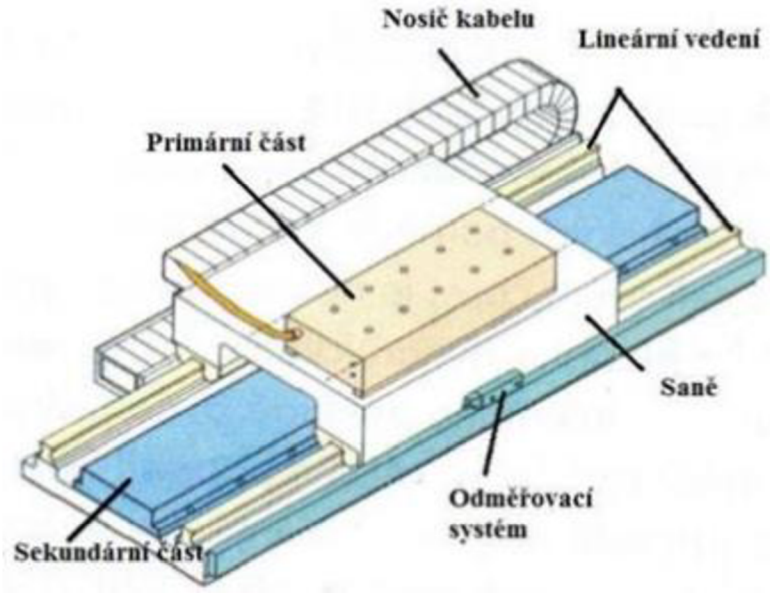
Motory této konstrukce kombinují vlastnosti předchozích dvou typů a jedná se o jedny z nejpoužívanějších krokových motorů. Disponují nejvyšší spolehlivostí, přídržným a točivým momentem a rychlostí otáčení ze všech typů krokových motorů [28]. Motory jsou schopny provádět kroky od 0,9 do 3,6°.

Aktuální praktické uplatnění krokových motorů

Krokové motory jsou dlouhodobě využívány v tiskárnách, a to od jehličkových až po moderní 3D tiskárny. Využívány jsou také pro pohyb robotů, pro ovládání poloh regulačních prvků spalovacích motorů nebo pro pohánění počítačových disků. [28]

5.4 Lineární motory

Lineární motory se výrazně odlišují od všech ostatních elektrických motorů tím, že místo rotačního pohybu je jejich výstupem pohon lineární, tedy přímočarý. Jejich výstupem tak není moment, ale síla. Jedná se o velmi moderní technologii pohonu.



Obrázek 8 Lineární motor [54]

Konstrukce lineárního motoru

Lineární motory mohou být konstruovány jako asynchronní, synchronní nebo krokové. Samotná konstrukce se dělí na dvě části, a to na primární (stator) a sekundární (rotor). Primární část se skládá z elektroplechů a z trojfázového vinutí vloženého do jejich drážek [39]. Sekundární část je umístěna naproti části primární a sestává se z permanentních magnetů.

Řízení lineárních motorů

Krokové lineární motory jsou řízeny stejným způsobem jako běžné krokové motory. Synchronní a asynchronní lineární motory jsou řízeny za pomocí číslicových regulátorů v kaskádovém řízení.

Aktuální praktické uplatnění lineárních motorů

Lineární motory jsou používány v obráběcích centrech pro pohon posuvů křížových stolů. [40] Použití také nachází v oblasti automatizovaných posuvných dveří ty se vyskytují například ve výtazích nebo obchodech.

6 ZÁKLADY ŘÍZENÍ A REGULACE

6.1 Řízení

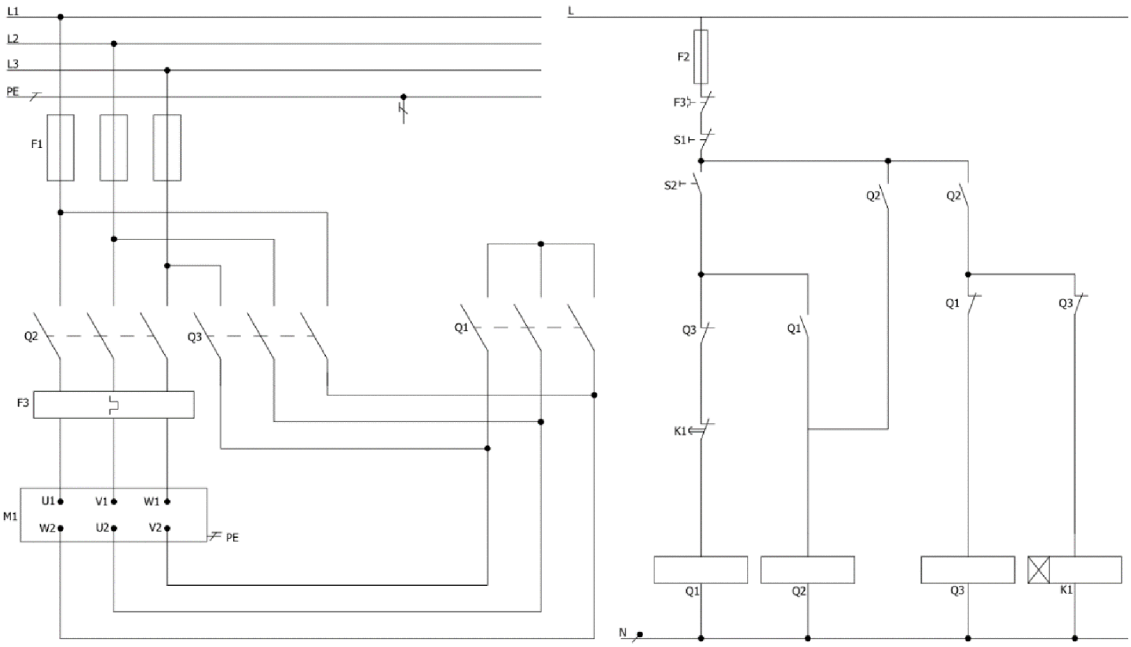
Řízení je proces, při kterém dochází k vědomému ovlivňování řízené veličiny (např. napětí, proudu, otáček atd.) skrze vstupní veličiny. Řízení lze rozdělit na ovládání a regulaci. Řízení lze dělit také podle následujících parametrů [4]:

- Reprezentace informací
  - Analogové řízení
  - Binární (logické) řízení
  - Číslicové řízení
- Způsob zpracování informací
  - Přímé řízení
  - Nepřímé řízení
- Uložení a realizace řídicího programu
  - Propojované řídicí systémy
    - S pevným nastavením
    - S přestavitelným nastavením
  - Paměťové řídicí systémy
    - S výměnnými programovými paměťmi
    - S přepisovatelnou operační pamětí

Analogové řízení
Vstupní i výstupní veličiny jsou spojitého charakteru.

Binární řízení
Vstupními hodnotami při binárním řízení jsou pouze dvoustavové tzv. logické hodnoty značené 0 a 1 [44]. Logické řízení se rozděluje na logické kombinační řízení (řízení přímé) a logické sekvenční řízení (řízení nepřímé). Výstupní signál kombinačního logického řízení je definován okamžitými stavy vstupních signálů. Řídicí jednotka neobsahuje paměti ani časovače. Tento způsob logického řízení je využíván pouze pro jednoduché logické obvody. Výstupní signál sekvenčního logického řízení je definován kromě okamžitých stavů vstupních signálů i jejich předchozími stavy. Řídicí jednotka sekvenčního obvodu tedy musí obsahovat paměť a časovač. Paměť bývá obvykle realizována klopnými obvody.[4]

Příkladem sekvenčního binárního řízení může být spouštění třífázového asynchronního motoru pomocí přepínání hvězda – trojúhelník znázorněné na níže (Obrázek 9). Kdy spouštění lze zahájit stisknutím tlačítka S2, pokud je motor vypnutý. Stykač Q1 je tedy ve stavu sepnuto, brání sepnutí stykače Q3, sloužícímu k přepnutí zapojení do trojúhelníku, a sepnutím stykače Q2 zajišťuje připojení motoru k síti. Stykač Q2 sepne časové relé K1, to po uplynutí nastaveného času rozpojí stykač Q1, tím dojde k sepnutí stykače Q3 a přepnutí zapojení motoru do trojúhelníku.



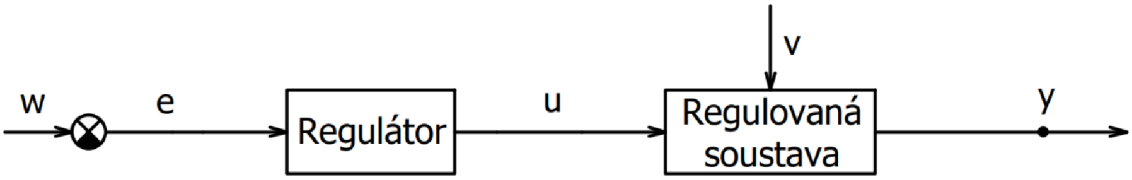
Obrázek 9 Schéma časově závislého frekvenčního řízení (automatizovaný rozběh pomocí stykačů) [4]

Číslicové řízení

Při řízení číslicovém jsou zpracovávány číslicové signály pocházející od počítače.

6.2 Ovládání

Ovládání probíhá v otevřené řídicí smyčce, tedy v obvodu neobsahujícím zpětnou vazbu, takže požadovaná hodnota není porovnávána s hodnotou skutečnou.



Obrázek 10 Otevřená smyčka

6.3 Regulace

Regulace je nejrozšířenějším typem řízení. Tento typ řízení slouží k udržování stálé hodnoty dané fyzikální veličiny na hodnotě předem definované, ale může být použit také pro dosažení nejlepšího možného průběhu změny aktuální hodnoty této veličiny na nově požadovanou hodnotu. Toto je zajištěno zařízením zvaným regulátor.
Regulace lze rozdělit podle několika kritérií [2]:

- Podle počtu regulovaných veličin
  - Jednoparametrové regulace
  - Víceparametrové regulace
- Podle druhu regulovaných veličin
  - Regulace proudu
  - Regulace momentu
  - Regulace rychlosti
  - Regulace zrychlení
  - Regulace polohy
- Podle druhu signálů
  - Analogové regulace
  - Frekvenční regulace
  - Číslicové regulace
- Podle dynamických členů
  - Lineární regulace
  - Nelineární regulace
- Podle druhu elektrické energie
  - Stejnosměrné regulační obvody
  - Střídavé regulační obvody
- Podle nároků na dynamické vlastnosti
  - Regulace normální
  - Regulace optimální
  - Regulace adaptivní
- Podle počtu regulovaných motorů
  - Regulace jednomotorových pohonů
  - Regulace vícemotorových pohonů
- Podle implementace řídících obvodů
  - Regulace obvodové
  - Regulace programové

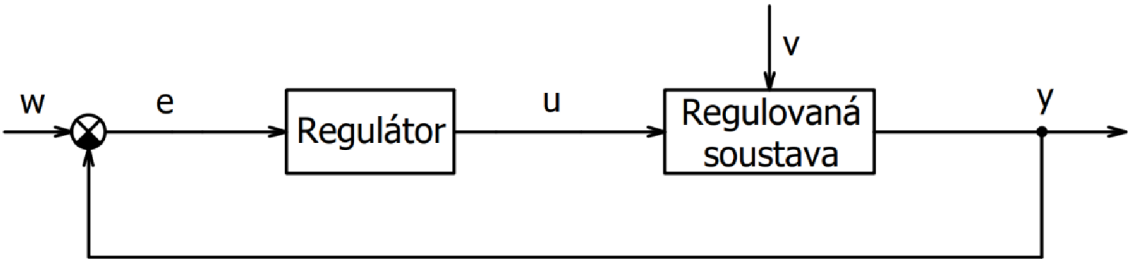
6.3.1 Regulační obvody

Regulační obvod obsahuje regulovanou soustavu, regulátor (zařízení sloužící k regulaci) a zpětnou vazbu, která dodává regulátoru informace o skutečné hodnotě výstupní veličiny [42]. Ke správné funkci regulace je nutné, aby byl daný obvod stabilní. Regulační obvod je stabilní, pokud po svém vychýlení z rovnovážného stavu a odeznění

vzruchu, který vychýlení způsobil, je schopen se ustálit v rovnovážném stavu [43]. Regulační obvody se rozdělují na spojité a diskrétní.

Regulační obvod spojitý

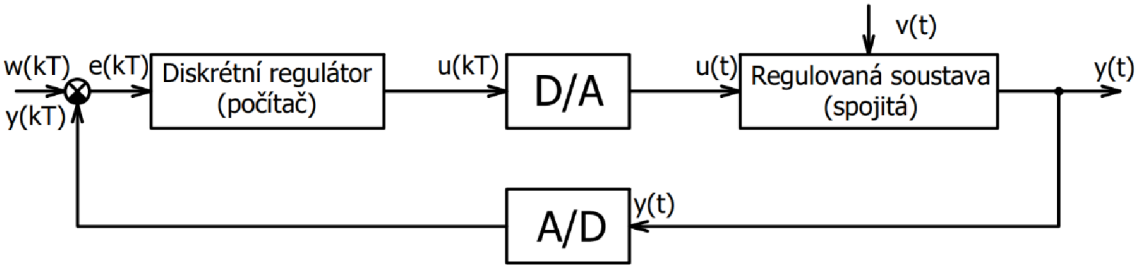
Spojitý regulační obvod je tvořen měřicím členem, ústředním členem a akčním členem, z nichž všechny tyto členy pracují se spojitými signály. [44]



Obrázek 11 Spojitý obvod

Regulační obvod diskrétní

Diskrétním regulačním obvodem je zván jakýkoliv obvod obsahující alespoň jeden člen pracující diskrétně, tedy s diskrétním signálem. Diskrétní regulační obvod tedy musí obsahovat vzorkovač, tvarovač nebo oba tyto prvky. [44]



Obrázek 12 Diskrétní obvod

6.3.2 Regulátory

Regulátory pracují s regulační odchylkou, ta jim je podávána porovnávačem, který porovnává požadovanou a skutečnou hodnotu regulované veličiny. Po vyhodnocení regulační odchylky daný regulátor vygeneruje na základě její velikosti této odchylky akční veličinu, ta je následně předána akčnímu členu, který provede akční zásah, jehož cílem je snížení regulační odchylky na hodnotu co nejbližší nule.

Regulátory se rozdělují podle:

- Zdroje energie na regulátory:
  - Přímé – nepotřebují vnější přívod energie (jsou napájeny přímo z regulačního obvodu většinou z regulované veličiny)
  - Nepřímé – vyžadují externí přívod energie, díky tomu nespotřebovávají energii regulované veličiny, používají se častěji
- Charakteru výstupní veličiny na regulátory:
  - Spojité
  - Nespojité
  - Diskrétní

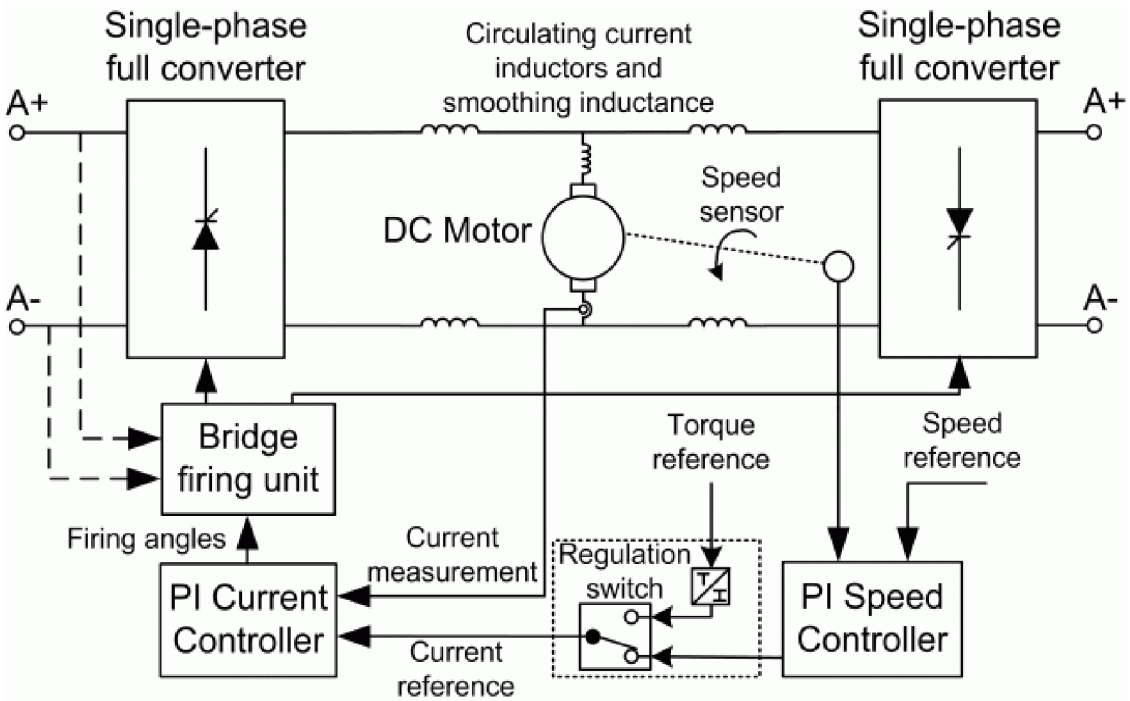
Spojité regulátory
Jedná se regulátory se spojitou výstupní veličinou, slouží tedy k regulaci spojitých obvodů.

P-regulátor (proporcionální regulátor)
Cílem P-regulátoru je zesílit vstupní signál, kterým je regulační odchylka. Jedná se o levné řešení málo náročných aplikací [36]. Nedokáže totiž kompletně eliminovat regulační odchylku.

I-regulátor (integrační regulátor)
Cílem I-regulátoru je vygenerování výstupního signálu, jehož průběh odpovídá integrálu regulační odchylky. I-regulátor umožňuje oproti P-regulátoru zcela eliminovat regulační odchylku.

D-regulátor (derivační regulátor)
Cílem D-regulátoru je vygenerování výstupního signálu, jehož průběh odpovídá derivaci regulační odchylky. D-regulátory se nepoužívají, protože nejsou schopny vyrovnání regulační odchylky.

PI-regulátor (proporcionálně-integrační regulátor)
Proporcionálně-integrační regulátor vytváří signál, jehož průběh je tvořen součtem proporcionální a integrační složky. Kompletně odstraňuje regulační odchylku. Jedná se o nejběžněji používaný regulátor vhodný pro středně náročné aplikace [36].



Obrázek 13 Regulovaný elektrický pohon se dvěma PI regulátory

PD-regulátor (proporcionálně-derivační regulátor)
Proporcionálně-derivační regulátor funguje stejně jako P-regulátor, derivační složka zrychluje odezvu regulátoru na změnu velikosti regulační odchylky a jejím nastavením lze zmenšit zesílení proporcionální složky, čímž lze dosáhnout úplné eliminace překmitů.

U PD-regulátorů nelze dosáhnout kompletní eliminace regulační odchylky, jelikož neobsahují integrační složku. PD-regulátory se proto používají jen sporadicky. [36]

PID regulátor (proporcionálně-integračně-derivační regulátor)
Proporcionálně-integračně-derivační regulátor obsahuje všechny složky a kombinuje tedy výhody všech předchozích regulátorů. Kompletně tedy odstraňuje regulační odchylku. Používá se pro náročné aplikace. [36]

Nespojité regulátory
Jedná se o regulátory, které obsahují alespoň jeden člen s nespojitou charakteristikou. Výstupní veličina nespojitých regulátorů je poté omezena na několik pevných hodnot, nebo má impulsní charakter. Podle toho se nespojité regulátory rozdělují na polohové a impulsní. [45]

Polohové regulátory
Výstupem polohových regulátorů je tedy akční veličina, která může dosahovat jen předem definovaných hodnot. Polohové regulátory se dále rozdělují podle počtu předem definovaných dosažitelných hodnot na regulátory dvoupolohové a vícepolohové. Dvoupolohové regulátory vytvářejí akční veličinu, která může nabývat pouze dvou hodnot, příkladem může být dvoustavová regulace ventilu, kde mají tyto dvě hodnoty podobu úplného otevření ventilu a úplného uzavření ventilu. Vícepolohové regulátory jsou schopny vytvářet akční veličiny s více hodnotami například úplné otevření ventilu, otevření ventilu do střední polohy a úplné uzavření ventilu. [45]

Impulsní regulátory
Impulsní regulátory vytváří na základě regulační odchylky impulsy s různou střídou nebo frekvencí. Impulsní regulátor lze vytvořit z dvoupolohového regulátoru přidáním zpožďující zpětné vazby. Střída nebo frekvence se poté převede na PWM signál, kterým je následně ovládána regulační soustava. [45]

Číslicové (diskrétní) regulátory
Číslicové regulátory slouží k regulaci obvodů, v nichž je tato regulace vyhodnocována počítačem. Počítače totiž nejsou schopny pracovat se spojitou vstupní veličinou, proto se do obvodu zařazuje analogově-číslicový převodník neboli vzorkovač sloužící k převodu spojité funkce na funkci diskrétní. Akční veličina však musí mít spojitý charakter, a proto je na výstup regulátoru zařazen číslicově-analogový převodník neboli tvarovač, který z diskrétní posloupnosti hodnot vytvoří spojitý analogový signál schodovité funkce. [44]

PSD regulátor (proporcionálně-sumačně-diferenční regulátor)
PSD regulátory jsou obdobou spojitých PID regulátorů. Kde integrační složka přechází na složku sumační, a derivační složka ve složku diferenční. U PSD regulátorů je nutné omezení sumační složky, aby nedošlo k jejímu přebuzení. To by se projevilo prodloužením přechodového děje. PSD regulátory se rozdělují na polohové a přírůstkové. Přírůstkové PSD regulátory jsou méně používané, jelikož omezení sumační složky u tohoto typu regulátoru je poměrně složité, navíc nejsou přírůstkové regulátory schopny

beznárazového přepínání, takže při přepnutí na řízení ruční nebo řízení jiným regulátorem dojde k vytvoření skokové změny akční veličiny. [46]

6.3.3 Kvalita regulace

Kvalita regulace je ovlivněna typem regulátoru a jeho nastavením. Kvalita regulace je posuzována na základě následujících parametrů [44]:

- Doba regulace
  Doba regulace je doba potřebná pro snížení odchylky mezi přechodovou charakteristikou a žádanou hodnotou na velikost trvale menší než je pět procent ustálené hodnoty přechodové charakteristiky.
- Maximální přeregulování
  Maximální přeregulování značí velikost překmitu [4].
- Čas maximálního přeregulování
  Čas maximálního přeregulování značí dobu regulační odezvy, doba regulační odezvy je doba potřebná k vrácení hodnoty regulované veličiny zpět do tolerančního rozsahu po jeho překročení [4].
- Perioda kmitů
- Trvalá regulační odchylka
  Trvalá regulační odchylka je tvořena rozdílem ustálených hodnot žádané veličiny a veličiny regulované.

7 ZÁVĚR

Předkládaná bakalářská práce se zabývala přehledem aktuálně používaných elektrických pohonů a je převážně zaměřena na elektrické stroje v nich využívané. První kapitola se zabývá definováním pojmu elektrický pohon. Tento pojem byl dříve definován v rámci československých státních norem. S rozvojem nových poznatků se však tato definice vyvíjela a v práci je zmíněna i jedna z možných současných definic. Druhá kapitola se věnuje obecným vlastnostem elektrických pohonů. Zbytek práce se poté zabývá podrobnějším rozborem vlastností a principů funkce poháněcích elektrických strojů - motorů. Tyto motory jsou jednotlivě popsány z hlediska vlastností, které je možné uplatnit ve strojírenských aplikacích. Zvláštní kapitola je věnována motorům vyskytujícím se v pohonech, které nalézají uplatnění zejména v automatizační technice. Poslední kapitola práce je věnována základům řízení a regulace využívané i v elektrických pohonech.

Lze konstatovat, že stanovené cíle práce byly naplněny. Bakalářská práce je rešeršního charakteru. Při její tvorbě byla využívána dostupná technická literatura, tato byla analyzována a podstatné skutečnosti byly využity. Pozornost se hlavně soustředila především na elektrické stroje, které tvoří hlavní část elektrických pohonů. Pozornost by určitě zasluhovalo i např. využití polovodičových měničů u elektrických pohonů, neboť dnes jsou tyto struktury součástí řízení elektrických strojů. Toto však přesahuje rámec zadání řešené bakalářské práce.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] PAVELKA, Jiří, Jiří JAVŮREK a Zdeněk ČEŘOVSKÝ. Elektrické pohony. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997, 221 s. ISBN 80-01-01411-8.

[2] ČERNÝ, Miroslav. Elektrické pohony. 2. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1986, 199 s.

[3] KŮS, Václav. Elektrické pohony a výkonová elektronika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006, 182 s. ISBN 80-7043-422-8.

[4] TKOTZ, Klaus, Peter BASTIAN, Horst BUMILLER, et al. Příručka pro elektrotechnika. 2. doplněné vydání, dotisk. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2017, 623 stran : barevné ilustrace ; 25 cm. ISBN 978-3-8085-3034-4.

[5] ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. Elektrotechnické názvosloví. Názvosloví elektrických pohonů. ČSN 34 5170. 1976.

[6] CHMELÍK, Karel. ASYNCHRONNÍ A SYNCHRONNÍ ELEKTRICKÉ STROJE. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2001. ISBN 80-7078-857-7.

[7] Porovnání pneumatických, hydraulických a elektrických lineárních pohonů [online]. Admin E-konstruktér, 2015, 29.5.2015 [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: https://e-konstrukter.cz/novinka/porovnani-pneumatickych-hydraulickych-a-elektrickych-linearnich-pohonu

[8] Směrnice o energetické účinnosti [online]. DANFOSS, S.R.O, 2021, 16.9.2021 [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: https://www.elektroprumysl.cz/legislativa/smernice-o-energeticke-ucinnosti

[9] L 272/74 Úřední věstník Evropské unie: Nařízení komice (EU) 2019/1781. In: . 2019.

[10] CHVATÍK, Štěpán. Asynchronní motory malého výkonu. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

[11] Přehled a zapojení motorů [online]. 2013, 21.10.2013 [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: https://www.mylms.cz/prehled-a-zapojeni-motoru

[12] Řízení otáček třífázových asynchronních motorů [online]. [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: https://topden.cz/rizeni-otacek-trifazovych-asynchronnich-motoru

[13] MRÓZ, Mateusz. Řízení otáček třífázových asynchronních motorů [online]. 2023, 31.8.2023 [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: https://botland.cz/blog/stejnosmerny-motor-princip-cinnosti-a-pouziti

[14] StejnosmerneMotory [online]. [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: http://352lab.vsb.cz, http://352lab.vsb.cz/Podklady/skripta2021/StejnosmerneMotory.pdf

[15] RUDOLF, Ladislav. Elektrické stroje a přístroje [online]. Ostravská univerzita, Pedagogická fakulta, 2016 [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: https://projekty.osu.cz/irp2016/synchronni.html

[16] ŠIMON, Josef. Jak se dělá elektromotor. ELEKTRO [online]. Praha: FCC Public, 2011, 21(2), 36-43 [cit. 2024-04-14]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42921.pdf

[17] Jednofázové asynchronní motory. Elektroprůmysl.cz [online]. Brno: Bubeníček, 2022, 29.9.2022, 12(září), 1-70 [cit. 2024-04-14]. ISSN 2571-076. Dostupné z: https://www.elektroprumysl.cz/energetika/jednofazove-asynchronni-motory

[18] GÜRTLER, Otto. Modul spojitého řízení otáček ventilátoru s jednofázovým asynchronním motorem. Pardubice, 2011. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.

[19] PIVOŇKA, Pavel. Synchronní stroje [online]. Praha: Katedra elektrických pohonů a trakce FEL ČVUT v Praze [cit. 2024-04-17]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/PPE/B1M15PPE_3_SYNSTR.pdf

[20] NAVRÁTIL, Vojtěch. Moderní způsoby řízení stejnosměrných motorů. Praha, 2015. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce.

[21] PALLA, Miloš a Miroslav OPL. Motory. In: Elektrické stroje [online]. 2015 [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/771

[22] KUBIE, Ivan. Způsoby řízení stejnosměrných motorů [online]. 2014, 19.2.2014 [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: https://elektrika.cz/data/clanky/zpusoby-rizeni-stejnosmernych-motoru

[23] KUBIE, Ivan. Řízení elektrických motorů. ELEKTRO [online]. Praha: FCC Public, Únor 2014, 24(2), 63-64 [cit. 2024-04-14]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/cislo-2-rocnik-2014--1015

[24] ZEMAN, Karel a Jiří CIBULKA. Elektrické pohony [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017 [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/ep/studijni-materialy.html

[25] KOŠŤÁL, Jan. Řízení BLCD motorů. Pardubice, 2013. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky.

[26] ZAPLATÍLEK, Luděk. Řízení bezkartáčových (BLDC) motorů. Pardubice, 2009. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky.

[27] OTRUBA, Jiří. Implementace řízení BLDC motoru. Plzeň, 2015. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechniky a výkonové elektroniky.

[28] KROKOVÝ MOTOR – DRUHY A PŘÍKLADY APLIKACÍ KROKOVÝCH MOTORŮ [online]. Ostrava: TME CZECH REPUBLIC, 2020, 8.9.2020 [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/41861/krokovy-motor-druhy-a-priklady-aplikaci-krokovych-motoru

[29] Druhy krokových motorů [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: https://www.kvd.zcu.cz/cz/materialy/POS/HTML/57/default.htm

[30] PALLA, Miloš a Miroslav OPL. Krokové motory. In: Elektrické stroje [online]. 2015 [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/809

[31] NOVOTNÝ, Ondřej. Krokové motory. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická, katedra elektrotechniky a výkonové elektroniky.

[32] Prstencové motory. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: Industria Press, 2001, 12.12.2001, 5(12) [cit. 2024-04-14]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/prstencove-motory

[33] ŠPAČEK, Kryštof. Princip a použití prstencových motorů v průmyslových aplikacích. Praha, 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce.

[34] PALLA, Miloš a Miroslav OPL. Lineární motory. In: Elektrické stroje [online]. 2015 [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/806

[35] GARZINOVÁ, Romana, Zora JANČÍKOVÁ a Ondřej ZIMNÝ. ZÁKLADY AUTOMATIZACE TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ V TEORII [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2024-04-14]. ISBN 978-80-248-3044-5. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_035/Z%C3%A1klady%20automatizace%20technologick%C3%BDch%20proces%C5%AF%20v%20teorii.pdf

[36] Spojité regulátory [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2023 [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: https://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F3/F3k34-sprg.htm

[37] STEJSKAL, Martin. Návrh měniče pro BLDC motor. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky.

[38] Bezkartáčový motor – konstrukce, provoz a silné stránky [online]. TME CZECH REPUBLIC, 2022, 2.3.2022 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: https://www.elektroprumysl.cz/energetika/bezkartacovy-motor-konstrukce-provoz-a-silne-stranky

[39] Lineární motory [online]. Raveo, 2024 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: https://www.linearni-motor.cz/

[40] Lineární systémy a polohovací jednotky. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: Industria Press, 2015, 11.3.2015, 19(3) [cit. 2024-04-20]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/linearni-systemy-a-polohovaci-jednotky

[41] RISSEL, Sascha. Jaké jsou výhody lineárního motoru? [online]. Linear Direct, 2022, 23.1.2022 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: https://lineardirect.eu/cs/blog/jake-jsou-vyhody-linearniho-motoru

[42] HOLEŠOVSKÝ, Petr. Hodnocení regulačního obvodu z hlediska stability, kvality a přesnosti regulace. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky.

[43] ŠVARC, Ivan, Radomil MATOUŠEK, Miloš ŠEDA a Miluše VÍTEČKOVÁ. Automatické řízení. 2. vydání. Brno: CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4398-3.

[44] HOFREITER, Milan. Základy automatického řízení. Praha: ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05007-1.

[45] ADÁMEK, Petr. Klasické i moderní řízení spínaných měničů. Praha, 2011. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra řídící techniky.

[46] PELIKÁN, Radek. Porovnávací studie diskrétních PSD regulátorů. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky.

Zdroje obrázků:

[47] MLČÁK, Tomáš. Elektrotechnika pro FMII [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010 [cit. 2024-04-19]. ISBN 978-80-248-2601-1. Dostupné z: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FEI/EFMMI/Elektrotechnika%20pro%20FMMI.pdf

[4] TKOTZ, Klaus, Peter BASTIAN, Horst BUMILLER, et al. Příručka pro elektrotechnika. 2. doplněné vydání, dotisk. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2017, 623 stran : barevné ilustrace ; 25 cm. ISBN 978-3-8085-3034-4.

[48] ROUBÍČEK, Ota. Princip stejnosměrných motorů [online]. 2008, 13.8.2008 [cit. 2024-04-19]. Dostupné z: https://elektrika.cz/data/clanky/princip-stejnosmernych-motoru

[49] FORMÁNEK, Josef. Tvorba grafické vizualizace principu DC motoru a DC servomotoru [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2024-04-19]. Dostupné z: https://home.zcu.cz/~formanek/mmvyuka-amzt/Data/ivk-arvt-soubory/08-F.pdf

[50] RUDOLF, Ladislav. Elektrické stroje a přístroje [online]. Ostravská univerzita, Pedagogická fakulta, 2016 [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: https://projekty.osu.cz/irp2016/stejnosmernestroje.html

[51] MENDŘICKÝ, Radomír. Regulační pohony [online]. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní [cit. 2024-04-19]. Dostupné z: https://www.ksa.tul.cz/getFile/id:3429

[52] What are torque motors and why do they work so well? [online]. Spojené státy americké, Illinois: HEIDENHAIN, 20.5.2020 upraveno 2.12.2022n. l. [cit. 2024-04-19]. Dostupné z: https://www.heidenhain.us/resources-and-news/what-are-torque-motors-and-benefits/

[53] Krokový motor - Co to je a jak to funguje [online]. 2018, 2.7.2018 [cit. 2024-04-19]. Dostupné z: https://shop.eufactory.com/blog/12_krokovy-motor-uvod

[54] BĚŤÁK, Jaroslav. Návrh řízení pohybové osy pomocí předdefinovaných kinematických trajektorií. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky.

[55] Four-Quadrant Single-Phase Rectifier DC Drive [online]. [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: https://uk.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/fourquadrantsinglephaserectifierdcdrive.html

9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

9.1 Seznam zkratek

ČSN	Československá státní norma
IEC	International Electrotechnical Commission
Nn	nízké napětí
BLDC	Brushless Direct Current
DC	Direct Current
PWM	Pulse Width Modulation

9.2 Seznam symbolů

M	Točivý moment
ω	Obvodová rychlost
P	Výkon
w	Žádaná veličina
e	Regulační odchylka
u	Akční veličina
y	Regulovaná veličina
v	Poruchová veličina
t	Čas
k	Koeficient
T	Perioda
L	Fázový vodič
PE	Ochranný vodič
N	Neutrální vodič
Q	Stykač
F	Ochranný prvek
S	Spínač
K	Relé
M	Svorkovnice motoru

9.3 Seznam obrázků

Obrázek 1 Blokové schéma elektrického pohonu 15
Obrázek 2 Kvadranty M-ω diagramu 16
Obrázek 3 Asynchronní motor [47] 18
Obrázek 4 Asynchronní motor s kroužkovou kotvou [4] 21
Obrázek 5 Stejnosměrný motor s permanentními magnety [50] 33
Obrázek 6 Prstencový motor [51, 52] 36
Obrázek 7 Krokový motor [53] 37
Obrázek 8 Lineární motor [54] 38
Obrázek 9 Schéma časově závislého frekvenčního řízení (automatizovaný rozběh pomocí stykačů) [4] 41
Obrázek 10 Otevřená smyčka 41
Obrázek 11 Spojitý obvod 43
Obrázek 12 Diskrétní obvod 43
Obrázek 13 Regulovaný elektrický pohon se dvěma PI regulátory 44