



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## SYSTÉM POHONU FREKVENČNÍ MĚNIČ – ELEKTROMOTOR – PŘEVODOVKA

DRIVE SYSTEM FREQUENCY CHANGER – ELECTRIC MOTOR - GEARBOX

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. Pavel SOCHOR

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří MALÁŠEK, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Ing. Pavel Sochor

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: Stavba strojů a zařízení (2302R016)

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:

**System pohonu frekvenční měnič – elektromotor – převodovka**

v anglickém jazyce:

**Drive System Frequency Changer – Electric Motor - Gearbox**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor tohoto systému z hlediska konstrukce a mechaniky vzhledem k použití hydrauliky pro manipulátory v průmyslu.

Cíle bakalářské práce:

Teoreticky vysvětlit funkci systému frekvenční měnič -

- asynchronní elektromotor. Rozebrat technické možnosti tohoto systému. Posoudit vhodné převodovky z hlediska

náhrady hydrauliky u manipulátorů, robotů.

Nakreslit a popsat sestavy elektromotor - dvoustupňová převodovka pro asynchronní elektromotory 0,09kW a 1,5kW,

dle katalogu převodovek EC BOX.

Seznam odborné literatury:

1. Pomaluběžné excentrické převodovky EC BOX, katalog, Strojirna Kukleny, s.r.o.
2. Patentová přihláška - Redukční planetová převodovka, číslo 1331-90.W, 19.03.90.
3. Kocman S.: Asynchronní stroje, VSB - TU Ostrava, 2002.
4. Količný J.: Elektrické pohony, VUT v Brně, FE.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jiří Maláček, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 22.11.2011

L.S.

---

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

**ABSTRAKT**

Cílem této práce je teoreticky popsat funkci systému pohonu frekvenční měnič asynchronní elektromotor, zhodnotit převodovky vhodné pro náhradu hydrauliky u manipulátorů, robotů, což je provedeno formou rešerše z literatury, v závěru práce jsou popsány vlastnosti modelových sestav. V příloze je pak výkres obou modelových sestav.

**Klíčová slova**

asynchronní elektromotor, měnič frekvence, převodovka, skalární řízení, vektorové řízení

**ABSTRACT**

The aim of this work is to theoretically describe the function of the frequency changer asynchronous electric motor, to evaluate suitable gearboxes for replacement of hydraulic manipulators, robots, which is carried out through a search of the literature, the present work describes the properties of model sets. Attached is the drawing of two model sets.

**Key words**

asynchronous motor, frequency changer, gearbox, scalar control, vector control

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

SOCHOR, P. *Systém pohonu frekvenční měnič – elektromotor – převodovka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 55 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **System pohonu frekvenční měnič – elektromotor – převodovka** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. 5. 2012

Datum

Ing. Pavel SOCHOR

**PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiří Maláškovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

**OBSAH**

ABSTRAKT.....	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ .....	7
OBSAH.....	8
ÚVOD .....	10
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ELEKTRICKÝCH POHONŮ [1].....	11
1.1 Struktura elektrického pohonu.....	11
1.2 Výhody a nevýhody elektrického pohonu .....	12
1.3 Mechanika rotujícího elektrického pohonu .....	12
1.3.1 Dynamický moment .....	13
1.3.2 Moment hnací.....	13
1.3.3 Moment zátěžný .....	14
1.4 Provozní stavy pohonu .....	16
1.5 Dimenzování pohonu.....	17
2 POPIS, FUNKCE A TECHNICKÉ MOŽNOSTI SYSTÉMU FREKVENČNÍ MĚNIČ – ASYNCHRONNÍ ELEKTROMOTOR.....	18
2.1 Měnič frekvence [2,1,5,3,4,11,16].....	18
2.1.1 Přímé měniče frekvence .....	18
2.1.2 Nepřímé měniče frekvence.....	19
2.2 Asynchronní elektromotor [7,5, 3,12,19] .....	27
2.3 Popis funkce a technické možnosti celku [9,2, 3,1,8].....	31
2.3.1 Spojení jednotlivých prvků .....	31
2.3.2 Provozní stavy pohonu .....	31
2.3.3 Způsoby rozběhu motoru a brždění motoru .....	32
2.3.4 Momentová charakteristika pohonu .....	32
2.3.5 Celková účinnost.....	33
2.4 Automatizační vlastnosti a druhy řízení [1,20,8,21].....	34
3 PŘEVODOVKY PRO POUŽITÍ U MANIPULÁTORŮ, ROBOTŮ .....	39
3.1 Vřetenové převodovky [18].....	39
3.2 Šnekové převodovky [12,13].....	40
3.3 Planetové převodovky [13,14,15].....	41
3.4 Cykloidní převodovky [15].....	43
4 POPIS TECHNICKÝCH MOŽNOSTÍ SYSTÉMU POHONU A VZOROVÝCH SESTAV [3,17].....	45
ZÁVĚR .....	47
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	48



SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	50
SEZNAM PŘÍLOH.....	53
SEZNAM TABULEK.....	54
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	55

## ÚVOD

Tato práce se zabývá často používaným systémem pohonu v mnoha technologických celcích a strojích. Zpracování této práce mi dalo příležitost nejen blíže nastudovat problematiku tohoto systému pohonu, ale zároveň nastudovat i část elektrotechnického oboru.

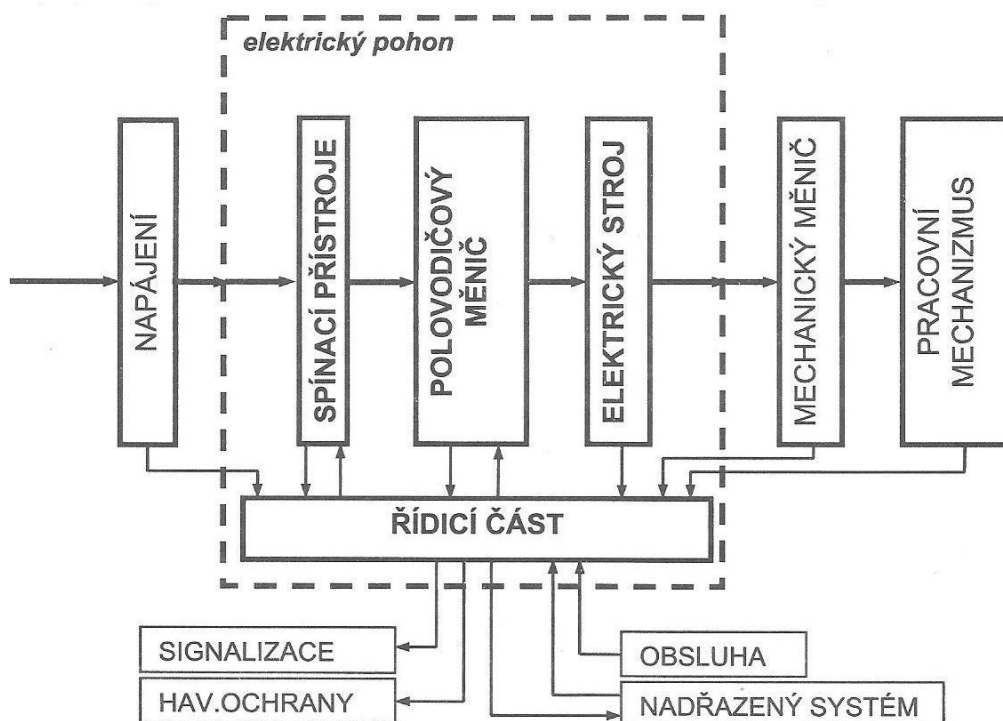
## 1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ELEKTRICKÝCH POHONŮ [1]

System pohonu frekvenční měnič – asynchronní elektromotor je jednou velmi často používanou variantou elektrického pohonu. Prudký vzestup elektrických pohonů nastal v druhé polovině minulého století v souvislosti s rozvojem výkonové polovodičové elektrotechniky, řídicí techniky a mikroprocesorů, od této doby přestává elektromotor představovat hlavní část elektrického pohonu.

### 1.1 Struktura elektrického pohonu

Elektrický pohon se sestává z vhodně zkombinovaných prvků pro přeměnu elektrické energie na mechanickou, prvků vytváření, přenosu a zpracování signálů a prvků řízení, které mají vstupní signály dány obsluhou, nadřazeným regulačním nebo automatizačním členem.

Základní struktura elektrického pohonu je zobrazena na obrázku 1.1.



Obr. 1.1 Základní struktura elektrického pohonu [1]

### 1.2 Výhody a nevýhody elektrického pohonu

Mezi hlavní výhody elektrického pohonu patří:

- Má nízké ztráty naprázdno, vysokou účinnost a vysokou krátkodobou přetížitelnost,
- Má dlouhou životnost a malé nároky na údržbu,
- Technicky je proveditelný pro jakýkoliv výkon, široký rozsah momentů a rychlostí,
- Je ho možno přizpůsobit použití v mnoha odlišných prostředích,
- Není zdrojem emisí nebezpečných látek,
- Lze ho rekuperačně brzdit.

Mezi hlavní nevýhody patří:

- Je závislý na vnějším zdroji elektrické energie, její zálohování je ekonomicky i technicky náročné,
- Má nižší ukazatel poměr výkon k hmotnosti než hydraulický systém pohonu.

### 1.3 Mechanika rotujícího elektrického pohonu

Mechaniku rotujícího elektrického pohonu lze popsat rovnicí vycházející z d'Alembertova principu: „Těleso rotující kolem své stálé osy je v dynamické rovnováze, je-li součet všech momentů na těleso působících roven nule.“

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

kde:  $M_i$  [Nm] - hnací a zátěžné momenty,

$M_d$  [Nm] - dynamický moment.

Tuto rovnici lze řešit jako algebraickou a upravit na tvar:

$$M - M_z = M_d \quad (2)$$

kde:  $M$  [Nm] - hnací moment elektromotoru,

$M_z$  [Nm] - zátěžný moment pracovního mechanismu.

### 1.3.1 Dynamický moment

Vyjadřuje odpor rotujícího tělesa proti změně úhlové rychlosti. V případě konstantního momentu setrvačnosti  $J$  je možno dynamický moment vyjádřit vztahem:

$$M_d = J * \frac{d\Omega}{dt} \quad (3)$$

kde:  $J$  [kg\*m<sup>2</sup>] - moment setrvačnosti soustavy,

$\Omega$  [s<sup>-1</sup>] - úhlová rychlost soustavy,

$t$  [s] - čas.

### 1.3.2 Moment hnací

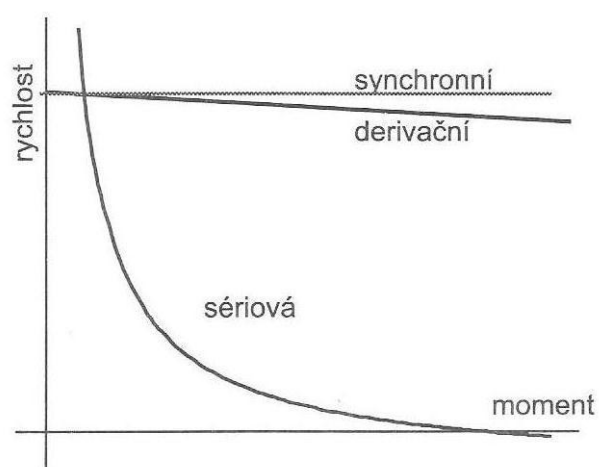
Asynchronní elektromotory mají derivační mechanickou charakteristiku, viz obr. 1.2, kde úhlová rychlost spolu s otáčkami vlivem rostoucího zátěžného momentu mírně klesá podle vztahu:

$$\Omega = \Omega_0 * \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) * M_z \quad (4)$$

kde:  $\Omega_0$  [s<sup>-1</sup>] - počáteční úhlová rychlost,

$\beta$  [-] - „otáčková tvrdost“ motoru,

$M_z$  [Nm] - moment zátěže.

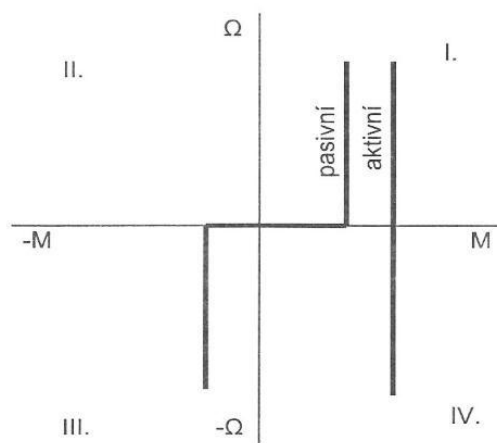


Obr. 1.2 Typické průběhy hnacího momentu [1].

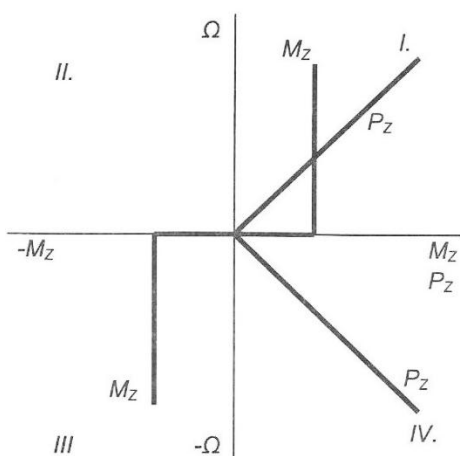
### 1.3.3 Moment zátěžný

U elektrických pohonů se můžeme setkat s celou řadou průběhů mechanických charakteristik zátěžných momentů, často se i mění u jednoho prvku pohonu při změně jeho polohy vzhledem k působení tíhové síly.

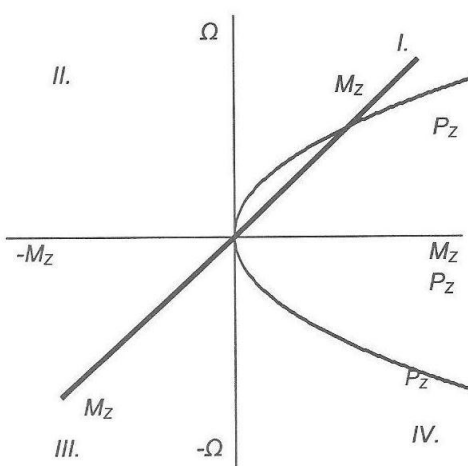
Základní mechanické charakteristiky zátěžných momentů jsou zobrazeny na obrázcích 1.3 -1.8 .



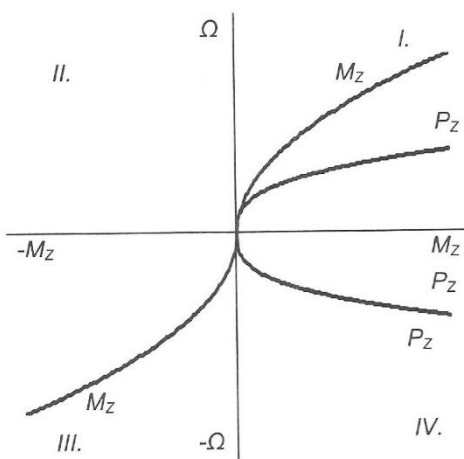
Obr. 1.3 Aktivní a pasivní charakteristika [1].



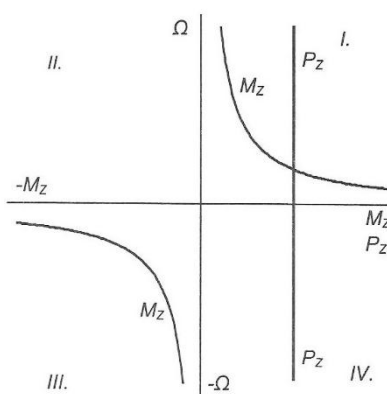
Obr. 1.4 Hoblovková charakteristika [1].



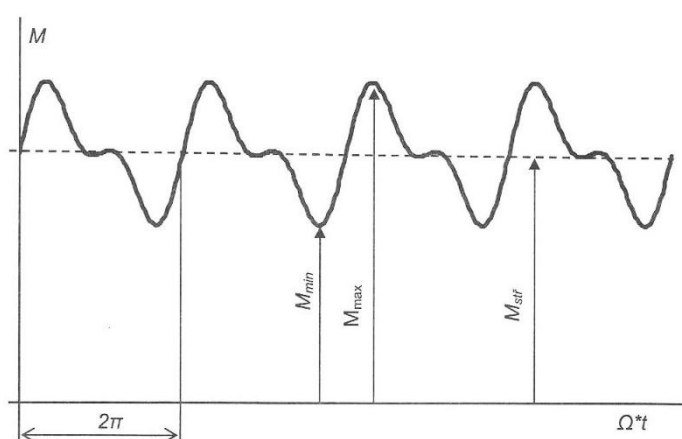
Obr. 1.5 Kalandrová charakteristika [1].



Obr. 1.6 Ventilátorová charakteristika [1].



Obr. 1.7 Naviječková charakteristika [1].



Obr. 1.8 Moment proměnný v čase [1].

#### 1.4 Provozní stavy pohonu

Při provozu pohonu se vyskytují stavy trvalé a přechodné, v trvalých stavech se pohon nachází do té doby, než je vnějším zásahem iniciován přechod do jiného stavu, v přechodných stavech se pohon nachází do doby, než dojde bez vnějšího zásahu k přechodu do stavu trvalého.

Popis jednotlivých stavů je v tabulce č. 1



Tab. 1 Provozní stavy pohonu [1].

Název stavu (česky)	Název stavu (anglicky)	Popis stavu
<b>Klid</b>	Still Stand	Pohon stojí, všechny jeho části jsou bez napětí.
<b>Připraven</b>	Ready	Pohon stojí, ale je připraven k rozběhu, všechna jeho pomocná napětí jsou připojena a pomocné pohony jsou v provozu.
<b>Rozběh</b>	Start	Pohon je připojen na napájecí napětí a probíhá jeho rozběh na provozní rychlost.
<b>Běh (Chod)</b>	Run	Pohon pracuje v provozním pásmu rychlosti.
<b>Doběh</b>	Running down	Pohon byl odpojen od napájecího napětí a dobíhá vlivem pouze přirozených ztrát
<b>Brždění</b>	Braking	Pohon je elektricky nebo mechanicky brzděn.
<b>Havárie</b>	Break down	Pohon je vypnut pro některý z havarijních stavů.

### 1.5 Dimenzování pohonu

Dimenzování pohonu je zaměřeno na jeho provozní vlastnosti a pořizovací cenu. Mezi hlavní provozní vlastnosti patří požadavek přesného řízení otáček, vysoká účinnost a vysoká spolehlivost. Pořizovací cena v sobě zahrnuje i veškeré příslušenství, vybavení měniče, řídicí a regulační prvky. Vedle poddimenzovaného pohonu je chybný i předimenzovaný, u kterého roste dynamický moment při přechodných stavech.

Určení štítkových výkonů jednotlivých komponentů se řídí základními hledisky:

- Dovolené oteplení,
- Momentová přetížitelnost,
- Záběrný proud a proudová přetížitelnost.

## 2 POPIS, FUNKCE A TECHNICKÉ MOŽNOSTI SYSTÉMU FREKVENČNÍ MĚNIČ – ASYNCHRONNÍ ELEKTROMOTOR

### 2.1 Měnič frekvence [2,1,5,3,4,11,16]

První sériově vyráběný měnič kmitočtu pro řízení standardních asynchronních motorů byl vyvinut v roce 1968.

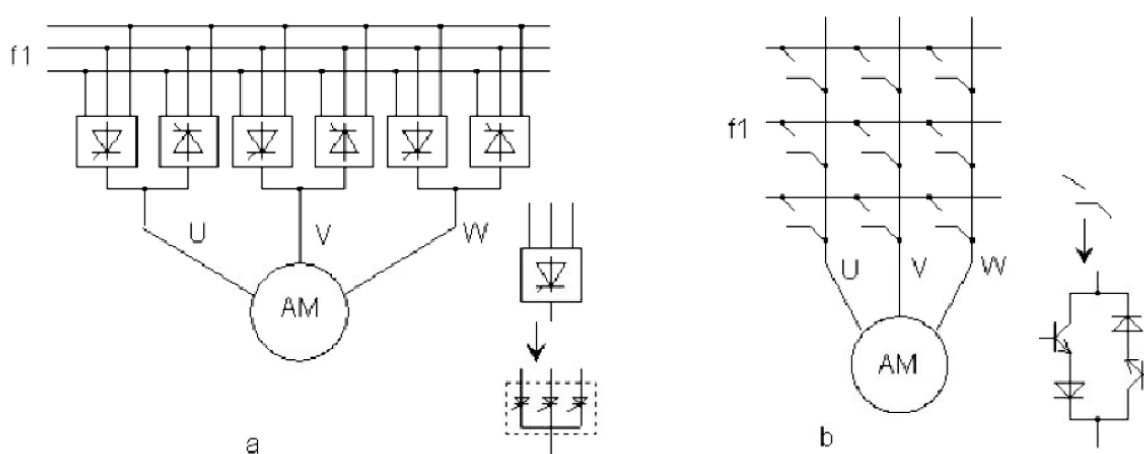
Základní princip funkce měniče frekvence spočívá v tom, že vstupní střídavé napětí o stálé velikosti efektivní hodnoty a stálé frekvenci mění na výstupní střídavé napětí o proměnné velikosti efektivní hodnoty a s proměnou frekvencí.

Měniče frekvence se dělí:

- Přímé - maticové a cyklokonvertory
- Nepřímé

#### 2.1.1 Přímé měniče frekvence

V dnešní době nejsou pro pohon asynchronních elektromotorů používané, cyklokonvertory jsou tvořeny třemi reverzačními tyristorovými usměrňovači, které spínají vstupní frekvenci a umožňují vytvořit výstupní frekvenci do hodnoty cca 40 % vstupní frekvence, maticové měniče obsahují vypínatelné tranzistory nebo GTO tyristory, dokáží vytvořit frekvenci i vyšší než vstupní. Schematicky jsou znázorněny na obrázku 2.1



a) Cyklokonvertor b) Maticový měnič

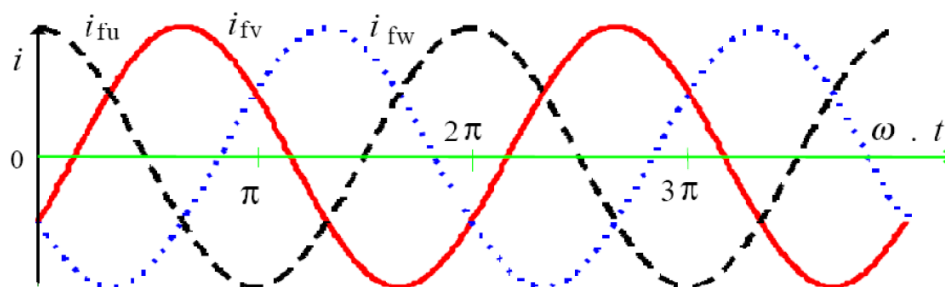
Obr. 2.1 Přímé měniče frekvence [5].

Princip funkce spočívá v tom, že v každé fázi je zapojen reverzační usměrňovač, který je tvořen dvěma antiparalelně zapojenými řízenými usměrňovači, a je řízen tak aby na jeho svorkách bylo střídavé napětí o potřebné amplitudě a frekvenci.

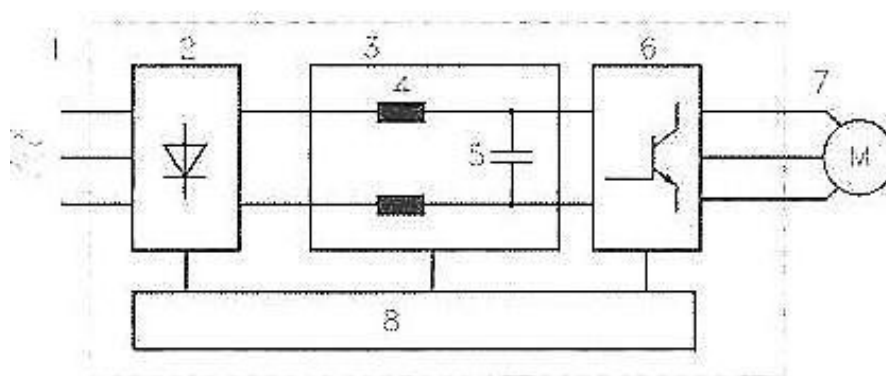
Své uplatnění nacházejí v pomaloběžných pohonech se synchronními motory.

### 2.1.2 Nepřímé měniče frekvence

V dnešní době jsou pro napájení asynchronních elektromotorů nejpoužívanější. Měníče nižších výkonů jsou stavěny pro jednofázové napájení (1 x 220 - 240 V, 48 – 63 Hz) a umožňují používání třífázových asynchronních motorů, i tam kde není k dispozici jiné než zmíněné napájení, měniče vyšších výkonů jsou napájeny z třífázové sítě (zpravidla 3 x 380 - 480 V, 48 - 63 Hz), jejíž průběhy ukazuje obrázek 2.2. Schematicky jsou nepřímé měniče frekvence znázorněny na obrázku 2.3.



Obr. 2.2 Průběhy proudu ve 3 fázové síti [5].



1 – síťové napájení, 2 – usměrňovač, 3 – stejnosměrný meziobvod

4 a 5 – prvky pro vyhlazení SS napájení, 6 – střídač, 7 – výstup,

8 – řízení celého frekvenčního měniče

Obr. 2.3 Nepřímý měnič frekvence [6].

skládají se ze tří základních částí:

- vstupní usměrňovač,
- stejnosměrný meziobvod,
- střídač.

Dále mají měniče standardně integrované řídicí a ovládací prvky.

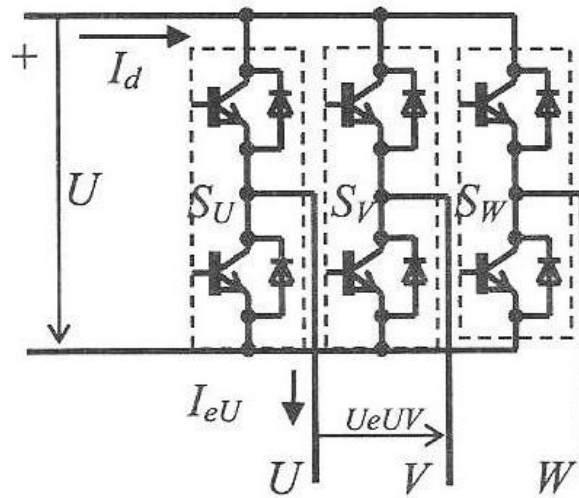
Princip funkce nepřímého měniče frekvence spočívá v tom, že vstupní střídavé napětí je nejprve ve vstupním usměrňovači usměrněno na napětí stejnosměrné buď o konstantní, nebo proměnné velikosti a následně je z něj střídačem vytvořeno výstupní střídavé napětí o požadované efektivní hodnotě a frekvenci.

Vstupní usměrňovač u měničů nižších výkonů bývá neřízený, diodový, poskytuje tedy stejnosměrné napětí o konstantní velikosti, u měničů vyšších výkonů bývá řízený, tvořený vypínatelnými součástkami, tzv. pulzní. Může být v provedení reverzačním, který umožňuje rekuperaci energie, nebo jako nereverzační. Poskytuje stejnosměrné napětí o proměnné velikosti a zároveň dosahuje velmi nízkých hodnot obsahu vyšších harmonických v proudu odebíraném ze sítě a odebírá téměř výhradně činný výkon ( $\cos \varphi = 1$ ).

Stejnosemřrný meziobvod obsahuje kondenzátor, který slouží ke stabilizaci napětí a také prvky s indukční zátěží k vyhlazení průběhu stejnosměrného napětí a napětí odebíraného ze sítě. Jak již bylo zmíněno, pracuje s konstantní, nebo proměnnou velikostí napětí.

Střídač je zdrojem výstupního napětí o proměnné velikosti a frekvenci čehož se dosahuje spínáním jednotlivých vypínatelných výkonových součástí pomocí některé z metod řízení, která pro každý nový takt modulační frekvence určuje tzv. poměrné otevření střídače. Průběh výstupního napětí a proudu je vyhlazován zátěží, případně použitím LC / sinusových filtrů.

Pro pohon asynchronních elektromotorů je nutno použít střídač, který je schopen zajistit komutaci svých součástí, nejběžnější je třífázový střídač na obrázku 2.4, který má šest větví, v každé větvi je vypínatelná součástka s antiparalelně zapojenou diodou, dvě větve tvoří jednu fázi. Vypínatelná součástka a dioda vytváří spínač, dva spínače ve fázi pak přepínač, ten připojuje fázi ke kladnému nebo zápornému přívodu napětí.

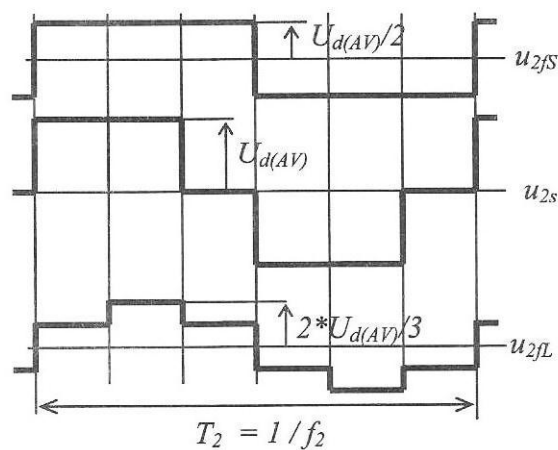


Obr. 2.4 Obvodové schéma třífázového napěťového střídače [1].

Z metod řízení střídačů je používáno obdélníkové řízení a zejména pulzně šířkové řízení.

### Obdélníkové řízení

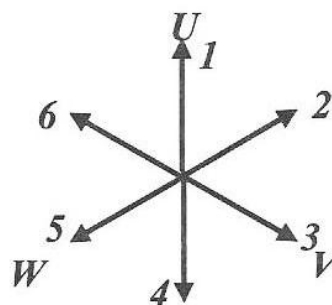
Při obdélníkovém řízení má výstupní fázové napětí ( $u_{2fS}$ ) obdélníkový průběh s amplitudou danou napětím v meziobvodu ( $U_{d(AV)}$ ). Na obrázku 2.5 je znázorněn časový průběh fázového napětí střídače  $u_{2fS}$ , fázového napětí na zátěži  $u_{2fL}$  a sdruženého napětí střídače  $u_{2s}$ , při výstupní frekvenci  $f_2$ .



Obr. 2.5 Časové průběhy při obdélníkovém řízení [1].

Tři přepínače střídače mohou vytvořit 8 různých kombinací sepnutí, prvních šest možností je v tabulce na obrázku 2.6 seřazeno tak aby odpovídalo obdélníkovému řízení, při kterém napěťový vektor, kterým lze nahradit tři fázová napětí v symetrické třífázové síti, postupně ve směru hodinových ručiček prochází po  $60^\circ$  všemi šesti možnostmi. Poslední dvě možnosti sepnutí jsou připojení všech fází k zápornému nebo kladnému pólu.

	$S_U$	$S_V$	$S_W$
1	+	-	-
2	+	+	-
3	-	+	-
4	-	+	+
5	-	-	+
6	+	-	+
7	+	+	+
8	-	-	-



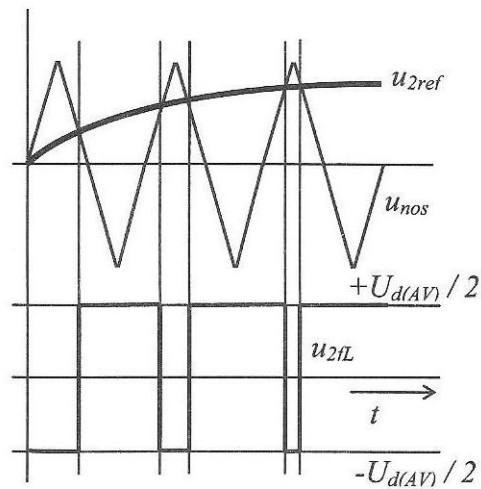
Obr. 2.6 Spínací tabulka a vektorové znázornění spínání [1].

Výhodou tohoto způsobu řízení jsou jednoduché řídicí a výkonové obvody, vysoká 1. harmonická v obdélníkovém průběhu. Nevýhodou je potřeba použití řízeného usměrňovače, vysoký obsah harmonických ve výstupních průbězích a špatné dynamické vlastnosti.

### Pulzně šířkové řízení

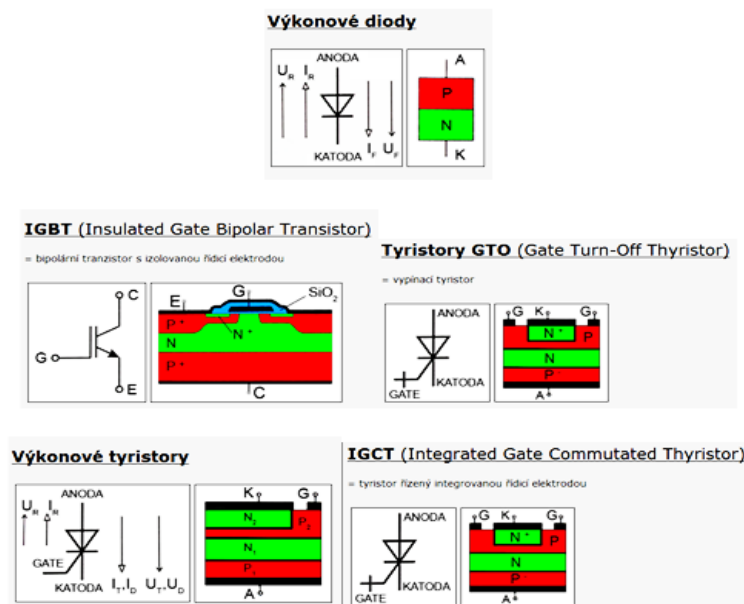
Je pro něj používána zkratka PWM (Pulse Width Modulation). Při tomto způsobu řízení jsou vypínatelné součástky střídače spínány mnohem vyšší frekvencí než u obdélníkového řízení, u měničů frekvence se používá modulační frekvence 2 – 16 kHz. Existují dva přístupy pro určení šířky impulzu, asynchronní metody pracují s konstantní spínací frekvencí, synchronní metody odvozují spínací frekvenci jako násobek výstupní frekvence.

Nejpoužívanější je asynchronní metoda: Suboscilační modulace, je znázorněna na obrázku 2.7, kde se okamžitá hodnota žádaného napětí, neboli referenčního napětí  $u_{2ref}$ , porovnává s okamžitou hodnotou nosného signálu  $u_{nos}$ , který má pilovitý tvar a jeho frekvence je násobně vyšší, je dána možnostmi výkonových součástek. Průsečíky obou signálů určují okamžiky přepnutí spínače dané fáze. Střední hodnota dvou sousedních pulzů odpovídá střední hodnotě žádaného výstupního napětí. Referenční signál  $u_{2ref}$  se upravuje od žádaného signálu na zvýšení obsahu 1. harmonické ve výstupních průbězích.



Obr. 2.7 Suboscilační modulace [1].

Ve vstupním usměrňovači jsou jako výkonové součástky použity zpravidla robustní diody a tyristory. Střídače používají zpravidla jako výkonové součástky IGBT tranzistory. Výkonové součástky znázorňuje obrázek 2.8.



Obr. 2.8 Výkonové součástky [4].

Dioda je dvouvrstvá nelineární polovodičová součástka obsahující jeden PN přechod, základní požadavky na diody jsou vysoké závěrné napětí, nízké propustné napětí a rychlý přechod ze závěrného do propustného stavu.

Tyristor je součástka složená ze čtyř vrstev polovodiče, může se nacházet ve třech stavech, závěrném, blokovacím a propustném.

GTO tyristor je čtyřvrstvá polovodičová součástka, která je pomocí kladného řídicího signálu zapnuta, pomocí záporného řídicího signálu vypnuta, spínací frekvence je do 2 kHz.

IGCT tyristor vychází z GTO tyristoru, má integrovanou zpětnou diodu a řídicí obvod je integrován co nejblíže k silovému obvodu, jedná se v podstatě o extrémně rychle spínaný tyristor GTO.

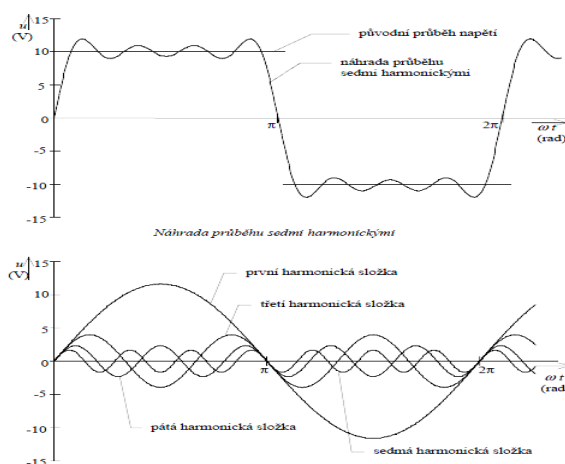
IGBT tranzistor je v současnosti ve výkonových měničích nejpoužívanějším prvkem, je to bipolární tranzistor s izolovanou řídicí elektrodou, umožňuje dosáhnout velmi vysoké spínací frekvence.

Nepříznivou vlastností měničů frekvence jsou neharmonické průběhy proudu a napětí na výstupu i odebíraného z napájecí sítě a dále elektromagnetické rušení, tzv. RFI (Radio frequency interference).

K určení vlivu působení na napájecí síť v podobě zkreslení sinusového průběhu napětí se používá veličina THD (Total Harmonic Distortion), představující podíl výkonu složek vyšších harmonických k výkonu 1. harmonické, resp. napětí nebo proudu. Vysoký podíl harmonických v napájecí síti může nepříznivě ovlivňovat další připojená zařízení. [11]. THD u měničů frekvence se v souladu s EN/IEC61000-3-12 a úrovním dle IEE 519 pohybuje do 5%. K potlačení THD slouží cívky použité v meziobvodu měniče, snižují původní podíl o cca 40 %. Příklad neharmonického průběhu a jeho náhrady je na obrázku 2.9.

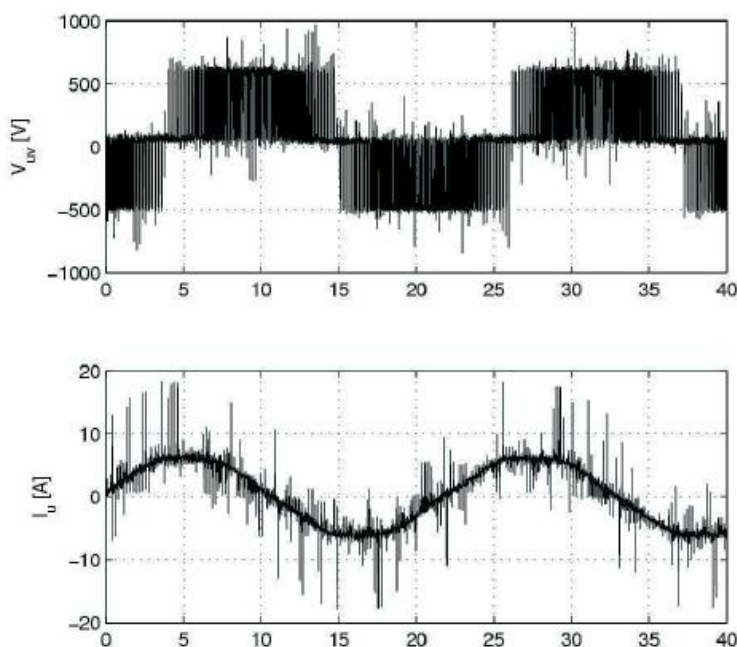
Proti elektromagnetickému rušení měniče standardně obsahují RFI filtry, díky nimž splňují podmínky normy pro elektromagnetickou kompatibilitu EN 55011-1A (průmyslové prostředí), volitelně je za splnění určitých parametrů připojení lze doplnit RFI filtry splňující EN 55011-1B (veřejná rozvodná síť). Tato norma postihuje rušení přenášené kabelem v rozsahu frekvence 150 kHz – 30 MHz a vysíláním v rozsahu frekvencí 30 MHz až 1 GHz.



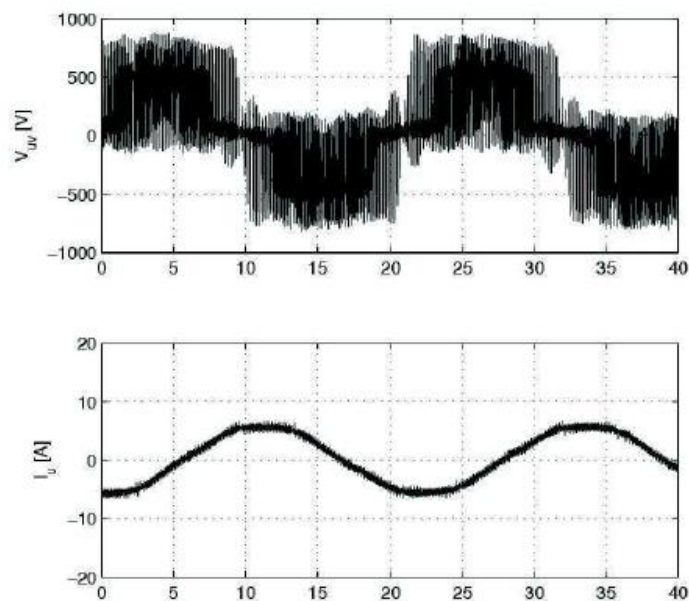


Obr. 2.9 Náhrada obdélníkového průběhu řadou vyšších harmonických [16].

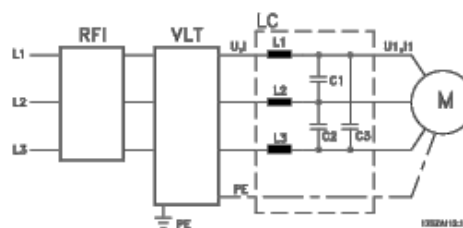
Neharmonické průběhy na výstupu měniče způsobují pokles výkonu, životnosti a také vznik typického akustického hluku motoru, což se řeší vložením LC / sinusového filtru, který rovněž redukuje  $du/dt$  napětí, také špičkové napětí  $u_{\text{peak}}$  a zvlněný proud  $\Delta I$  na vstupu do motoru, který pak má téměř sinusový průběh. (viz obr. 2.10, 2.11). Celkové uspořádání měniče je patrné z obr. 2.12



Obr. 2.10 Průběhy bez LC,  $du/dt$  filtru [2].



Obr. 2.11 Průběhy s LC,du/dt filtrem [2].



VLT – měnič frekvence

Obr. 2.12 Uspořádání měniče [2].

Technické parametry měničů se liší dle výrobců, zpravidla jsou v modulárním provedení s možností montáže vedle sebe a vzájemného propojení.

Základní stupeň krytí je IP 20, ale jsou i provedení ve stupni IP 56 nebo 67.

Rozsahy výkonů nízkonapěťových (do 1000 V) se pohybují od stovek W do cca 1,2 MW. Vysokonapěťové měniče se vyrábějí až do výkonu 120 MW.

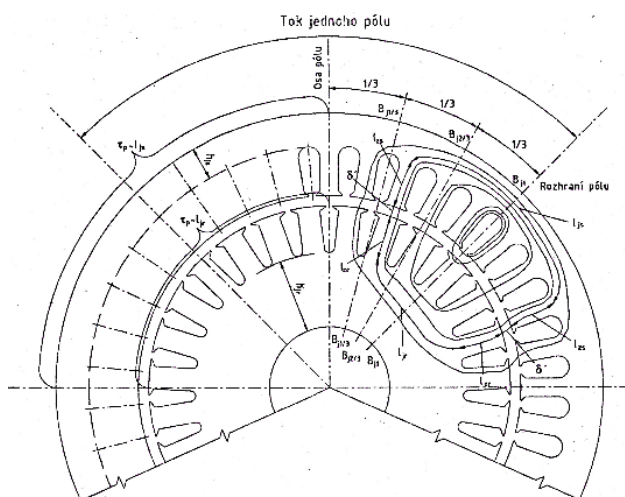
Rozsahy výstupní frekvence od 0 do 650 – 1000 Hz, avšak při použití LC/du/dt filtru je rozsah omezen pouze od 0 do 120 Hz.

Rozlišení výstupní frekvence dosahuje vesměs 0,01 Hz

Účinnost měniče se pohybuje v rozmezí 95 – 98 %, účinník je zpravidla  $\geq 0,95$

## 2.2 Asynchronní elektromotor [7,5, 3,12,19]

Asynchronní elektromotor je nejpoužívanějším elektrickým točivým strojem, který se používá už déle než 100 let, v průběhu jeho vývoje klesl poměr hmotnost / výkon z původních cca 88 kg/kW na současných přibližně 6 – 10 kg/kW, vyniká svojí konstrukční jednoduchostí, vysokou účinností a bezporuchovým chodem i v těžkých provozních podmínkách. Princip činnosti tohoto motoru je založen na silovém působení točivého magnetického pole statoru a rotoru. Jednotlivé cívky statoru jsou prostorově posunuty o 120° elektrických (120° mechanických / počet pólových párů) a napájeny ze symetrické třífázové sítě. Jeho název je odvozen od skutečnosti, že jeho rotor se otáčí oproti otáčkám točivého statorového pole pomaleji, s tzv. skluzem, který u menších strojů dosahuje až 10% u větších pak jednotek %. Někdy bývá také nazýván indukčním strojem, neboť jeho funkce je založena na indukci proudu v jeho rotoru, který není se státorem elektricky spojen, točivý moment je vyvozen magnetickým tokem přes vzduchovou mezeru, jak znázorňuje obrázek 2.13.



Obr. 2.13 Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru [7].

Otáčky motoru se řídí vztahem:

$$n = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s) \quad (5)$$

$n$  – otáčky motoru [ $\text{min}^{-1}$ ]

$f_1$  – napájecí frekvence [Hz]

$p$  – počet pólových párů vinutí motoru [-] {1,2,3,4}

$s$  – skluz [-]

Z tohoto vztahu jsou zřejmé možnosti řízení otáček:

- Změnou skluzu,
- Změnou počtu pólových dvojic,
- Změnou napájecí frekvence.

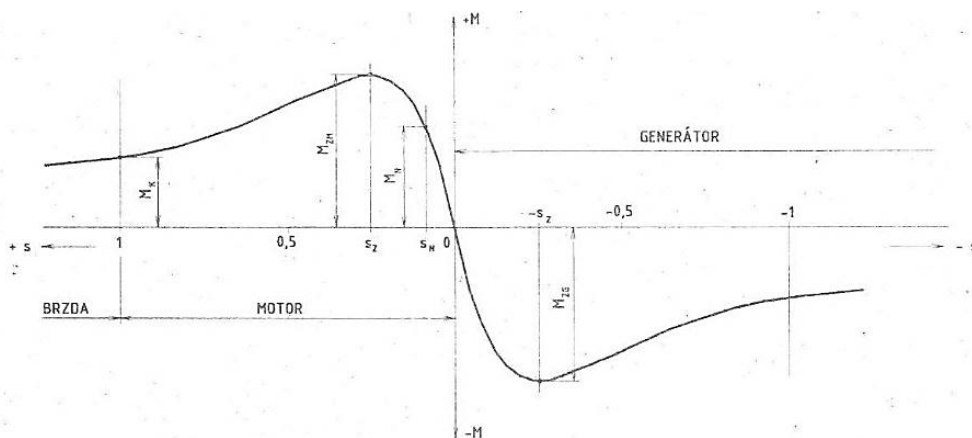
Řízení otáček změnou skluzu je možné u motorů s kotvou kroužkovou, kdy je do obvodu rotoru zařazován odporový prvek různé hodnoty, jedná se o skokovou a ztrátovou regulaci otáček.

Změnou počtu pólových dvojic je možné řídit otáčky u speciálně konstruovaných motorů – víceotáčkových - přepínatelných, na trhu jsou běžně k dispozici pouze motory dvouotáčkové s poměrem otáček 1 : 2.

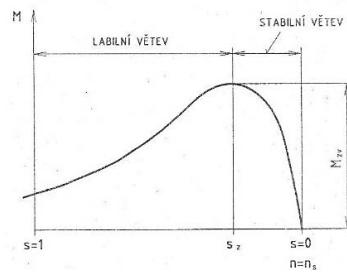
Řízení otáček změnou napájecí frekvence je možné s použitím frekvenčního měniče jako zdroje napětí, jedná se o téměř plynulou a bezztrátovou regulaci otáček, maximální přípustná frekvence udávaná výrobcem motorů je různá podle počtu pólových dvojic vinutí a momentové třídy v rozpětí od 80 do 200 Hz.

Asynchronní elektromotor může trvale pracovat pouze v úzkém rozpětí skluzu, může pracovat i v generátorickém provozu a také jako brzda. Průběh momentové charakteristiky pro všechny oblasti provozu je na obrázku 2.14, na obrázku 2.15 pak rozlišení stabilní a labilní větve.

Důležitou vlastností je, že rozběh motoru je možný i se zatížením, které může dosahovat i 1,6 násobek nominálního momentu motoru.



Obr. 2.14 Momentové charakteristika [7].



Obr. 2.15 Stabilní a labilní větev [7].

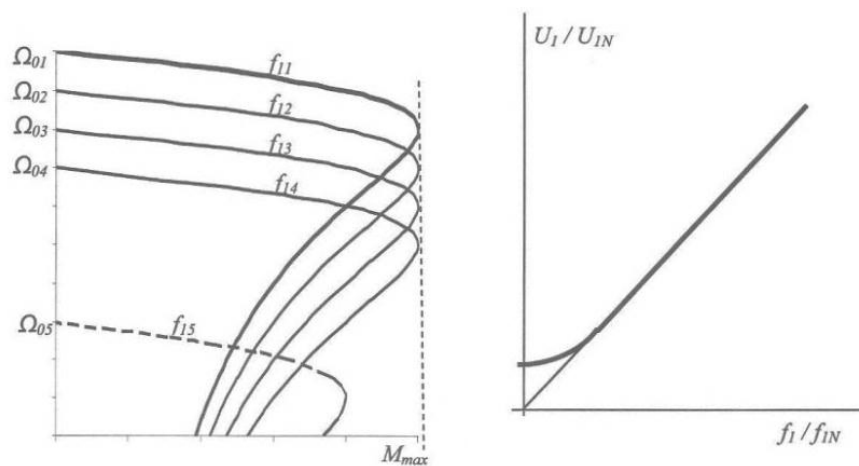
Jmenovitý kroutící moment na hřídeli se vypočte podle vzorce:

$$M = 9,55 * P * \frac{1000}{n} \quad (6)$$

$P$  – jmenovitý výkon [kW]

$n$  – otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]

Při napájení asynchronního elektromotoru z měniče frekvence se při zachovaném poměru  $U/f$  jeho momentová charakteristika posouvá v rovině  $M - \Omega$  ve směru osy  $\Omega$  a velikost maximálního momentu zůstává nezměněna, současně zůstává stejná i směrnice jeho průběhu. Na obrázku 2.14 by se osa  $\Omega$  překrývala s osou skluzu, přičemž při skluzu  $s = 1$  jsou otáčky nulové a při  $s = 0$  jsou otáčky rovné synchronním otáčkám pro danou frekvenci. V nízkých hodnotách je nutno vzhledem u úbytku napětí na statorových vinutích podíl napětí mírně navýšit. Posun mechanických charakteristik při frekvenčním řízení a kompenzace úbytku napětí je znázorněna na obrázku 2.16.



Obr. 2.16 Posun mechanických charakteristik a kompenzace úbytku napětí [1].

Při zvyšování napětí nad hodnotu nominálního dojde k tzv. přebuzení stroje a maximální moment je pak vyšší než udávaný, tuto oblast provozu je však možné využívat pouze po velmi omezenou dobu. Při zvyšování pouze frekvence při konstantním napětí dochází k jeho tzv. odbuzení, lze zvyšovat otáčky elektromotoru i nad hodnotu otáček nominálních až do hodnoty maximálních dovolených otáček a jeho maximální moment klesá nepřímo úměrně s kvadrátem frekvence, mění se i směrnice průběhu momentu, neboť hodnota skluzu zvratu zůstává stejná.

Dvoupólové motory jsou vhodné pouze pro zvláštní případy s krátkodobým provozem, běžně používané jsou stroje čtyřpólové a šestipólové. Ve většině běžných aplikací jsou přednostně používány standardní velkosériově vyráběné stroje.

Nízkonapěťové (do 1000 V) asynchronní motory s kotvou na krátko se vyrábějí v základním a několika odvozených provedeních zahrnujících integrované prvky další výbavy s možností doplnění dalších prvků, mezi něž patří zejména snímače otáček a prvky tepelné ochrany motoru.

Rozsahy výkonů standardních nízkonapěťových motorů se pohybují od 0,06 kW do 315 kW. Zvláštní provedení mohou dosahovat velice rozdílných výkonových parametrů, jako příklad lze uvést motor pro pohon turbokompresoru, který při výkonu 233 kW dosahuje otáček  $40\,000\text{ min}^{-1}$  při nominální frekvenci 680 Hz.

Účinnost se pohybuje v širokém rozpětí od 39 % do 95 %, roste přímo úměrně s výkonem, účinník se pohybuje v rozmezí 0,66 až 0,91.

V základním provedení je možno volit provedení skříně patkové, patkopřírubové nebo přírubové. Stupeň krytí je IP 55, s vlastním povrchovým chlazením, pro trvalé zatížení, pro provoz do 1000 m nad mořem, pro teplotu okolí  $-20\text{ °C}$  až  $+40\text{ °C}$  a pro jmenovitá napětí do 3 kW – 230 V  $\Delta$  / 400 V Y, 50 Hz, nad 3 kW 400 V  $\Delta$  / 690 V Y.

Odvozená provedení jsou například:

- Motory s cizím chlazením, které je užitečné zejména při provozu při nižších otáčkách, při vyšších otáčkách nad 50 Hz snižuje hluk motoru oproti vlastnímu chlazení,
- Motory bez vlastního ventilátoru,
- Motory vestavné,

- Motory v zajištěném provedení, pro provoz v potenciálně výbušném prostředí,
- Motory se zvýšeným výkonem, se zvýšenou účinností,
- Motory pro použití ve ztížených klimatických podmínkách,
- Motory brzdové, které jsou vybaveny elektromagnetickou jednokotoučovou brzdou, ta motor zastaví při výpadku napětí, eventuálně může být ovládána ručně,
- Motory jednofázové,
- Motory pro provoz s frekvenčními měniči, mají zesílené provedení izolace a jsou schopné provozu v rozmezí napětí 500 až 690 V.

### **2.3 Popis funkce a technické možnosti celku [9,2, 3,1,8]**

Z dříve popsaných vlastností jednotlivých částí plyne, že v širokém použití pro trvalý provoz je vhodné tento systém používat v rozsahu frekvencí 5 – 120 Hz a získat tak systém pohonu s téměř plynule měnitelným převodovým poměrem v rozsahu 1 : 1 až 1 : 24.

#### **2.3.1 Spojení jednotlivých prvků**

Základním kritériem volby měniče pro daný asynchronní elektromotor je požadavek, aby jmenovitý výstupní proud měniče byl stejný nebo vyšší než jmenovitý proud motoru.

Pro připojení motorů k frekvenčnímu měniči je možno použít nestíněné motorové kabely o délce až 200 m, stíněných – pancéřovaných dlouhých až 100 m, při používání LC / sinusových filtrů se tato délka snižuje na 50 m respektive 25 m. Je tak možno měniče umístit společně v odděleném prostředí od pracovního prostoru motoru, vždy je však nutno použít maximální možný průřez vodičů.

#### **2.3.2 Provozní stavy pohonu**

Pohon může v průběhu své pracovní činnosti nabývat v zásadě dvou stavů a to provoz motoru a brzdy – generátoru v  $M - \omega$  charakteristice vyjádřeno na obrázku 2.17



Obr. 2.17 Provozní stavy pohonu [1].

### 2.3.3 Způsoby rozběhu motoru a brždění motoru

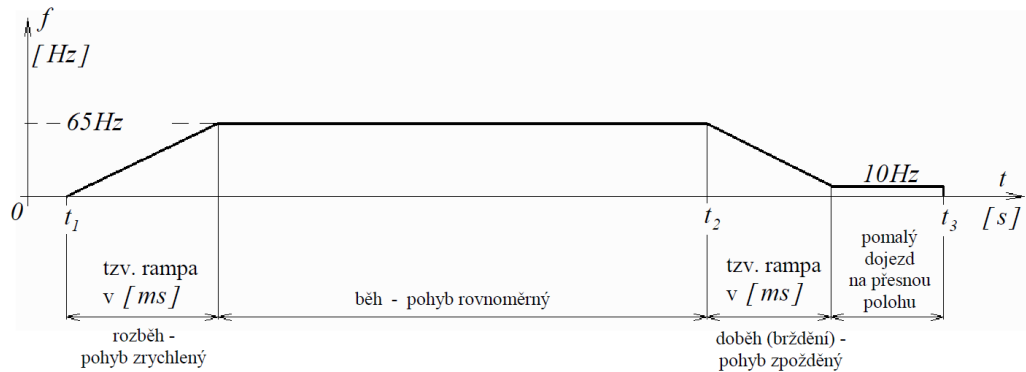
Při použití frekvenčního měniče se také řeší problematika rozběhu motoru a zejména proudového nárazu do napájecí sítě rozběhem s nižším napětím.

Frekvenční měniče umožňují brždění motoru stejnosměrným napětím, což se spíše používá pro aretaci polohy rotoru, pro zpomalování se využívá generátorické brždění, při kterém se frekvence postupně snižuje a tím se motor dostane do generátorického stavu a měnič tento stav udržuje až do zastavení rotoru. Generátorické brždění s sebou nese přetěžování stejnosměrné části měniče což se řeší použitím brzdných rezistorů, ve kterých se tato energie maří na teplo, vyspělejší systémy získanou energii rozstřídají a vrátí do sítě, eventuálně ji sdílejí s dalšími pohony ve stejnosměrné podobě. To s sebou přináší výraznou úsporu energie.

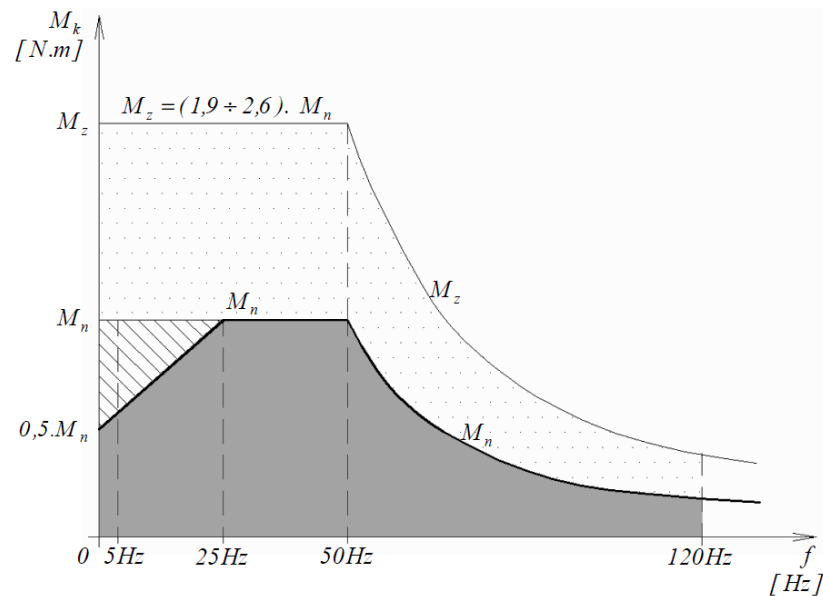
### 2.3.4 Momentová charakteristika pohonu

Při práci pohonu řízeného frekvenčním měničem lze poměrně snadno dosáhnout velké variability průběhu rychlostí a momentů i v průběhu jednoho pracovního pohybu, kdy je třeba při dopravě nebo manipulaci s materiálem dodržet pomalé, plynulé rozjezdy a zpomalení, na obrázku 2.18 je znázorněn příklad programování frekvenčního měniče při typickém průběhu pracovního pohybu. Obrázek 2.19 znázorňuje průběh využitelného momentu pohonu, provoz ve šrafované oblasti je možný buďto krátkodobě, nebo je podmíněn použitím cizího chlazení, provoz v tečkované oblasti je možný pouze krátkodobě (cca 2 sekundy).





Obr. 2.18 Příklad programování frekvenčního měniče [9].



Obr. 2.19 Momentová charakteristika motoru při řízení frekvenčním měničem [9].

### 2.3.5 Celková účinnost

Celková účinnost popisovaného systému pohonu bez využití rekuperace energie se dá uvažovat jako součin jednotlivých účinností podle vzorce:

$$\eta_c = \eta_{am} * \eta_{mf} \quad (7)$$

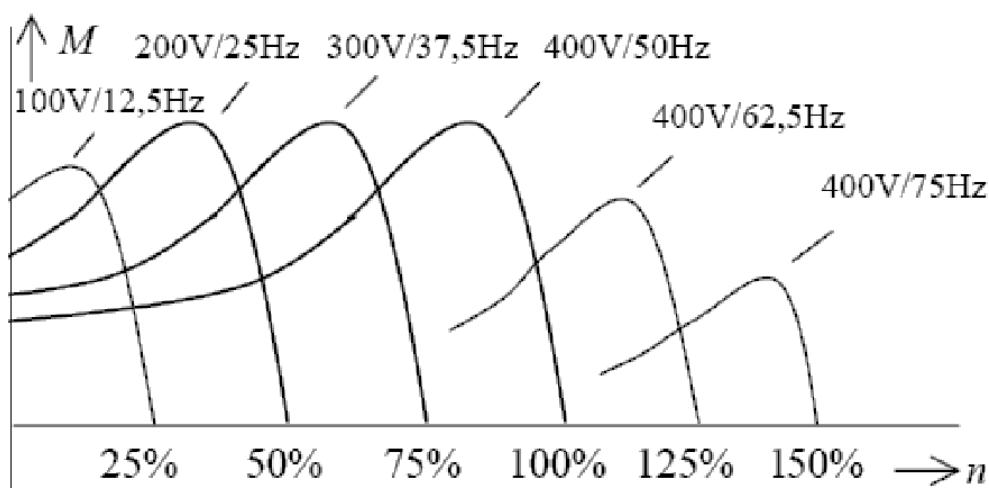
$\eta_c$  – celková účinnost,  $\eta_{am}$  – účinnost asynchronního motoru,  $\eta_{mf}$  – účinnost měniče frekvence,

Vzhledem k velkému rozpětí účinností asynchronních elektromotorů se podle velikosti výkonu může pohybovat v rozpětí 33 až 93 %.

## 2.4 Automatizační vlastnosti a druhy řízení [1,20,8,21]

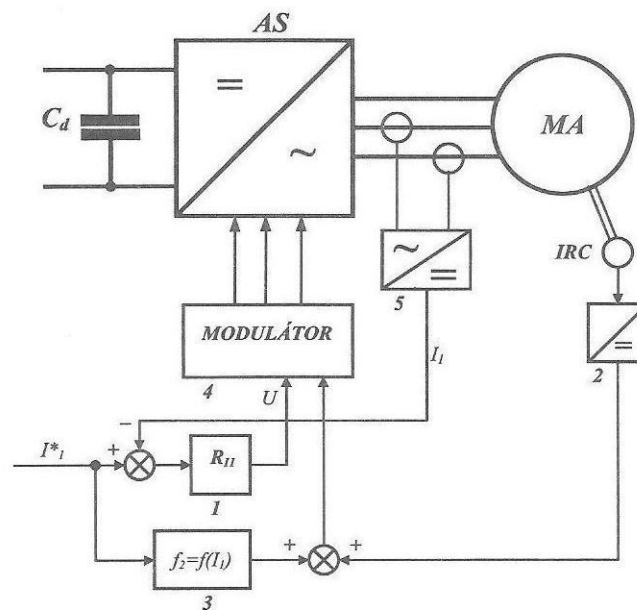
Druhy řízení motorů frekvenčním měničem:

- **Skalární**, existuje řada různých možností, typickým příkladem je kmitočtové-proudové řízení, spočívá v regulaci konstantního magnetického toku v motoru, jedná se o poměrně jednoduchou metodu, používá se stálého poměru napětí a frekvence s výjimkou nízkých frekvencí, kde je nutno vzhledem ke ztrátám navýšit napětí (viz obrázek 2.16), velmi často je používáno bez zpětné vazby za cenu nižší přesnosti (cca 90 %), kterou lze zvýšit zavedením zpětné vazby s použitím PI regulátoru avšak ani tak dynamické vlastnosti pohonu nedosahují vlastností dalších způsobů řízení. V současné době se používá pouze v dynamicky nenáročných aplikacích jako je pohon čerpadel nebo ventilátorů. Obrázek č. 2.20 ukazuje momentovou charakteristiku při skalárním řízení.



Obr. 2.20 Momentová charakteristika při skalárním řízení [8].

Na obrázku 2.21 je blokové schéma kmitočtově-proudového skalárního řízení. Vstupní žádanou veličinou je žádaná hodnota statorového proudu, ta je porovnávána se skutečnou hodnotou a výsledkem je signál  $U$  pro modulátor řídicí střídač. Snímač otáček  $IRC$  určuje skutečnou úhlovou rychlost  $\Omega$  a převádí ji na signál  $f_1$ , pomocí nelineární transformace je určena rotorová frekvence  $f_2 = f(I_1)$ , součet  $f_1$  a  $f_2$  tvoří signál  $f$ , který je také vstupním signálem modulátoru.

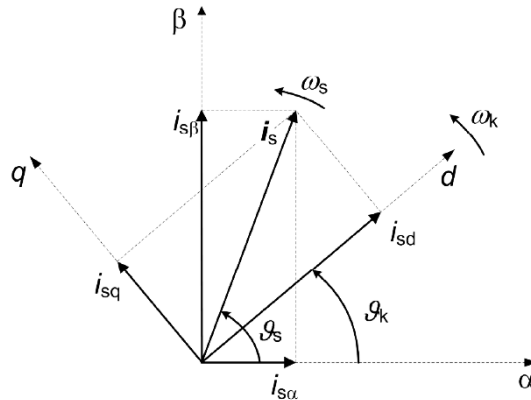


Obr. 2.21 Blokové schéma kmitočtově-proudového skalárního řízení [1].

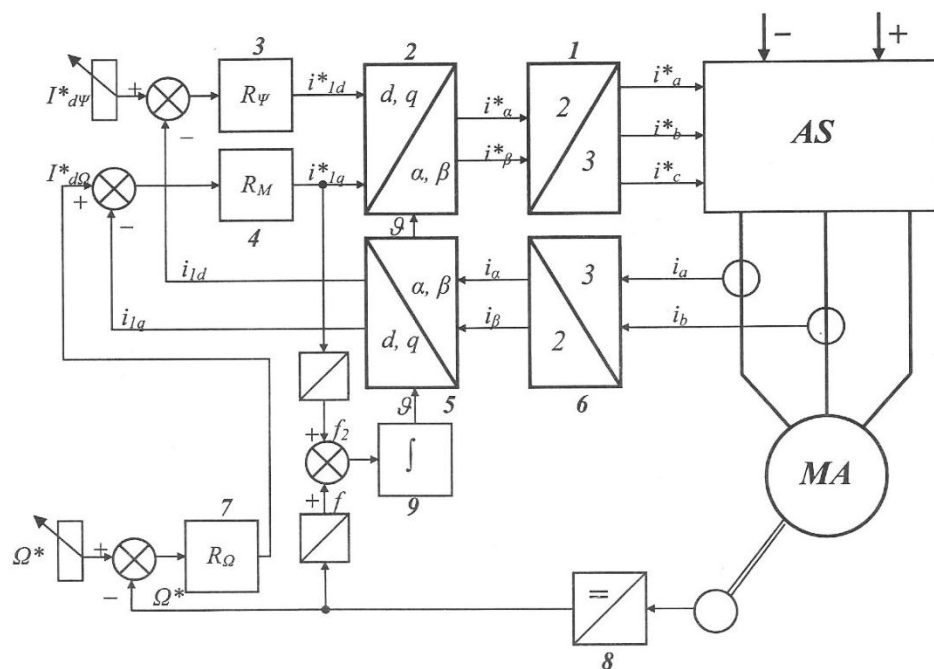
- Vektorové**, je nejdokonalejší způsob řízení, který vychází z fyzikálního základu činnosti elektrického stroje. Je to způsob řízení orientovaného podle vektoru spřaženého magnetického toku. Podstatou je rozklad statorového proudu  $i_l$  do dvou složek  $i_{ld}$  a  $i_{lq}$  souřadného systému os  $d$  a  $q$ , které se otáčejí synchronně s točivým magnetickým polem (viz obr. 2.22) a jejich oddělené řízení, z těchto dvou složek lze určit okamžitou velikost elektromagnetického momentu. Složka  $i_{ld}$  je svázána se spřaženým magnetickým tokem v motoru a proto se pro ni užívá název „tokotvorná složka“ Složka  $i_{lq}$  je svázána s činným výkonem a tedy i momentem motoru, používá se pro ni název „momentotvorná složka“ Pro dosažení okamžité změny elektromagnetického momentu stroje musí být změněny: Velikost složky  $i_{lq}$ , frekvence a úhel natočení vektoru statorového proudu.

Metody vektorového řízení jsou přímé a nepřímé. Metody přímé předpokládaly přímé měření magnetického toku pomocí Hallových sond založených ve vzduchové mezeře, pro technickou náročnost se dnes nepoužívají. Nepřímé metody určují magnetický tok nepřímou, jsou to metody s čidlem rychlosti rotoru, a metody s čidly napětí, které současně snímají sdružená napětí, sdružené proudy a rekonstruují polohu osy  $d$ . Nevýhodou metod s čidlem rychlosti rotoru jsou vysoké nároky na přesnost čidla rychlosti rotoru. Podle dominantního akčního členu regulace

rozeznáváme vektorovou regulaci proudového typu nebo vektorovou regulaci napěťového typu, jejich strukturální schémata jsou na obrázcích 2.23 a 2.24.

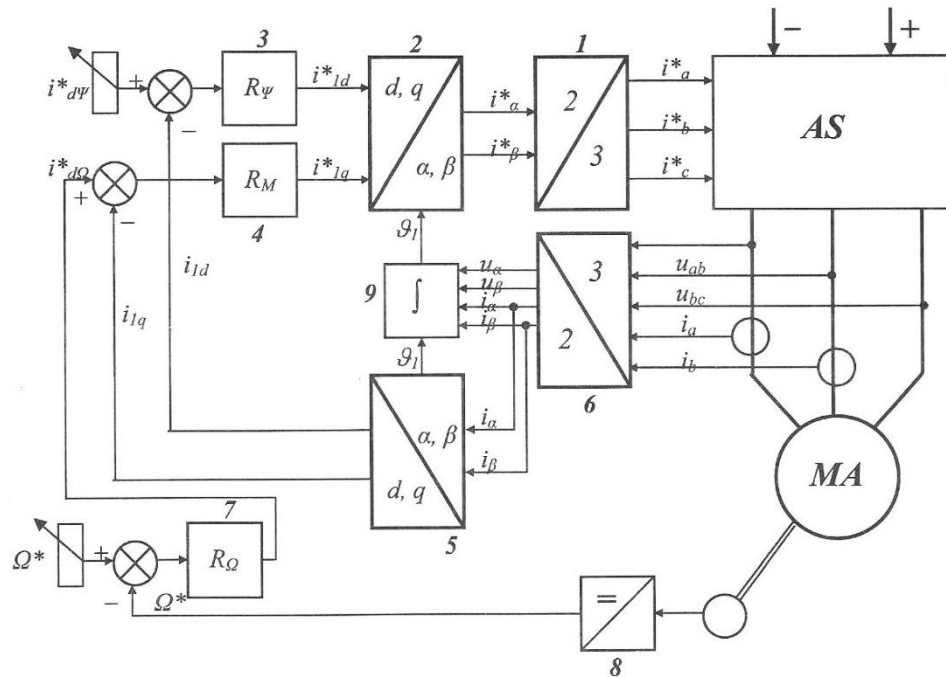


Obr. 2.22 Zobrazení prostorového vektoru proudu ve stojící a rotující soustavě [21].



Na hřídeli asynchronního motoru je čidlo rychlosti otáčení IC, které přes blok 8 vytváří výstupní signál  $f$ , úměrný skutečné otáčivé rychlosti  $\Omega$ . Ve dvou fázích přívodu ke statorovému vinutí jsou zapojena čidla proudů s výstupními signály  $i_a$  a  $i_b$ . Ty se v bloku 6 transformují z třífázového systému  $a, b, c$  do systému  $\alpha, \beta$  podle transformačních rovnic. Výstupem bloku 6 jsou dva signály  $i_\alpha$  a  $i_\beta$ . V bloku 5 je prováděna transformace ze systému  $\alpha, \beta$  do systému  $d, q$ . Pro tuto transformaci je nutno znát okamžitý úhel  $\vartheta_{ad}$  mezi polohou osy  $d$  a  $\alpha$ . Ten získáme výpočtem podle metody založené na integraci součtu signálu  $f$  a žádané rotorové frekvence  $f_2$  v bloku 9. Výstupem bloku 5 jsou dva signály úměrné složkám statorového proudu  $i_{1d}$  a  $i_{1q}$ . Tyto signály jsou skutečnými hodnotami pro dva regulátory. Regulátor momentu  $R_M$  v bloku 4 reguluje momentotvornou složku proudu  $i_{1q}$  podle žádané hodnoty  $I_{d\Omega}^*$ . Podobně regulátor magnetického toku  $R_\psi$  v bloku 3 reguluje tokotvornou složku proudu  $i_{1d}$  na konstantní hodnotu podle žádané hodnoty  $I_{d\psi}^*$ . Tato koncepce dovoluje nastavit různé parametry každého regulátoru. Výstupní signály obou regulátorů jsou zpětně transformovány v bloku 2 do os  $\alpha$  a  $\beta$  a v bloku 1 do třífázového systému os  $a, b, c$ . Výstupy bloku 1 jsou vedeny do modulátoru střídače AS. Žádaná hodnota momentotvorné složky  $I_{d\Omega}^*$  je výstupem nadřazeného regulátoru rychlosti  $R_\Omega$  v bloku 7.

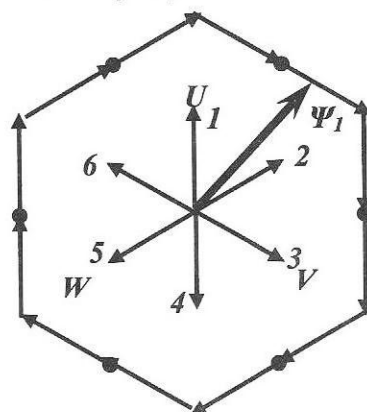
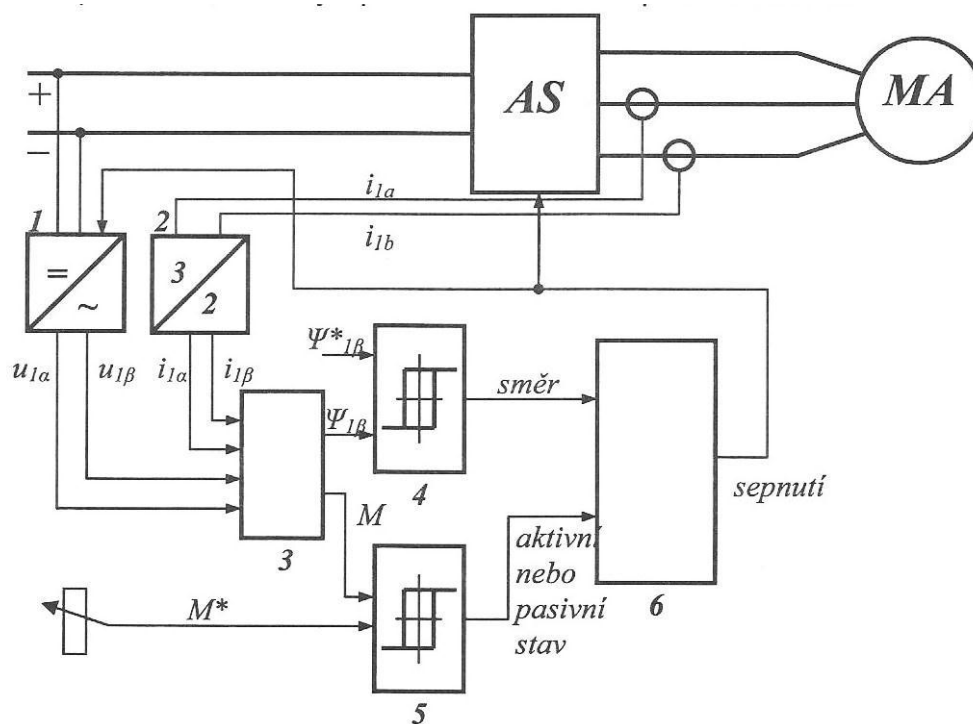
Obr. 2.23 Strukturální schéma vektorového řízení s čidlem otáček [1].



Kromě čidel proudů  $i_a$ ,  $i_b$  se pro řízení snímají ještě dvě sružená napětí  $u_{ab}$ ,  $u_{bc}$ . Okamžitý úhel  $\vartheta_{ad}$  se vypočte rekonstrukcí. Čidlo otáček IC slouží pouze pro měření skutečné otáčivé rychlosti  $\Omega$  a požadavky na jeho přesnost jsou podstatně mírnější než u předchozí metody.

Obr. 2.24 Strukturální schéma vektorového řízení s čidly napětí [1].

- Přímé řízení momentu**, označovaná jako DTC (Direct Torque Control), je jedna z nejmodernějších metod, byla poprvé popsána v roce 1985. Pracuje se při ní s transformací souřadnic  $a$ ,  $b$ ,  $c$  do stojících os  $\alpha$  a  $\beta$ , reguluje se přímo okamžitá velikost momentu v tolerančním pásmu  $\Delta M$  a pohyb vektoru statorového magnetického toku  $\Psi_l$  po předepsané trajektorii, nejčastěji po obvodu šestiúhelníku (obr. 2.25). Regulátor pohonu má poměrně jednoduchou strukturu, jeho blokové schéma je na obrázku 2.26. Potřebné údaje jsou rekonstruovány ze sružených napětí  $u_{ab}$ ,  $u_{bc}$  a proudů  $i_a$ ,  $i_b$ . Pro tuto metodu je nezbytné mít k dispozici přesný matematický model motoru, který se získává při identifikačním běhu v průběhu instalace motoru do pohonu. Toto řízení vyžaduje výkonný signálový mikroprocesor, dosahuje velmi dobrých výsledků pro dynamicky náročné aplikace, horších pak pro oblast nízkých otáček a reverzace běhu.

Obr. 2.25 Pohyb vektoru  $\Psi_1$  při přímém řízení [1].

Obr. 2.26 Blokové schéma regulátoru přímého řízení momentu [1].

### 3 PŘEVODOVKY PRO POUŽITÍ U MANIPULÁTORŮ, ROBOTŮ

Na převodovky z hlediska pohonů robotů a manipulátorů je kladeno mnoho požadavků. Zejména následující:

- Vysoký převodový poměr,
- Malá hmotnost a modul setrvačnosti,
- Malá provozní vůle a hystereze polohy,
- Vysoká přetížitelnost,
- Snadná zástavba do systému pohonu.

Technické vlastnosti jednotlivých druhů převodovek [10,3]

Převodový poměr lze volit dle požadavku na vlastnosti manipulátoru s ohledem na použitý typ elektromotoru a frekvenčního měniče. Maximální rychlosti pohonů robotů renomovaných výrobců se obvykle pohybují v rozpětí 60 až 720  $^{\circ}\text{s}^{-1}$ , to odpovídá 10 až 120 otáček $\cdot\text{min}^{-1}$ . Například při použití čtyřpólového elektromotoru s maximálními otáčkami 4200  $\text{min}^{-1}$  při frekvenci 140 Hz by to odpovídalo převodovému stupni přibližně 420 až 35. Při použití osmipólového elektromotoru s maximálními otáčkami 3000  $\text{min}^{-1}$  při frekvenci 200 Hz by to odpovídalo převodovému stupni přibližně 300 až 25. Při omezení napájecí frekvence na hranici 120 Hz by převodový poměr byl v rozmezí 340 – 28 respektive u osmipólových motorů v rozpětí 168 – 14.

#### 3.1 Vřetenové převodovky [18]

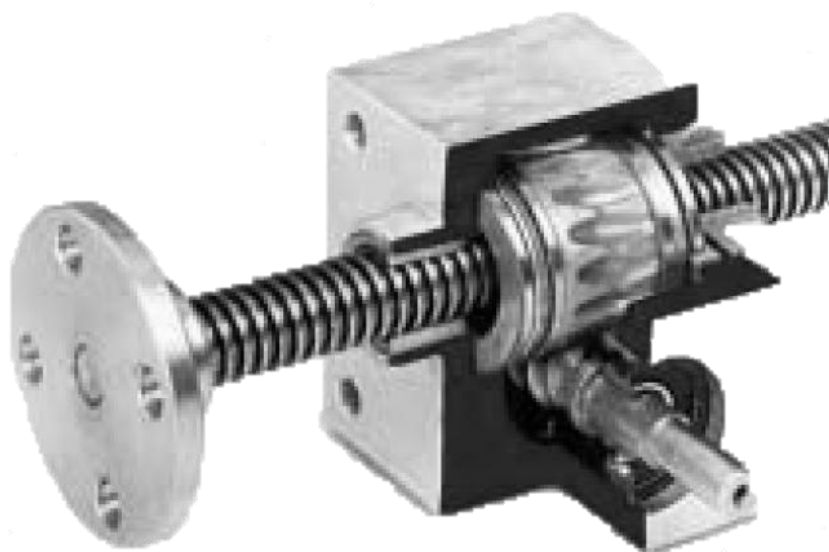
Jsou vhodné pro realizaci přímočarých pohybů jako náhrada přímočarého hydromotoru.

Jsou tvořeny kombinací šnekového převodu a trapézového nebo kuličkového šroubu, zajišťují vysokou bezpečnost při zvedání a spouštění.

Vyrábějí se pro zatížení až 1500 kN a užitečné zdvihy do 10 m, rychlosti zvedání nebo spouštění 0,05  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Velkou výhodou je jejich vysoká polohová přesnost.

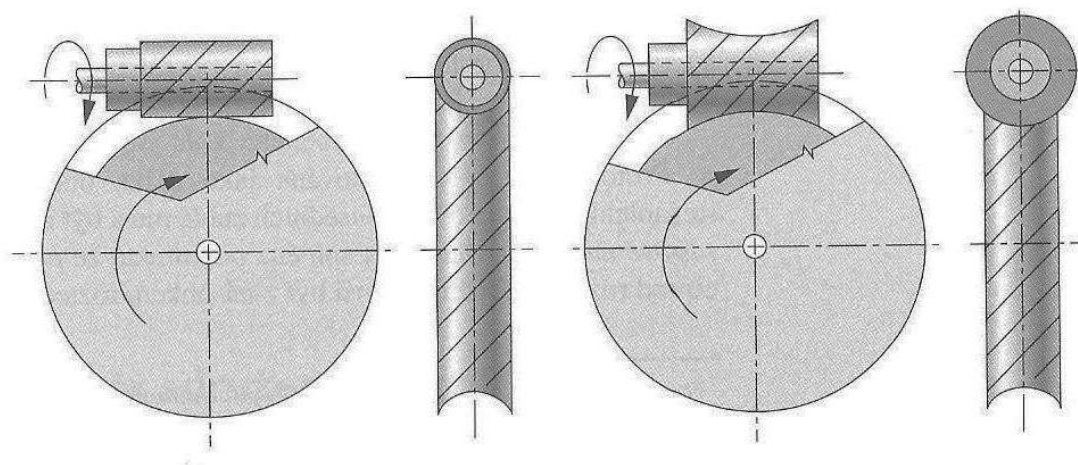
Vřetenová převodovka je znázorněna na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Vřetenová převodovka [18].

### 3.2 Šnekové převodovky [12,13]

Jejich základním prvkem je šnekové soukolí (viz obr. 3.2), jehož kolo bývá vyrobeno z bronzu a šnek z oceli, skříně bývá z hliníkové slitiny u větších převodovek pak z litiny.



a) S válcovým šnekem

b) S globoidním šnekem

Obr. 3.2 Šnekové soukolí [13].



Mohou být doplněny předstupněm s čelním ozubeným soukolím, které mívá převodový poměr  $i = 3, 5, 8$ , planetovou redukcí nebo i druhým šnekovým soukolím což umožňuje velmi vysoké převodové poměry až do hodnoty 10 000.

Vyrábí se v různých stupních přesnosti.

Mezi jejich výhody patří:

- Vysoký převodový poměr (jedno soukolí  $i = 5$  až 100),
- Bezhluchý chod,
- Vysoká zatížitelnost,
- Samosvornost, ta se pohybuje v různém stupni podle stoupání šroubovice šneku, respektive podle účinnosti, dynamicky 100% samosvorné jsou pouze převodovky se šnekovým předstupněm.
- Nízká hmotnost.

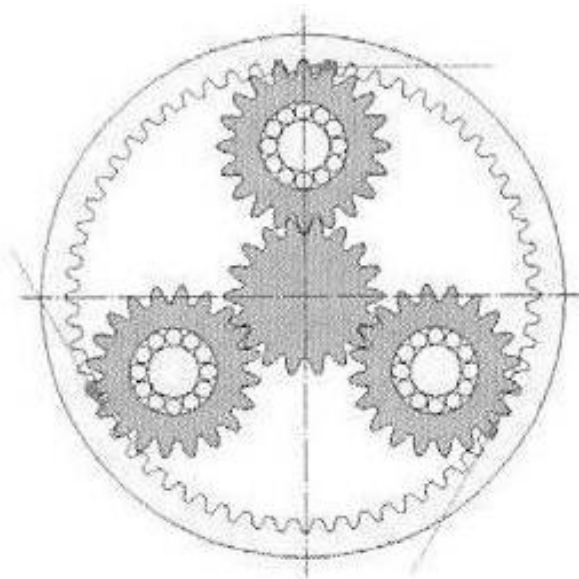
Mezi jejich hlavní nevýhody patří:

- Nízká účinnost, nepřímo úměrná převodovému poměru, například u provedení bez předstupně se při  $i = 50$  pohybuje pod 55% při  $i = 100$  pod 40% podle typu.
- Větší zástavbové rozměry než následující.

Tyto převodovky jsou vhodné pouze pro jednodušší manipulátory nebo osy manipulátorů s občasným provozem bez zvláštních požadavků na přesnost a opakovatelnost polohování.

### 3.3 Planetové převodovky [13,14,15]

Jejich základním prvkem je planetové soukolí (viz obr. 3.3), které se skládá z kola korunového s vnitřním ozubením, centrálního kola na několika satelitů spojených unašečem. V případě pohonů manipulátorů je použito se stupni velké redukce, s nehybným korunovým kolem, vysoké otáčky jsou přivedeny na centrální kolo a nízké se odvádějí unašečem satelitů. Existuje více variant planetových soukolí s více satelity i s jedním satelitem, který je uložen na vstupním hřídeli excentricky tak, že jeho střed leží mimo osu vstupního hřídele, přičemž výstup je odvozen od satelitu, pomocí křížové spojky, s vestavěnou přetěžovací spojkou.



Obr. 3.3 Planetové soukolí [15].

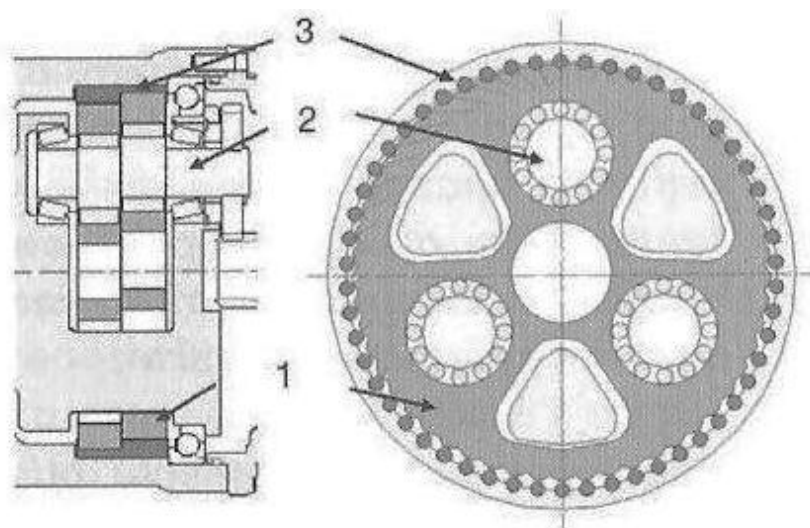
Mezi hlavní výhody patří:

- Vysoká přesnost, vůle pod 8 až pod 1min.
- Vysoká zatížitelnost,
- Vysoká účinnost, 98%
- Vysoký převodový poměr, na jeden stupeň  $i = 3$  až 100,
- Tichý chod,
- Kontinuální přenos síly více ozubenými soukolími,
- Malé zástavbové rozměry, snadná zástavba do systému pohonu.

Planetové převodovky jsou pro své vlastnosti velice vhodné pro náhradu hydrauliky u manipulátorů a robotů.

### 3.4 Cykloidní převodovky [15]

Cykloidní převodovky využívají dvoustupňové konstrukce a skládají se ze čtyř prvků: vstupní hřídele, dvou až tří excentrických hřídelí, dvou vačkových kotoučů a výstupní hřídele. V prvním stupni se otáčivý pohyb servomotoru přenáší prostřednictvím vstupní hřídele na čelní ozubená kola. Otáčky se snižují v závislosti na převodovém poměru vstupní hřídele a ozubených kol. Čelní kola jsou usazena na excentrických hřídelích, které jsou vůči sobě otočeny o 180 stupňů. Tyto excentrické hřídele pohání přes ložiska oba vačkové kotouče. Excentrické hřídele jsou na vstupní a výstupní straně uloženy v ložiscích a podle velikosti převodovky jsou použity dvě nebo tři. Pro druhý stupeň převodu je na vnitřní straně tělesa vytvořen vačkový profil odpovídající vačkovým kotoučům. Prostřednictvím čepů, které jsou umístěny mezi vačkovými kotouči a vačkovým profilem v tělese, se otáčivý pohyb valivě přenáší na výstupní hřídel. Pokud u excentrických hřídelí proběhne jedna otáčka, otočí se vačkové kotouče mimostředově o jedno dělení, přičemž všechny křivky vačkového kotouče se dotýkají čepů a odvalují se po nich. Protože oba vačkové kotouče jsou díky excentrům vzájemně pootočené o 180 stupňů, je na celém obvodu vačkového profilu zaručen takzvaný zubový záběr.[15] Cykloidní převodovka je znázorněna na obrázku 3.4.



1. RV převodovka
2. Excentrická hřídel
3. Čepy

Obr. 3.4 Cykloidní převodovka [15].

Mezi hlavní výhody patří:

- Schopnost přenášet velmi vysoké momenty,
- Vysoká přesnost, hystereze pod 1 min.
- Vysoké převodové poměry, i bez předstupňů  $i = 30$  až 300,
- Vysoká účinnost, až 98%
- Dlouhá životnost,
- Výrazně kratší stavební délka oproti planetovým převodovkám se stejným převodovým poměrem.

Použití planetových a cykloidních převodovek je široké, jejich oblasti použití se překrývají, přičemž cykloidní převodovky mohou v mnohých aplikacích nahradit planetové.

#### **4 POPIS TECHNICKÝCH MOŽNOSTÍ SYSTÉMU POHONU A VZOROVÝCH SESTAV [3,17]**

Vzhledem k vlastnostem měničů frekvence, asynchronních elektromotorů a redukčních převodovek jsou technické možnosti tohoto systému velmi široké a omezené ze spodní hranice, kde nejmenší asynchronní elektromotor má výkon 60 W. Horní hranice je představována vysokonapěťovým elektromotorem o výkonu 50 MW, při použití reduktoru na koncovou rychlost otáčivého pohybu  $10 \text{ min}^{-1}$  a účinnosti reduktoru 96 % by dosažitelný nominální moment dosahoval hodnoty 47 750 kNm.

Vzorové sestavy pro realizaci otáčivého pohybu se skládají z asynchronního elektromotoru nakrátko se zvýšenou účinností EFF2 a pomaluběžné dvoustupňové převodovky EC BOX s válcovým výstupním hřídelem.

Sestava 1 je tvořena čtyřpólovým asynchronním elektromotorem osově výšky 56 mm v přírubovém provedení, jeho výkon je 0,09 kW, jeho jmenovité otáčky jsou  $1350 \text{ min}^{-1}$ , nominální moment 0,63 Nm,  $M_z/M_n = 1,9$ , rozběhový moment je 130 % nominálního momentu. Jeho účinnost při plném zatížení dosahuje 58 %. Jako reduktor je použita dvoustupňová pomaluběžná excentrická převodovka EC BOX III/0, kterou lze zvolit v celkem 56 různých převodových poměrech od 169 do 9409, její účinnost je 84 – 85 %. Celková účinnost sestavy se započtením účinnosti měniče frekvence 96,5 % je 46 %. Hmotnost sestavy je přibližně 26 kg.

Sestava 2 je tvořena čtyřpólovým asynchronním elektromotorem osově výšky 90 mm v přírubovém provedení, jeho výkon je 1,5 kW, jeho jmenovité otáčky jsou  $1420 \text{ min}^{-1}$ , nominální moment 10,1 Nm,  $M_z/M_n = 2,6$ , rozběhový moment je 160 % nominálního momentu. Jeho účinnost při plném zatížení dosahuje 79 %. Jako reduktor je použita dvoustupňová pomaluběžná excentrická převodovka EC BOX VIII/IV, kterou lze zvolit v celkem 69 různých převodových poměrech od 351 do 10670, její účinnost je 84 – 85 %. Celková účinnost sestavy se započtením účinnosti měniče frekvence 96,5 % je 63 %. Hmotnost sestavy je přibližně 136 kg.

Další parametry sestav pro různé převodové poměry a při uvažování rozsahu frekvence 5 – 120 Hz jsou v tabulce č 2.

Tab. 2 Základní parametry vzorových sestav

	<b>sestava 1</b>			<b>sestava 2</b>		
<b>Rychlost pohybu [<math>\text{min}^{-1}</math>]</b>						
	převodový poměr					
frekvence	169	4799	9409	351	5561	10670
5 Hz	0,80	0,03	0,01	0,40	0,03	0,01
50 Hz	7,99	0,28	0,14	4,05	0,26	0,13
120 Hz	19,17	0,68	0,34	9,71	0,61	0,32
<b>Rychlost pohybu [<math>^{\circ}\text{s}^{-1}</math>]</b>						
	převodový poměr					
frekvence	169	4799	9409	351	5561	10670
5 Hz	4,79	0,17	0,09	2,43	0,15	0,08
50 Hz	47,93	1,69	0,86	24,27	1,53	0,80
120 Hz	115,03	4,05	2,07	58,26	3,68	1,92
<b>Nominální moment [Nm]</b>						
	převodový poměr					
frekvence	169	4799	9409	351	5561	10670
5 Hz	90	2555	5009	2996	47460	91063
50 Hz	90	2555	5009	2996	47460	91063
120 Hz	39	1095	2147	1246	19736	37868
<b>Maximální moment [Nm]</b>						
	převodový poměr					
frekvence	169	4799	9409	351	5561	10670
5 Hz	171	4854	9517	7789	123397	236764
50 Hz	171	4854	9517	7789	123397	236764
120 Hz	73	2080	4079	3239	51314	98456
<b>Rozběhový moment [Nm]</b>						
	převodový poměr					
frekvence	169	4799	9409	351	5561	10670
5 Hz	117	3321	6512	4793	75937	145701
50 Hz	117	3321	6512	4793	75937	145701
120 Hz	50	1423	2791	1993	31578	60589

## **ZÁVĚR**

Vlastnosti jednotlivých komponent ve spojení s moderními prvky řízení dávají předpoklad pro sestavení systému pohonu téměř všech velikostí a možný rozvoj používání tohoto systému pohonu v praxi.

Vzhledem k současnému vývoji jednotlivých prvků systému a zmenšování jejich hmotnosti se dá očekávat nahrazení hydraulických systémů pohonu popisovaným systémem pohonu i v mobilní technice jak pro manipulátory, tak pro pojezdové mechanismy.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PAVELKA, Jiří. *Elektrické pohony*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2007. ISBN 978-80-01-03588-7.
2. DANFOSS, s.r.o., [online] [cit. 2012-4-20]. Dostupné z:  
[http://www.danfoss.com/Czech\\_Republic/BusinessAreas/DrivesSolutions/Documentations/Technical+Documentation.htm](http://www.danfoss.com/Czech_Republic/BusinessAreas/DrivesSolutions/Documentations/Technical+Documentation.htm)
3. SIEMENS, s.r.o., [online] [cit. 2012-4-20]. Dostupné z:  
<http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?ctxnh=e827132a1d&ctxp=home>
4. PAVLÍČEK, J. *Výkonové polovodičové součástky*. FEL ZČU v Plzni. [online] [cit. 2012-4-20]. Dostupné z: <http://educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2005022501>
5. PAVLÍK, O. *Měnič pro malý 3f asynchronní motor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 37s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Dalibor Červinka Ph.D. [online]. [cit. 2012-4-21]. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=39761](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39761)
6. KONEČNÝ, Josef. *Příčiny vzniku a omezení ložiskových proudů motoru*. MM Průmyslové spektrum. 2012, č. 1,2, s. 54. ISSN1212-2572.
7. CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*, Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2002. ISBN 80-248-0025-X.
8. KOVÁŘ, P. *Řízení asynchronního motoru pomocí frekvenčního měniče*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 64s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Štohl, Ph.D. [online]. [cit. 2012-4-10]. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=29899](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29899)
9. MALÁŠEK, J. *Obecný přístup k návrhu pohonů dopravních a manipulačních zařízení*. Elektronické skriptum [CD]. Brno: FSI VUT v Brně, 2011.
10. FANUC Robotics Czech s.r.o., [online] [cit. 2012-4-20]. Dostupné z:  
[http://www.fanuc.cz/cs/Products/A\\_Industrial-Robots/M-6iB/M-6iB.aspx](http://www.fanuc.cz/cs/Products/A_Industrial-Robots/M-6iB/M-6iB.aspx)



11. THD. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 4. 3. 2012 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/THD>
12. TOS-ZNOJMO a.s., [online]. [cit. 2012-4-20]. Dostupné z: <http://www.tos-znojmo.cz/produkce/mrt/cz/index.htm>
13. SHIGLEY, J. E., Ch. R. MISCHKE a R. G. BUDYMAS, *Konstruování strojních součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
14. LUFTMAN, Zdeněk. *Redukční planetová převodovka*. Česká republika. Patentový spis, CZ 280 751 B6. 1996-04-17. Dostupné také z: <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/280/280751.pdf>
15. LÖW, Marcus. *Srovnání cykloidních a planetových převodovek*. MM Průmyslové spektrum. 2012, č. 3, s. 56. ISSN1212-2572.
16. MLČÁK, Tomáš a Václav KOLÁŘ. *Elektrické obvody střídavého proudu*. Katedra obecné elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB-TU Ostrava. [online]. [cit. 2012-4-20]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FMMI/Prednasky/3\\_stob\\_sylab\\_bc\\_07.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/3_stob_sylab_bc_07.pdf)
17. STROJÍRNA KUKLENY spol. s r.o.. *Pomaluběžné excentrické převodovky EC BOX*. Katalog. Hradec Králové. 2001
18. GKN Stromag Brno s.r.o. [online] [cit. 2012-5-04]. Dostupné z: <http://www.stromag.cz/cs/c/prevodovky/vretenove-prevodovky.htm>
19. VUES Brno s.r.o. [online] [cit. 2012-4-20]. Dostupné z: <http://www.vues.cz/doc/c7turbo.pdf?docid=293>
20. JAVŮREK, Jiří. *Regulace moderních elektrických pohonů*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2003. ISBN 80-247-0507-9.
21. MATUCHA, T. *Nezávislý nízkonapěťový trakční asynchronní pohon*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 93s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Jiří Skalický, CSc. [online]. [cit. 2012-5-21] Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=11034](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=11034)

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
<b>DTC</b>	[-]	Direct Torque Control
<b>GTO</b>	[-]	Gate Turn-Off Thyristor
<b>IGBT</b>	[-]	Insulated Gate Bipolar Transistor
<b>IGCT</b>	[-]	Integrated Gate Commutated Thyristor
<b>PWM</b>	[-]	Pulse Width Modulation
<b>RFI</b>	[-]	Radio Frequency Interference
<b>THD</b>	[-]	Total Harmonic Distortion

Symbol	Jednotka	Popis
<b>AS</b>	[-]	střídač
<b>cos φ</b>	[-]	účinník
<b><i>f</i></b>	[Hz]	frekvence
<b>F</b>	[N]	síla
<b>f</b>	[-]	vstupní signál modulátoru
<b><i>f<sub>I</sub></i></b>	[Hz]	napájecí frekvence
<b><i>f<sub>2</sub></i></b>	[Hz]	při výstupní frekvenci
<b><i>f<sub>2</sub></i></b>	[Hz]	výstupní frekvence
<b><i>f<sub>I</sub></i></b>	[Hz]	signál skutečné rychlosti
<b><i>f<sub>II</sub></i></b>	[Hz]	rotorová frekvence
<b><i>i</i></b>	[A]	elektrický proud
<b>I</b>	[A]	elektrický proud
<b>i</b>	[-]	převodový poměr
<b><i>i<sub>s</sub></i> <b><i>I<sub>I</sub></i></b></b>	[A]	statorový proud
<b><i>i<sub>1d</sub></i> <b><i>i<sub>1q</sub></i></b></b>	[A]	složky statorového proudu
<b><i>i<sub>a</sub></i> <b><i>i<sub>b</sub></i></b></b>	[A]	sdužené proudy
<b>I<sub>d</sub></b>	[A]	vstupní elektrický proud
<b>I<sub>e</sub></b>	[A]	výstupní elektrický proud

$J$	[kg*m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti
$l$	[m]	délka
$M$	[Nm]	hnací moment elektromotoru
MA	[-]	asynchronní elektromotor
$M_d$	[Nm]	dynamický moment
$M_i$	[Nm]	hnací a zátěžný moment
$M_K$	[Nm]	moment na krátko
$M_{max}$	[Nm]	moment maximální
$M_{min}$	[Nm]	moment minimální
$M_n$	[Nm]	moment nominální
$M_{stř}$	[Nm]	moment střední
$M_z$	[Nm]	zátěžný moment
$M_{zV}, M_{zH}, M_{zG}$	[Nm]	moment zvratu
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky
$p$	[-]	počet pólových dvojic
$P$	[W]	výkon
$P_z$	[W]	výkon ztrátový
$s$	[-]	skluz
$S_U, S_V, S_W$	[-]	přepínače třífázového střídače
$t$	[s]	čas
$T_2$	[s]	čas impulzu
$u$	[V]	elektrické napětí
$U$	[V]	elektrické napětí
$U$	[-]	vstupní signál modulátoru
$U, V, W$	[-]	fáze třífázové soustavy
$u_{2fL}$	[V]	fázové napětí na zátěži
$u_{2fS}$	[V]	fázové napětí střídače
$u_{2ref}$	[V]	referenční napětí
$u_{2s}$	[V]	sduženého napětí střídače
$u_{ab}, u_{bc}$	[V]	sdužená napětí

$U_{d(AV)}$	[V]	napětí v meziobvodu
$U_{eUV}$	[V]	výstupní sdružené elektrické napětí
$u_{nos}$	[V]	nosný signál
$Y$	[-]	zapojení vinutí „do hvězdy“
$\beta$	[-]	otáčková tvrdost motoru
$\Delta$	[-]	zapojení vinutí „do trojúhelníka“
$\eta_{am}$	[-]	účinnost asynchronního elektromotoru
$\eta_c$	[-]	celková účinnost
$\eta_{mf}$	[-]	účinnost měniče frekvence
$\Psi_I$	[Wb]	sdružený magnetický tok
$\omega$	[s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost
$\Omega$	[s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost
$\Omega_0$	[s <sup>-1</sup> ]	počáteční úhlová rychlost

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1      Sestava 1,2 – Výkres sestav [3,17]

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1	Provozní stavy pohonu [1].
Tabulka 2	Základní parametry vzorových sestav

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

- Obrázek 1.1 Základní struktura elektrického pohonu [1]  
Obrázek 1.2 Typické průběhy hnacího momentu [1].  
Obrázek 1.3 Aktivní a pasivní charakteristika [1].  
Obrázek 1.4 Hobloková charakteristika [1].  
Obrázek 1.5 Kalandrová charakteristika [1].  
Obrázek 1.6 Ventilátorová charakteristika [1].  
Obrázek 1.7 Navíječková charakteristika [1].  
Obrázek 1.8 Moment proměnný v čase [1].
- Obrázek 2.1 Přímé měniče frekvence [5].  
Obrázek 2.2 Průběhy proudu ve 3 fázové síti [5].  
Obrázek 2.3 Nepřímý měnič frekvence [6].  
Obrázek 2.4 Obvodové schéma třífázového napěťového střídače [1].  
Obrázek 2.5 Časové průběhy při obdélníkovém řízení [1].  
Obrázek 2.6 Spínací tabulka a vektorové znázornění spínání [1].  
Obrázek 2.7 Suboscilační modulace [1].  
Obrázek 2.8 Výkonové součástky [4].  
Obrázek 2.9 Náhrada obdélníkového průběhu řadou vyšších harmonických [16].  
Obrázek 2.10 Průběhy bez LC,du/dt filtru [2].  
Obrázek 2.11 Průběhy s LC,du/dt filtrem [2].  
Obrázek 2.12 Uspořádání měniče [2].  
Obrázek 2.13 Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru [7].  
Obrázek 2.14 Momentové charakteristika [7].  
Obrázek 2.15 Stabilní a labilní větev [7].  
Obrázek 2.16 Posun mechanických charakteristik a kompenzace úbytku napětí [1].  
Obrázek 2.17 Provozní stavy pohonu [1].  
Obrázek 2.18 Příklad programování frekvenčního měniče [9].  
Obrázek 2.19 Momentová charakteristika motoru při řízení frekvenčním měničem [9].  
Obrázek 2.20 Momentová charakteristika při skalárním řízení [8].  
Obrázek 2.21 Blokované schéma kmitočtově-proudového skalárního řízení [1].  
Obrázek 2.22 Zobrazení prostorového vektoru proudu ve stojící a rotující soustavě [21].  
Obrázek 2.23 Strukturní schéma vektorového řízení s čidlem otáček [1].  
Obrázek 2.24 Strukturní schéma vektorového řízení s čidly napětí [1].  
Obrázek 2.25 Pohyb vektoru  $\Psi_1$  při přímém řízení [1].  
Obrázek 2.26 Blokované schéma regulátoru přímého řízení momentu [1].
- Obrázek 3.1 Vřetenová převodovka [18].  
Obrázek 3.2 Šnekové soukolí [13].  
Obrázek 3.3 Planetové soukolí [15].  
Obrázek 3.4 Cykloidní převodovka [15].

