

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Regulace otáček asynchronního motoru**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub ZEISEK**  
Osobní číslo: **E14B0077P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Regulace otáček asynchronního motoru**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište jednotlivé části a princip činnosti asynchronního motoru.
2. Udejte možné způsoby rozběhu asynchronního motoru.
3. Udejte možné způsoby řízení motoru.
4. Sestavte matematický model asynchronního motoru.
5. Verifikujte vybrané způsoby řízení na matematickém modelu.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Martin Votava**

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je zaměřena na pohony s asynchronním motorem s kotvou na krátko. V práci jsou popsány jednotlivé části motoru, způsoby rozběhu a vybrané typy řízení pohonu a měnič. Vybrané typy řízení jsou popsány a realizovány v prostředí MATLAB/Simulink. Jednotlivé algoritmy řízení porovnány na simulačním modelu pohonu řadou simulací přechodových dějů.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor; Skluz; Regulace otáček; Princip asynchronního motoru; Skalární řízení.

## **Abstract**

The bachelor thesis is focused on the asynchronous machine with squirrel cage. The thesis describes parts of the motor, variations of the motor start-up, selected control techniques of the drive and converter. Selected control techniques are described and implemented in MATLAB/Simulink. Control algorithms are compared on the simulation model by the simulation of transient states.

## **Key words**

Asynchronous motor; Slip; Speed control; Asynchronous motor principle; Scalar control.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Jakub Zeisek

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinovi Votavovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>1 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ</b> .....	<b>10</b>
1.1 OBECNÁ KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ (3F MOTOR).....	10
1.2 KONSTRUKCE JEDNOFÁZOVÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ.....	12
1.2.1 Charakter pomocné (rozběhové) impedance.....	12
1.2.2 Spouštění jednofázového motoru.....	13
<b>2 PRINCIP FUNKCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU</b> .....	<b>14</b>
2.1 TŘÍFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR.....	14
2.2 JEDNOFÁZOVÝ MOTOR BEZ POMOCNÉ IMPEDANCE.....	14
2.3 JEDNOFÁZOVÝ MOTOR S POMOCNOU FÁZÍ.....	15
<b>3 USTÁLENÝ STAV ASYNCHRONNÍHO MOTORU</b> .....	<b>16</b>
<b>4 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA</b> .....	<b>19</b>
<b>5 ROZBĚH ASYNCHRONNÍHO MOTORU</b> .....	<b>23</b>
5.1 PŘÍMÉ PŘIPOJENÍ NA SÍŤ.....	23
5.2 SPOUŠTĚNÍ SNÍŽENÝM NAPĚTÍM.....	23
Spouštění reaktorové.....	23
Spouštění autotransfornátorem.....	23
Spouštění přepínačem hvězda/trojúhelník.....	23
Spouštění impedancí v rotoru.....	24
Spouštění soft-startérem.....	24
5.3 SPOUŠTĚNÍ PŘEPÍNÁNÍM POČTU PÓLŮ.....	24
<b>6 REGULACE OTÁČEK ASYNCHRONNÍHO MOTORU POMOCÍ FREKVENČNÍHO MĚNIČE</b> .....	<b>25</b>
6.1 SKALÁRNÍ REGULACE ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	25
6.2 VEKTOROVÁ REGULACE ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	26
6.3 PŘÍMÉ ŘÍZENÍ MOMENTU ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	27
6.4 ČÁSTI FREKVENČNÍHO MĚNIČE PRO ŘÍZENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	27
6.4.1 Vstupní měnič (usměrňovač).....	28
6.4.2 Stejnoseměrný meziobvod.....	28
6.4.3 Výstupní měnič (střídač).....	29
6.5 MODULACE.....	29
6.5.1 Obdélníkové řízení.....	30
6.5.2 Sinusová PWM modulace.....	30
6.5.3 Sinusová PWM modulace s 3. Harmonickou.....	31
6.6 SKALÁRNÍ ŘÍZENÍ BEZ ČIDLA OTÁČEK S NÁBĚHOVOU RAMPOU.....	31
6.7 SKALÁRNÍ ŘÍZENÍ S ČIDLEM OTÁČEK.....	33
<b>7 SIMULACE</b> .....	<b>35</b>
7.1 SIMULACE SKALÁRNÍHO ŘÍZENÍ BEZ ČIDLA OTÁČEK.....	36
7.2 SIMULACE SKALÁRNÍHO ŘÍZENÍ S ČIDLEM OTÁČEK.....	38
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>42</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>43</b>

## Úvod

Asynchronní motor patří do velké skupiny elektrických strojů, umožňující elektromechanickou přeměnu. Dělíme je na motory, u nichž dochází k přeměně elektrické energie na mechanickou, a generátory, které mění mechanickou energii na elektrickou. Asynchronní stroje se používají téměř výhradně jako motory s výstupním mechanickým pohybem otáčivým nebo lineárním. Jejich předností oproti jiným typům motoru je konstrukční a principiální jednoduchost. To vede na nižší pořizovací cenu a menší nároky na údržbu. Mezi nevýhody asynchronních strojů patří jejich větší hmotnost na jednotku výkonu oproti stroji stejnosměrnému, stejného výkonu. Naproti tomu velkou výhodou asynchronních motorů je to, že nemají komutátor, který bývá zdrojem poruch a vyžaduje údržbu. S rychle se rozšiřujícím rozvojem výkonové elektroniky je možné snáze řídit otáčky asynchronní motoru změnou frekvence při současné změně napájecího napětí pomocí frekvenčních měničů, což dříve nebylo u tohoto druhu motoru možné. [1]

Díky tomu jsou asynchronní motory jedny z nejvíce používaných elektrických pohonů. Vyrábí se v širokém rozsahu výkonů od desítek W do tisíců kW. Je možné se s nimi setkat zejména v průmyslu, ale také v domácnostech, kde slouží pro pohon chladniček, čerpadel, ventilátorů a dalších zařízení. Třífázové asynchronní motory vyžadují pro svůj provoz připojení k třífázovému rozvodu elektrické energie.

Tato práce si vytyčuje následující cíle:

- Obecné seznámení s asynchronními motory
- Seznámení s možnými druhy spouštění asynchronních motorů
- Seznámení s možnými druhy řízení otáček asynchronních motorů
- Popis skalárního řízení bez čidla otáček
- Popis skalárního řízení s čidlem otáček
- Porovnání těchto dvou druhů řízení na modelu v prostředí MATLAB/Simulink



## Seznam symbolů a zkratk

$f_N$ .....	Jmenovitá frekvence napájecího napětí motoru [Hz]
$f_{rk}$ .....	Kritická frekvence rotoru [Hz]
$f_s, f_r, f_m$ .....	Frekvence statoru, frekvence rotoru, frekvence mechanická [Hz]
$f_{sw}$ .....	Požadovaná frekvence napájecího napětí [Hz]
$I_r, I_s$ .....	Proud statoru, proud rotoru [A]
$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$ .....	Proud protékající státorem motoru napájeného ze střídače
$L_h, L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ .....	Indukčnost hlavní, rozptylová statoru, rozptylová rotoru [H]
$L_\sigma, X_\sigma$ .....	Rozptylová indukčnost [H], rozptylová reaktance [ $\Omega$ ]
$L1, L2, L3$ .....	Střední pracovní vodič napájecí soustavy
$M, M_k$ .....	Moment [N.m], kritický moment [N.m]
$N$ .....	Střední pracovní vodič napájecí soustavy
$n$ .....	Otáčky motoru [ot/min]
$PE$ .....	Ochranný vodič napájecí soustavy
$P_\delta$ .....	Výkon ve vzduchové mezeře [W]
$p$ .....	Počet pólů [–]
$R_s, R_r$ .....	Odpor statoru, odpor rotoru [ $\Omega$ ]
$s, s_k$ .....	Skluz [-], kritický skluz [-]
$T, t$ .....	Perioda, čas [s]
$U_a, U_s$ .....	Fázové napětí statoru [V]
$U_d$ .....	Výstupní napětí usměrňovače [V]
$U_N$ .....	Jmenovité napětí motoru [V]
$U_p$ .....	Pilové napětí [V]
$U_r$ .....	Řídící napětí [V]
$U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}$ .....	Fázové napětí na statoru motoru napájeného ze střídače
$(U_{sN})_{ef}$ .....	Jmenovité efektivní napětí statoru [V]
$X_h, X_{s\sigma}, X_{r\sigma}$ .....	Reaktance hlavní, rozptylová statoru, rozptylová rotoru [ $\Omega$ ]
$\Psi_s$ .....	Elektrický tok [V.s; Wb]
$\omega_N$ .....	Jmenovitá úhlová rychlost motoru (mechanická)
$\omega_s, \omega_r, \omega_m$ .....	Úhlová rychlost statoru, rotoru, mechanická [rad/s]
$1f, 3f$ .....	Počet fází

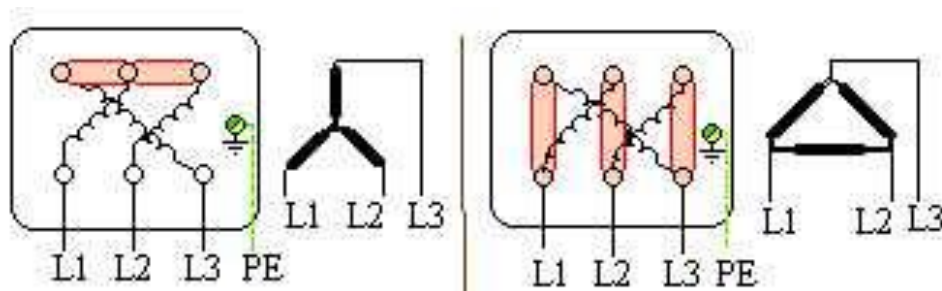
# 1 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

## 1.1 Obecná konstrukce asynchronních motorů (3f motor)

Asynchronní motory se skládají ze dvou základních částí. První částí je stator obsahující vinutí z mědi, které může být třífázové nebo jednofázové (hlavní a pomocné vinutí). Vinutí se ukládají do statorového paketu elektrotechnických plechů, který je nalisován do kostry motoru. Vodiče v drážkách jsou lakované nebo smaltované a musí být izolovány od statorových plechů. Plechy jsou mezi sebou také izolovány. Kostra je vyrobena z hliníku nebo litiny a má žebrování na svém povrchu sloužící k ochlazení stroje během provozu. Na přední a zadní straně motoru se nachází ložiskové štíty, ve kterých jsou uložena ložiska. Spodní část kostry obsahuje patky k přichycení stroje. S ohledem na použití motoru může obsahovat přírubu. Statorový svazek se impregnuje zejména k dosažení určité mechanické pevnosti. Ve svazku mohou být zapletena čidla k měření teploty vinutí. Svorkovnice třífázového asynchronního motoru má šest svorek, mezi které jsou zapojena tři vinutí. Jednotlivé možnosti zapojení jsou zobrazeny na Obr. 1.1. Vinutí mohou být spojené do hvězdy, nebo do trojúhelníka. [1]

Zapojení do hvězdy (Y)

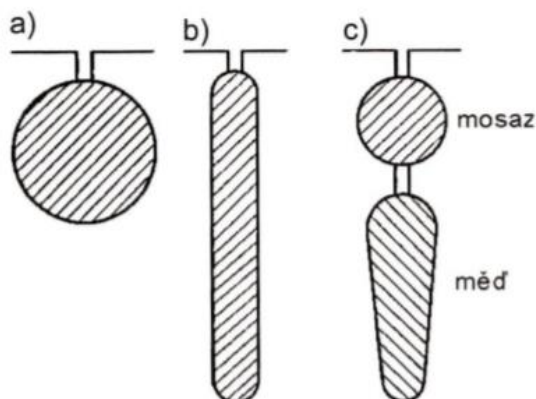
Zapojení do trojúhelníka (D)



Obr. 1.1 Zapojení svorkovnice 3f asynchronního motoru

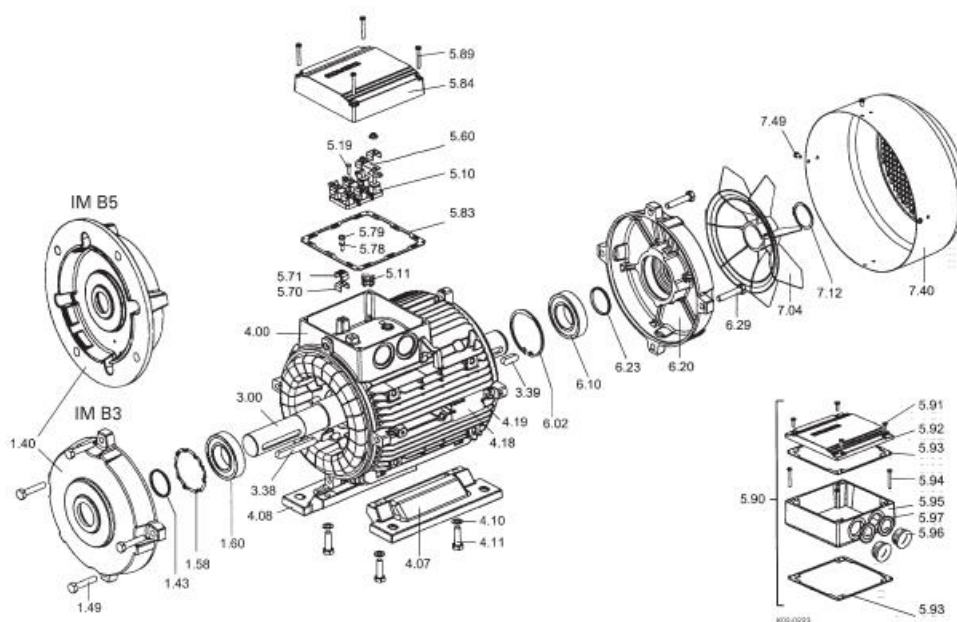
Další základní částí motoru je rotor. Na rotoru se nachází klecové vinutí v případě asynchronního motoru s klecí nakrátko nebo třífázové vinutí, jehož konce jsou vyvedeny ke kroužkům na rotoru. Proud protéká přes sběrací kartáče do odporových spouštěčů. U klecového vinutí je na rotoru klec vyrobená z hliníku nebo mědi. Tato klec je zastříknuta do paketu rotorových plechů. Ty jsou pak s klecí nalisovány na hřídel. Motory s kotvou nakrátko můžeme také rozdělit podle toho, jak jsou provedeny drážky na rotoru (Obr. 1.2.):

- a) Jednoduchá
- b) Vírová klec
- c) Dvojitá klec (Boucherotova)



Obr. 1.2. Tvary drážek rotoru u asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Hřídel je opatřena vyfrézovanou drážkou, do které se umísťuje pero. Na kleci bývají malé lopatky sloužící k ventilaci motoru. K aktivnímu chlazení motoru je na hřídel nasazen plastový ventilátor. Ke snížení vibrací stroje během jeho provozu se používají podložky, které jsou nasazeny na malé válečky po obvodu kruhu rotorové klece a následně mechanicky zafixovány (rozklepáním válečků).



Obr. 1.3. Komponenty asynchronního motoru

## 1.2 Konstrukce jednofázových asynchronních motorů

Jednofázové asynchronní motory se skládají z pevné nerotující části, kterou je stator a z pohyblivé části rotoru stejně jako motory třífázové. Obvykle se vyrábí menšího výkonu a to přibližně do 1 kW. Stator je tvořen kostrou, která je odlita z litiny, případně z hliníku. Dále stator obsahuje přední a zadní ložiskový štít, ve kterých jsou uložena ložiska, svorkovnici sloužící k připojení přívodních vodičů, paket statorových plechů, ve kterých je uloženo hlavní a pomocné rozběhové vinutí, patky, ventilátor a v některých případech může obsahovat i přírubu.

Rotor je složen z elektrotechnických plechů tvořících paket, do kterého je odlita hliníková (měděná) klec a hřídele s vyfrézovanou drážkou pro pero. K hlavnímu vinutí je paralelně připojeno pomocné vinutí se sériově připojenou impedancí.

V paketu statorových plechů jsou vytvořeny drážky, od kterých jsou izolována obě vinutí. Vinutí jsou tvořena lakovaným nebo smaltovaným měděným vodičem. Podle způsobu spojení závitů na statoru mluvíme o vinutí soustředném nebo se stejnými cívkami. U soustředného vinutí nedochází ke křížení vodičů na čelech vinutí, jako je tomu u vinutí se stejnými cívkami. K ochlazení motoru při chodu slouží plastový ventilátor umístěný v drážce na hřídeli a žebrování na kostře statoru, pomocí kterého dochází k výměně tepla mezi povrchem motoru a okolním vzduchem. [2]

### 1.2.1 Charakter pomocné (rozběhové) impedance

Impedance připojená sériově k pomocnému vinutí je nejčastěji kapacitního charakteru tvořená kondenzátorem vhodné kapacity, kterou lze vypočítat pomocí empirického vzorce. Pro rozběh motoru lze též použít impedanci indukčního nebo odporového charakteru. Obě vinutí budou napájena střídavými proudy, které jsou vzájemně fázově posunuty. Pomocné vinutí lze po rozběhu odpojit pomocí odstředivého vypínače nebo proudového relé. V mnoha případech se však přídatná impedance nechává připojena i za provozu ke zlepšení některých vlastností stroje. Jinou možností je použít dva kondenzátory o odlišné kapacitě a odpojit za provozu pouze jeden z nich. [3]

### 1.2.2 Spouštění jednofázového motoru

Řízení zapnutí motoru lze buď mechanicky pomocí ručně ovládaného spínače, případně automaticky ovládaného stykače. Další možností je použití triaku, pomocí kterého lze zapnout a vypnout jednofázový motor, např. čerpadlo. Také jej můžeme spouštět s využitím funkce soft-start. Funkci soft-start lze s výhodou využít tam, kde je potřeba spouštět několik jednofázových motorů zároveň, zapojených na stejnou síť, k omezení vypadávání elektrických ochran.

## 2 Princip funkce asynchronního motoru

### 2.1 Třífázový asynchronní motor

Statorové vinutí motoru je napájeno ze zdroje třífázového proudu. Po připojení napájení začne třífázovým vinutím protékat střídavý proud. Tento proud způsobí vznik točivého magnetického pole, které indukuje napětí do rotorového vinutí. Indukované napětí protlačí tímto vinutím proud. Dojde k vytvoření magnetického pole kolem rotoru. Vzájemnou interakcí obou magnetických polí dochází ke vzniku točivého momentu a třífázový motor se roztočí. Otáčky rotoru budou mít hodnotu vždy menší než synchronní otáčky sítě  $n_s$ .

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (2.1.)$$

Rozdíl mezi otáčkami točivého magnetického pole statoru a skutečnými otáčkami rotoru se vyjadřuje pomocí tzv. skluzu  $s$ .

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad [-] \quad (2.2.)$$

Velikost skluzu  $s = 0$  znamená, že se z asynchronního motoru stává asynchronní generátor. Při hodnotě skluzu  $s = 1$  se motor nachází ve stavu nakrátko, tzn., že rotor motoru se neotáčí.

### 2.2 Jednofázový motor bez pomocné impedance

Napájení motoru jednofázovým proudem způsobí pouze pole pulzující. Jednofázový motor lze vysvětlit na principu dvou magnetických točivých polí pohybujících se synchronní rychlostí proti sobě. Jedno pole se nazývá sousledné, které běží ve směru otáčení rotoru a druhé je protiběžné a otáčí se naopak. Obě pole mají hodnotu amplitudy rovnou polovině amplitudy rozkládaného pole. V klidovém stavu jsou velikosti obou polí stejné a motor se netočí. Při roztočení hřídele na jednu stranu dochází ke zvýšení vlivu pole v tomto směru a motor se začne točit. Vliv pole je větší s rostoucí rychlostí hřídele. [2]

## 2.3 Jednofázový motor s pomocnou fází

Jednofázový motor bez pomocného vinutí se po připojení k elektrické síti nerozběhne, protože má nulový záběrný moment. K tomu, aby se motor rozběhl, je potřeba mechanického impulzu vyvolaného vnější silou, např. trhnutím za řemen nebo klikou. Tento způsob se však nepoužívá, protože je nepraktický. Jestliže však připojíme k pomocnému vinutí rozběhovou impedanci, motor se sám roztočí z klidového stavu po připojení napájecího napětí. Ve velké většině případů se jako pomocná impedance používá kondenzátor na střídavé napětí, který se zapojí do série k vinutí rozběhovému, tím vznikne pomocná fáze. Po rozběhnutí se tato pomocná fáze odpojí a motor již běží bez ní. Reverzaci chodu motoru je možné dosáhnout přepólováním svorek hlavního nebo rozběhového vinutí. [2]

### 3 Ustálený stav asynchronního motoru

Pro popsání vlastností motoru v ustáleném stavu můžeme vyjít z rovnic, odvozených pro prostorové vektory v předchozí kapitole nebo z následující úvahy:

Přivedené napětí na motor je rovno součtu ohmických úbytků, transformačního napětí a rotačního napětí. [4]

V ustáleném stavu je transformační napětí nulové (tj.  $d\bar{\Psi}_1/dt=0$  a  $d\bar{\Psi}_2/dt=0$ ) a můžeme psát rovnice:

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + j \cdot \omega_s \cdot L_1 \cdot \bar{I}_1 + \bar{U}_{ind} \quad (3.1.)$$

$$\bar{U}_2 = R_2 \bar{I}_2 + j \cdot (\omega_s - \omega) \cdot L_2 \cdot \bar{I}_2 + (\omega_s - \omega) \cdot \bar{U}_{ind} \quad (3.2.)$$

Indukované napětí  $\bar{U}_{ind}$  je vytvořeno proudem, protékajícím indukčností  $L_{1h}$  pro statorovou stranu a indukčností  $L_{2h}$  pro rotorovou stranu. Dosadíme  $\omega_s - \omega = s \cdot \omega_s$ :

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + j \cdot \omega_s \cdot L_1 \cdot \bar{I}_1 + j \cdot \omega_s \cdot L_{1h} \cdot \bar{I}_2 \quad (3.3.)$$

$$\bar{U}_2 = R_2 \bar{I}_2 + j \cdot s \cdot \omega_s \cdot L_2 \cdot \bar{I}_2 + j \cdot s \cdot \omega_s \cdot L_{2h} \cdot \bar{I}_1 \quad (3.4.)$$

V další úpravě dosadíme za indukčnost  $L_1 = L_{1\sigma} + L_{1h}$  a  $L_2 = L_{2\sigma} + L_{2h}$  a dostaneme:

$$X_1 = \omega_s \cdot L_1 = \omega_s \cdot L_{1\sigma} + \omega \cdot L_{1h} = X_{1\sigma} + X_{1h} \quad (3.5.)$$

$$X_2 = \omega_s \cdot L_2 = \omega_s \cdot L_{2\sigma} + \omega \cdot L_{2h} = X_{2\sigma} + X_{2h} \quad (3.6.)$$

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + j \cdot (X_{1\sigma} + X_{1h}) \cdot \bar{I}_1 + j \cdot X_{1h} \cdot \bar{I}_2 \quad (3.7.)$$

$$\bar{U}_2 = R_2 \bar{I}_2 + j \cdot s \cdot (X_{2\sigma} + X_{2h}) \cdot \bar{I}_2 + j \cdot s \cdot X_{2h} \cdot \bar{I}_1 \quad (3.8.)$$



Rovnice nyní formálně upravíme tak, že druhou rovnicí vydělíme skluzem  $s$ .

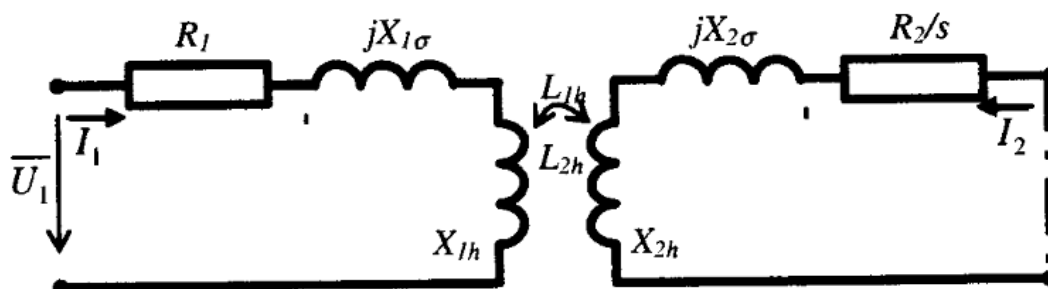
$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + j \cdot (X_{1\sigma} + X_{1h}) \cdot \bar{I}_1 + j \cdot X_{1h} \cdot \bar{I}_2 \quad (3.9.)$$

$$\frac{\bar{U}_2}{s} = \frac{R_2}{s} \bar{I}_2 + j \cdot (X_{2\sigma} + X_{2h}) \cdot \bar{I}_2 + j \cdot X_{2h} \cdot \bar{I}_1 \quad (3.10.)$$

Těmto rovnicím odpovídá náhradní schéma na Obr. 3.1. Protože, je zde stále oddělený obvod statoru a rotoru vzájemnou vazbou, je vhodné provést spojení obou stran. Proto všechny rotorové veličiny přepočítáme na statorovou stranu. Pro možnost přechodu na nové schéma zavedeme magnetizační proud  $I_m$  a hlavní reaktanci motoru  $X_h$ :

$$\bar{I}_m = \bar{I}_1 + \bar{I}_2' \quad (3.11.)$$

$$X_h = \sqrt{X_{1h} \cdot X_{2h}} \quad (3.12.)$$



Obr. 3.1. Náhradní schéma asynchronního motoru [4]

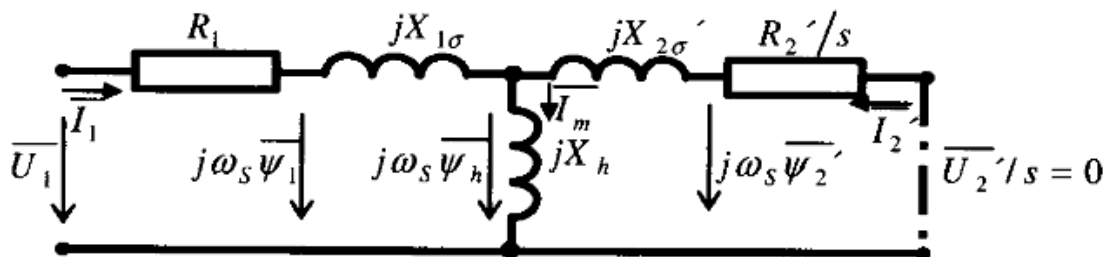
Pak dostaneme:

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + j \cdot X_{1\sigma} \cdot \bar{I}_1 + j \cdot X_h \cdot (\bar{I}_1 + \bar{I}_2') = R_1 \bar{I}_1 + j \cdot X_{1\sigma} \cdot \bar{I}_1 + j \cdot X_h \cdot \bar{I}_m \quad (3.13.)$$

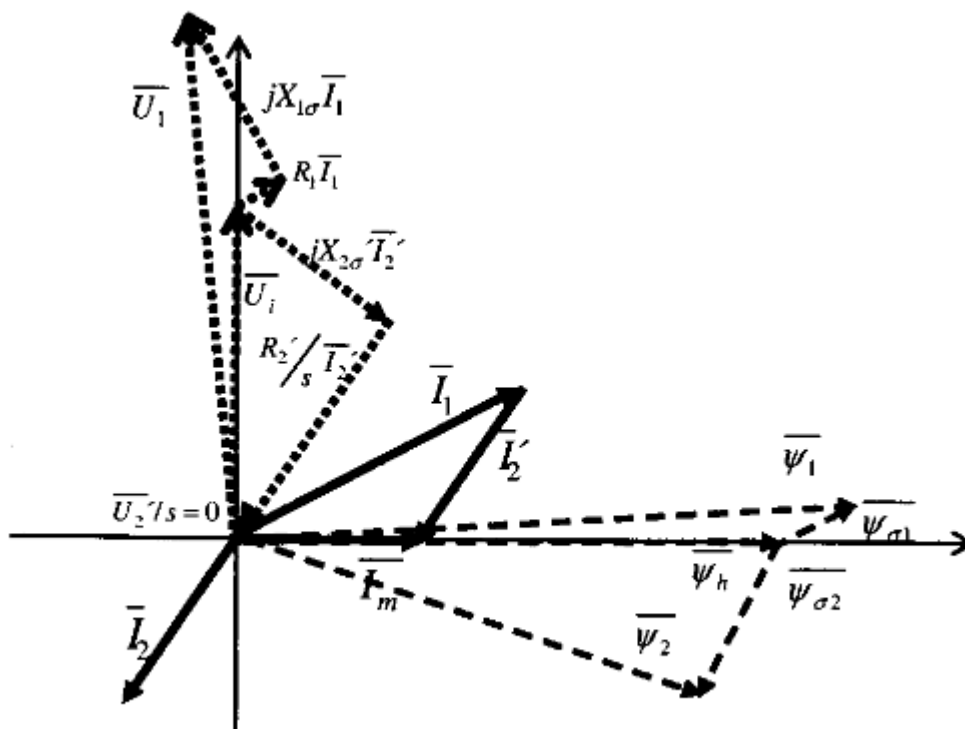
$$\frac{\bar{U}_2}{s} = \frac{R_2}{s} \bar{I}_2' + j \cdot X_{2\sigma}' \cdot \bar{I}_2' + j \cdot X_h \cdot (\bar{I}_1 + \bar{I}_2') = \frac{R_2}{s} \bar{I}_2' + j \cdot X_{2\sigma}' \cdot \bar{I}_2' + j \cdot X_h \cdot \bar{I}_m \quad (3.14.)$$

Nyní položíme napětí na rotoru  $\bar{U}_2 = 0$ , protože uvažujeme spojení rotoru nakrátko. Odpovídající náhradní schéma je na Obr. 3.2, a k tomu příslušný fázorový diagram pak na Obr. 3.3. [4]

$$0 = \frac{R_2'}{s} \bar{I}_2' + j \cdot X_{2\sigma}' \cdot \bar{I}_2' + j \cdot X_h \cdot \bar{I}_m \quad (3.15.)$$



Obr. 3.2. Upravené náhradní schéma asynchronního motoru [4]



Obr. 3.3. Fázorový diagram asynchronního motoru [4]

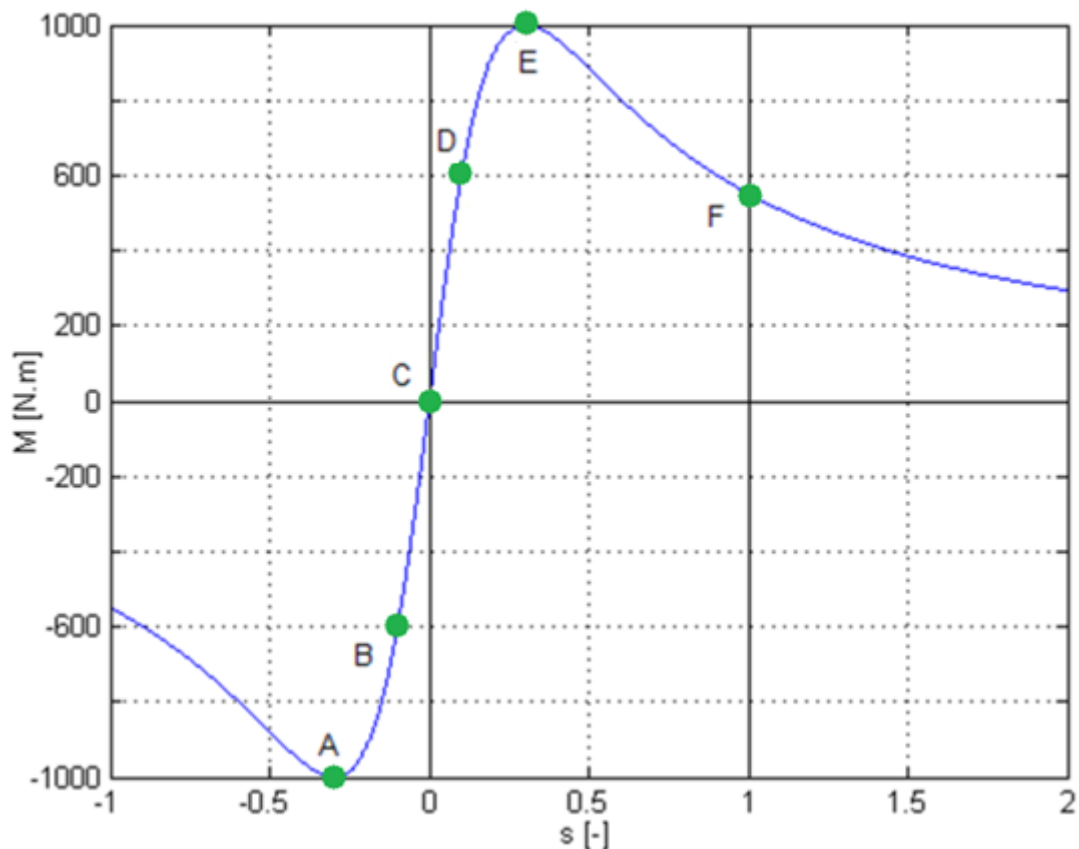
## 4 Momentová charakteristika

Momentová charakteristika asynchronního stroje se dělí na tři části. První část je v oblasti skluzu  $s \in (0 \div 1)$ . V této části se asynchronní stroj provozuje v motorickém režimu. Druhá část je v oblasti skluzu  $s \in (1 \div 2)$ . Zde se asynchronní stroj provozuje v režimu elektrické brzdy. Poslední třetí část je v oblasti skluzu  $s \in (-1 \div 0)$ . V této části se asynchronní stroj provozuje v generátorickém režimu.

Snažíme se asynchronní motor provozovat v lineární části momentové charakteristiky, kde se nachází jmenovitý moment asynchronního motoru a jsou zde změny skluzu úměrné změnám zatížení. Toho dosáhneme pouze pomocí regulace frekvenčním měničem. V případě, že asynchronní motor spouštíme, přímým připojením k elektrické síti, nebo jiným jednoduchým způsobem regulace (soft-start, spouštění Y-D, atd.), pak asynchronní motor pracuje v celé části momentové charakteristiky. U asynchronního motoru s vinutou kotvou při využití regulace změnou rotorového odporu je možné dosáhnout toho, že motor bude od nulových otáček pracovat v lineární části momentové charakteristiky. [1]

Na Obr. 4.1 můžeme vidět, mezi body DB, lineární část momentové charakteristiky. V této lineární části pracují pohony regulované skalárním řízením, vektorovým řízením nebo přímým řízením momentu a po rozeběhnutí také neřízené pohony. Stabilní část momentové charakteristiky leží mezi body EA. Od bodu E doprava leží nestabilní část, která bývá také nazývána labilní částí momentové charakteristiky. V této části momentové charakteristiky motor pracuje pouze krátkodobě, a to pouze v případě, že asynchronní motor spouštíme, přímým připojením k elektrické síti, nebo jiným jednoduchým způsobem regulace (soft-start, spouštění Y-D, atd.). Aby v této oblasti pracoval motor, který je napájený z frekvenčního měniče je nežádoucí. Při elektrickém brzdění se pracovní bod posouvá mezi body CA. Z motorického režimu do režimu elektrické brzdy se pohon může dostat např. zmenšením výstupní frekvence u měniče. Toto platí za předpokladu, že motor napájíme frekvenčním měničem.

- Bod A: moment zvratu v generátorickém režimu
- Bod B: jmenovitý pracovní bod motoru v generátorickém režimu
- Bod C: nezatížený motor
- Bod D: jmenovitý pracovní bod motoru v motorickém režimu
- Bod E: moment zvratu v motorickém režimu (maximální moment)
- Bod F: záběrný moment asynchronního motoru



Obr. 4.1. Momentová charakteristika asynchronního stroje

Rychlost otáčení magnetického pole, tj. synchronní rychlost je dána napájecí frekvencí  $f$  a počtem pólových dvojic  $p_p$ :

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p_p} \quad [ \text{rad/s} ] \quad (4.1.)$$

Mechanické otáčky motoru jsou pak vzhledem k synchronním otáčkám nižší. Rozdíl těchto otáček vztažený k synchronním otáčkám se nazývá skluz  $s$ . [4]

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad [ - ], \quad \text{obráceně pak} \quad \omega_s = \omega \cdot \frac{1}{1-s} \quad [ - ] \quad (4.2.), (4.3.)$$

Výkon ve vzduchové mezeře je dán vztahem:

$$P_\delta = 3 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot I_2'^2 = 3 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 \cdot \left(\frac{1-s}{s} + 1\right) = 3 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 \cdot \frac{1-s}{s} + 3 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 \quad (4.4.)$$

$$P_\delta = P_i + \Delta P_{j2} \quad (4.5.)$$

$P_i$  je vnitřní elektromechanický výkon motoru,  $\Delta P_{j2}$  jsou ztráty v rotoru, pro které platí:

$$\Delta P_{j2} = 3 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 = s \cdot P_\delta \quad (4.6.)$$

Výkon motoru  $P$ :

$$P = P_\delta - \Delta P_{j2} = P_\delta \cdot (1-s) \quad (4.7.)$$

Pro moment  $M$  pak platí:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P_\delta \cdot (1-s)}{\omega} = 3 \cdot \frac{R_2' \cdot I_2'^2 \cdot (1-s)}{s \cdot \omega} = 3 \cdot \frac{R_2'}{s \cdot \omega_s} \cdot I_2'^2 \quad (4.8.)$$

Pro určení dalších veličin je zapotřebí určit velikost proudu. Za další budeme uvažovat napájení motoru ze zdroje napětí o konstantním kmitočtu. Impedanci motoru určíme z chodu nakrátko, kdy  $U_2' = 0$ . Vzhledem k velikosti můžeme  $X_h$  zanedbat a dostaneme:

$$I_2'^2 = \frac{U_1^2}{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2} \quad (4.9.)$$

$$M = 3 \cdot \frac{R_2'}{s \cdot \omega_s} \cdot \frac{U_1^2}{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2} \quad (4.10.)$$

Dále zavedeme  $X_{\sigma} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}$  a současně pro malé skluz s můžeme odpor  $R_1$  zanedbat a pak jednoduchou úpravou:

$$I_2'^2 = \frac{U_1^2}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\sigma})^2} \quad (4.11.)$$

$$M = 3 \cdot \frac{R_2'}{s \cdot \omega_s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\sigma})^2} \quad (4.12.)$$

Hledáme-li extrém funkce  $M$ , nalezneme tzv. skluz zvratu  $s_m$  (někdy se také nazývá kritický skluz):

$$s_m = \frac{R_2'}{X_{\sigma}} \quad (4.13.)$$

Maximální moment motoru, který je dosažen při skluzu zvratu je:

$$M = 3 \cdot \frac{R_2'}{s_m \cdot \omega_s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(\frac{R_2'}{s_m}\right)^2 + (X_{\sigma})^2} = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_s \cdot X_{\sigma}} \quad (4.14.)$$

Dosažením frekvenční závislosti pro  $\omega_s$  a pro  $X_{\sigma}$  dostaneme:

$$M_m = k \cdot \frac{U_1^2}{f_1^2} \quad (4.15.)$$

Dalším odvozením pak dostaneme známý Klossův vztah:

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad (4.16.)$$

Z uvedených rovnic již můžeme sestrojít momentovou charakteristiku asynchronního stroje. [4]

## 5 Rozběh asynchronního motoru

Z vlastností asynchronního motoru vyplývá, že při rozběhu je velmi nízká reaktance motoru a kvůli tomu dochází k velkému záběrovému proudu. Jeho velikost obvykle bývá několikanásobkem jmenovitého proudu ( $I_{záb} = 6$  až  $10 \times I_n$ ). Dlouho trvající rozběhy bývají u velkých setrvačných hmot řádově sekundy a mohou činit problémy v napájecí síti. Proto je třeba různými způsoby tento rozběhový proud omezit. [4]

### 5.1 Přímé připojení na síť

Neregulované motory malých a středních výkonů se obvykle rozbíhají přímým připojením na síť.

### 5.2 Spouštění sníženým napětím

U asynchronních motorů je spouštěcí proud přímo úměrný napájecímu napětí. Nevýhodou ale je, že záběrný moment je přímo úměrný kvadrátu napájecího napětí. Proto můžeme tento způsob použít tam, kde je nutné omezit spouštěcí proud, ale zároveň je možné připustit pokles momentu. [4]

#### **Spouštění reaktorové**

Pomocí připojení tlumivky se sníží napětí přivedené na motor.

#### **Spouštění autotransformátorem**

Jedná se o nákladnou metodu. Výhodou je pokles momentu pouze jako lineární závislost napětí. [4]

#### **Spouštění přepínačem hvězda/trojúhelník**

Motor s vinutím dimenzovaným na sdružené napětí se nejdříve připojí na fázové napětí (zapojení hvězda). Tím klesne rozběhový proud na třetinu. Po rozběhnutí motoru se přepojí na sdružené napětí (zapojení trojúhelník). Tuto metodu lze provést jak stykači tak i pomocí PLC. [4]

## Spouštění impedancí v rotoru

Tato možnost se může využít u motorů s vinutou kotvou. Využívá se z důvodu snížení záběrného proudu nebo naopak pro zvětšení akceleračního momentu. Během spouštění bývá odpor stupňovitě odpojován, čímž se řídí moment motoru a tím i proud. [4]

## Spouštění soft-startérem

Pro rozběh asynchronního motoru můžeme použít také metodu soft-start. V dnešní době ho většina výrobců prodává ve formě kompaktu (black-box). Je možné na něm nastavit rozběhovou a doběhovou rampu. Uvnitř soft-startu menších výkonů můžeme nalézt triaky, ale obvykle se uvnitř nachází tyristory. Soft-start postupně po rampě navyšuje napájecí napětí a tím plynule roztočí motor. Z důvodu že moment asynchronního motoru klesá s kvadrátem napětí, provádíme soft-start bez zátěže.

### 5.3 Spouštění přepínáním počtu pólů

Změna počtu pólů je možná jen u motorů s přepínatelným počtem pólů. Oproti normálnímu asynchronnímu motoru je motor s možností přepínání počtu pólů dražší. Je také větší a má i menší účinnost. Vyrábějí se motory pro přepínání dvou nebo tří otáček. Dvouotáčkové motory jsou většinou s přepínáním počtu pólů v poměru 1:2 (tzv. systém Dahlander). Princip je takový, že statorové vinutí každé fáze je rozděleno na několik částí, z čehož každá část vinutí je vyvedena na svorkovnici a následně se pomocí stykačů nebo PLC spojují vinutí. Trojotáčkové motory mají navíc jedno samostatné vinutí s větším počtem pólů pro malé otáčky.



## 6 Regulace otáček asynchronního motoru pomocí frekvenčního měniče

V dnešní době se pro skutečně plynulou regulaci asynchronních motorů používají frekvenční měniče. Tento způsob regulace se začal rozvíjet až s příchodem polovodičových vypínatelných součástek. Tímto způsobem lze plynule regulovat jakýkoliv asynchronní motor. Je to nejefektivnější regulace díky tomu, že je bezztrátová a také proto, že udržuje konstantní požadovanou rychlost. To, že se jedná o bezztrátovou regulaci je myšleno tak, že jsou úbytky pouze na polovodičových prvcích.

Frekvenční měniče se ve většině aplikací skládají z usměrňovače, meziobvodu a střídače. V některých aplikacích nepotřebujeme usměrňovač, protože se může použít napájení z akumulátoru nebo stejnosměrné troleje. Napájení ze stejnosměrné troleje se používá ve stejnosměrné trakci na železnici a v městské hromadné dopravě. Setkat se s napájením z akumulátorů můžeme u elektromobilů a částečně také u hybridních automobilů. Střídač může být napěťového nebo proudového typu. Podle typu střídače se liší také stejnosměrný meziobvod a vstupní měnič. Za pomoci moderních vstupních měničů můžeme energii vracet zpět do elektrické sítě - rekuperovat. Lze se setkat s třemi typy regulace frekvenčních měničů:

- skalární regulace
- vektorová regulace
- přímé řízení momentu

### 6.1 Skalární regulace asynchronního motoru

U skalární regulace regulujeme frekvenci a velikost akční veličiny. U regulace napěťového typu požadujeme regulaci frekvence a velikosti výstupního napětí ze střídače  $U_s$ . Z tohoto důvodu je vhodné použít PWM modulace nebo PWM modulace s 3. harmonickou v oblasti  $\omega = (0 \div \omega_N)$  a obdélníkové řízení použít v oblasti vysokých otáček  $\omega = (\omega_N \div 2\omega_N)$ . [5]

V oblasti frekvence  $f_s = (0 \div f_N)$  je napětí voleno v rozsahu  $U_a = (0 \div U_N)$ . Asynchronní motor má zde konstantní moment, který odpovídá až maximálnímu momentu ( $M_{\max}$ ). Při frekvenci  $f > f_n$  a napětí  $U_a = U_{SN}$  dochází k odbuzování stroje a tím klesá

jeho maximální moment ( $M_{\max}$ ). Problém však nastává při regulaci v oblasti nízkých otáček. Při frekvenci  $f_{sw} \rightarrow 0$  by mělo být napětí  $U \rightarrow 0$ . Tím se ale motor nerozběhne, protože malé napětí na výstupu střídače neprotlačí vinutím statoru dostatečně velký proud. Z tohoto důvodu se musí přičíst malé napětí  $\Delta U$  (6.1.), které nám motor rozběhne i z nulových otáček. [6]

$$\Delta U = R_s \cdot \frac{U_{ind}}{\frac{R_r}{s}} = R_s \cdot \frac{U_{ind}}{R_r \cdot f_s} \cdot f_r \cong \frac{(U_{sN})_{ef} \cdot \sqrt{2} \cdot R_s}{R_r \cdot f_{sN}} \cdot f_r \quad (6.1.)$$

Regulovat asynchronní motor skalárně pomocí frekvenčního měniče je celkem jednoduché. S tímto typem regulace ale nedosáhneme špičkových dynamických parametrů pohonu. Většinou se používá u jednodušších regulovaných pohonů, kde není nutnost výborných dynamických parametrů. Při maximálním  $U_N$  můžeme navyšovat napájecí frekvenci, ale dochází tím k odbuzování motoru. Tím dochází ke snížení maximálního momentu motoru. Při skalárním řízení požadujeme konstantní magnetický tok v motoru, kterého dosahujeme konstantním poměrem napětí a frekvence  $U_N/f$ . [5] Z rovnice (6.2.) vyplývá princip skalární regulace.

$$U_s = R_s \cdot I_s \cdot j \cdot \omega_s \cdot \Psi_s \quad (6.2.)$$

Skalární řízení lze realizovat dvěma způsoby:

- Proudově kmitočtové řízení
- Napětově kmitočtové řízení

Častěji se používá skalární řízení napětově kmitočtového typu. Je to dáno jednoduchým algoritmem a také spínacími součástkami, které jsou výkonnější a lze je spínat vyšším spínacím kmitočtem.

## 6.2 Vektorová regulace asynchronního motoru

U vektorového řízení je potřeba řídit nejen velikost vektoru magnetického toku, ale i polohu natočení. Vektorové řízení se dělí podle toho, jak se získávají informace o poloze vektoru magnetického toku, na přímé a nepřímé.

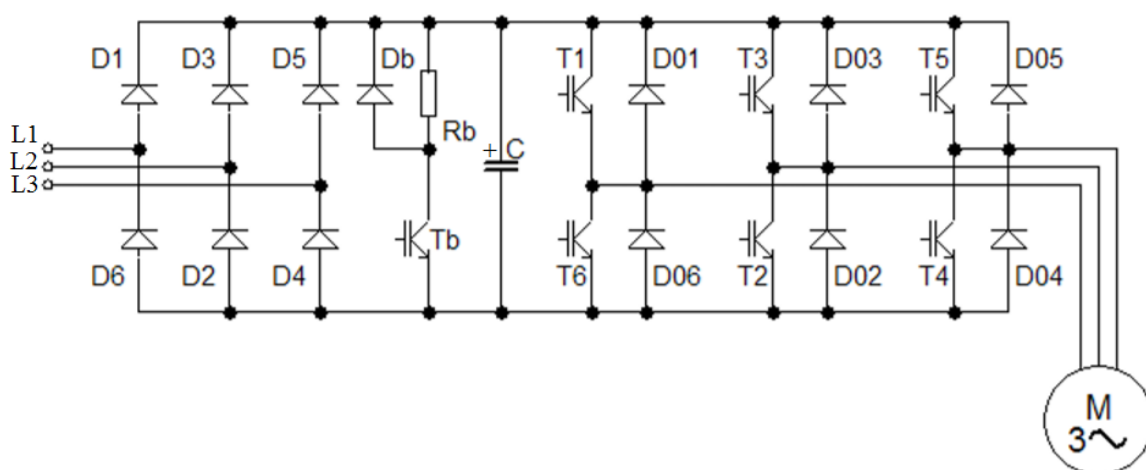
Přímé - vektor magnetického toku je získáván ze statorových napětí a proudů, pokud máme k dispozici matematický model pro výpočet skluzu, není zapotřebí žádné dodatečné snímání otáček nebo polohy rotoru.

Nepřímé - vektor magnetického toku je vypočten z matematického modelu výpočtu skluzu a polohy rotoru. To přináší nutnost měření polohy rotoru. Snímač polohy rotoru lze využít také pro řízení otáček a polohy. Pro řízení otáček se používá jako při skalárním řízení PI regulátor, pro řízení polohy se používá pouze P regulátor. [7]

### 6.3 Přímé řízení momentu asynchronního motoru

Pro tuto metodu je nezbytné mít k dispozici přesný model motoru. Ten se zjišťuje při identifikačním běhu, který se provádí při instalaci motoru do aplikace. Moment motoru je tvořen vektorovým součinem vektoru magnetického toku statoru a rotoru. Pokud udržujeme absolutní hodnotu statorového toku konstantní, je moment úměrný velikosti úhlu statorového a rotorového magnetického toku. Při identifikačním běhu se ladí hlavní parametry modelu motoru. Přímé řízení momentu vyžaduje výkonný signálový mikroprocesor. Princip spočívá ve vytvoření točivého magnetického pole statoru s možností řízení rychlosti otáčení tohoto pole a tím i momentu motoru. Toto řízení dosahuje velmi dobrých výsledků pro dynamicky náročné aplikace. Problém tohoto řízení spočívá v řízení nízkých otáček a reverzaci. [7]

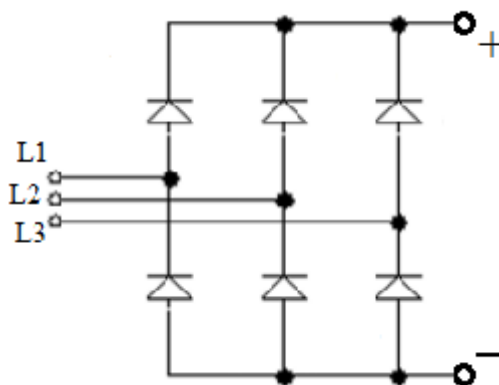
### 6.4 Části frekvenčního měniče pro řízení asynchronního motoru



Obr. 6.1. Schéma výkonového obvodu napěťově kmitočtového řízení asynchronního motoru [8]

### 6.4.1 Vstupní měnič (usměrňovač)

U velmi jednoduchých měničů, u kterých nepotřebujeme možnost rekuperace, používáme 1f nebo 3f můstkový neřízený usměrňovač, který je sestaven pouze z diod. Schéma zapojení můžeme vidět na Obr. 6.2. Pokud má měnič pouze jednofázové napájení, je nutné u motoru na 230/400V přepojit vinutí statoru do trojúhelníka, jinak by došlo ke snížení maximálního momentu, což je nežádoucí. Když je vstupní měnič napájen z třífázové sítě, pak se u motoru 230/400V přepojí statorové vinutí do hvězdy. [8]



Obr. 6.2. 3f můstkový neřízený usměrňovač

V případě, že bychom potřebovali frekvenční měnič provozovat i pro rekuperaci, pak musí být použit jako vstupní měnič pulzní usměrňovač. Pulzní usměrňovač je řízený napěťový střídač, který pracuje v usměrňovačovém režimu. Na rozdíl od diodového neřízeného usměrňovače neodebírá ze sítě proud s velkým obsahem harmonických. [8] Jeho další výhodou je také to, že je schopný vracet výkon zpět do sítě - rekuperovat. [6]

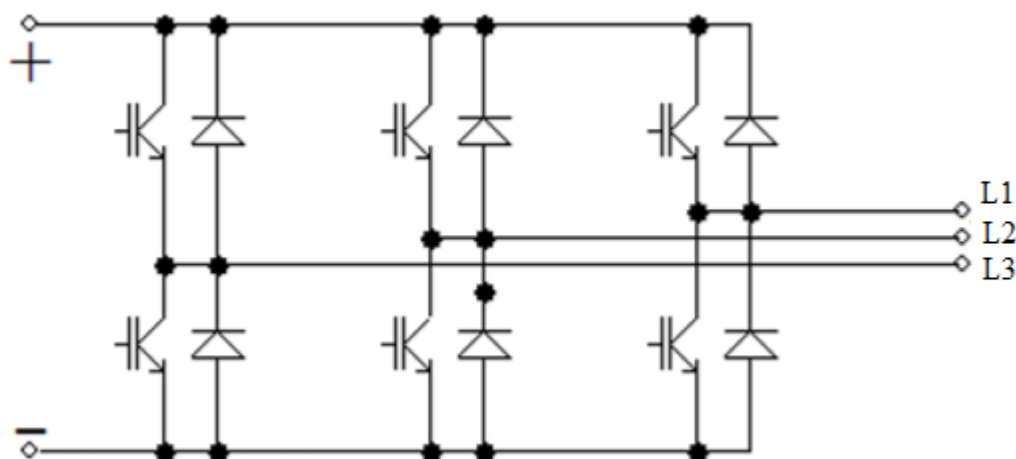
### 6.4.2 Stejnoseměrný meziobvod

Stejnoseměrný meziobvod, jak již název napovídá, se nachází mezi vstupním a výstupním měničem. Skládá se z kondenzátoru nebo soustavy kondenzátorů, které obstarávají přenos a akumulaci elektrické energie mezi sítí a motorem (vstupním a výstupním měničem). Ve stejnosměrném meziobvodu je kromě kondenzátoru umístěn také tranzistor, ke kterému je sériově připojen brzdový odpor. Protože jsou výkonové brzdové odpory vinuté z drátu, mají tudíž indukčnost. Z toho důvodu je k brzdovému odporu paralelně připojena dioda. [2]

Po vypnutí tranzistoru  $T_b$  se na brzděném odporu indukují napětí a dioda  $D_b$  nám uzavírá obvod, aby zaniklo vzniklé indukované napětí na odporu  $R_b$ . Při brzdění se nabíjí kondenzátor  $C$  ve stejnosměrném meziobvodu. Po zvýšení napětí na kondenzátoru se sepne tranzistor  $T_b$  a kondenzátor se začne vybíjet přes odpor  $R_b$ . Po vypnutí tranzistoru  $T_b$  se na odporu  $R_b$  naindukují napětí. Obvod se uzavře přes diodu  $D_b$  a naindukované napětí zanikne na odporu  $R_b$ . Pokud chceme vracet elektrickou energii zpět do sítě - rekuperovat, musí mít vhodný vstupní měnič. Jestliže vstupní měnič není schopen rekuperovat, pak se musí energie měnit v teplo na odporu  $R_b$ .

### 6.4.3 Výstupní měnič (střídač)

Výstupní měnič je vždy střídač. Na zátěži vytváří střídavý výstup a napájí motor. Při použití PWM modulace jde ze střídače do motoru téměř sinusový proud, který ale obsahuje vyšší harmonické. Napětí nemá dobrý průběh a to má špatný vliv na izolaci motoru. Izolace motoru je pulzně namáhána a to vede k její degradaci. [8]



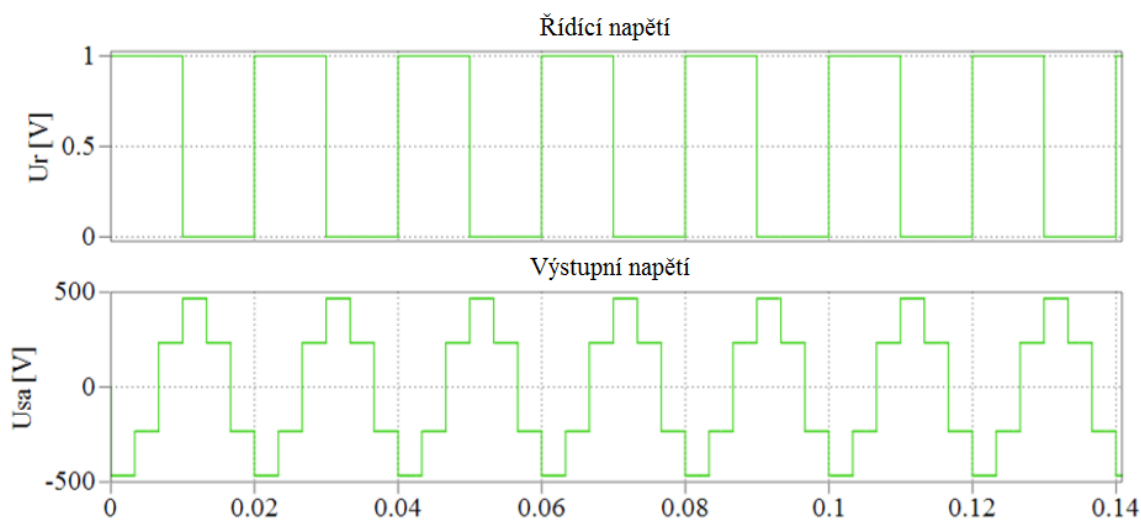
Obr. 6.3. 3f napěťový střídač

## 6.5 Modulace

Pro řízení střídače se využívají různé způsoby řízení. Nejjednodušší ze zde uvedených je obdélkové řízení. Nejvíce používané jsou pak sinusová PWM modulace a PWM modulace s 3. harmonickou. Každý z těchto typů řízení má své výhody a nevýhody a vhodné oblasti využití.

### 6.5.1 Obdélníkové řízení

Obdélníkové řízení je velmi jednoduché řízení, které lze využít pro řízení napětového střídače. Na výstupu střídače je obdélníkový průběh napětí a proud je dán přechodovým dějem na vinutí v motoru. Průběhy nejsou dobré, z důvodu obsahu vyšších harmonických. Obdélníkové řízení se používá hlavně u dvouhladinových napětových střídačů. U tohoto řízení nelze měnit velikost výstupního napětí střídače. Při využití tohoto řízení pro napájení asynchronního motoru je zapotřebí, aby byl vstupní měnič regulovatelný a také aby byl tok v motoru konstantní. Dále se také obdélníkové řízení používá ve vysokých otáčkách motoru k jeho odbuzování. V tomto případě dochází k přechodu ze sinusové PWM modulace na obdélníkové řízení. Nejčastěji se používá u motorů s velkým výkonem, poté co se dosáhne jmenovitých hodnot. [5]

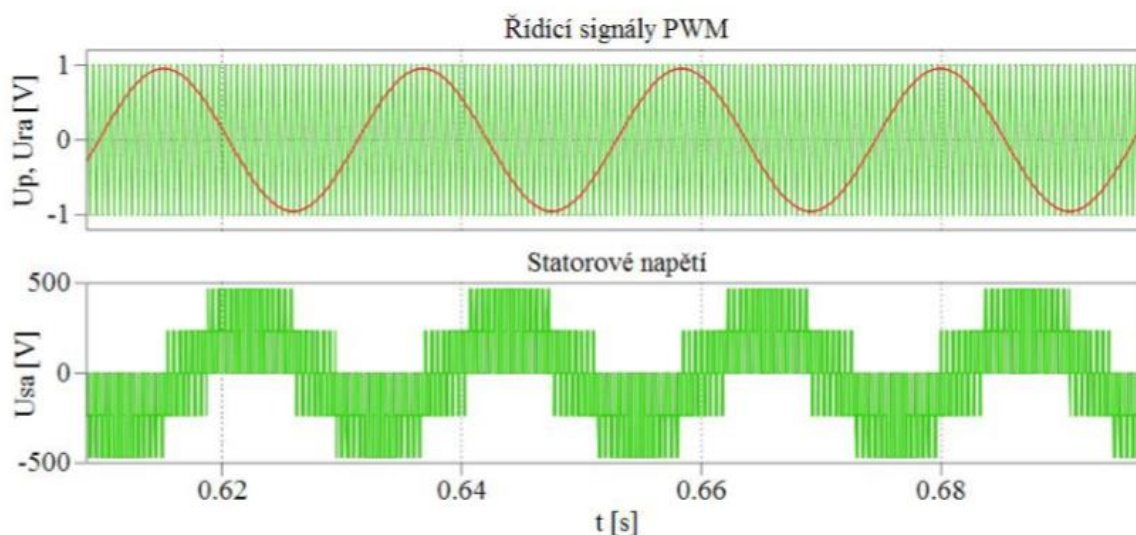


Obr. 6.4. Průběh napětí u obdélníkového řízení [9]

### 6.5.2 Sinusová PWM modulace

V dnešní době je to nejčastěji využívaný způsob modulace napětového střídače. Tímto způsobem modulace získáme na výstupu střídače téměř harmonický sinusový proud. U této modulace je možné měnit výstupní napětí i frekvenci. [5]

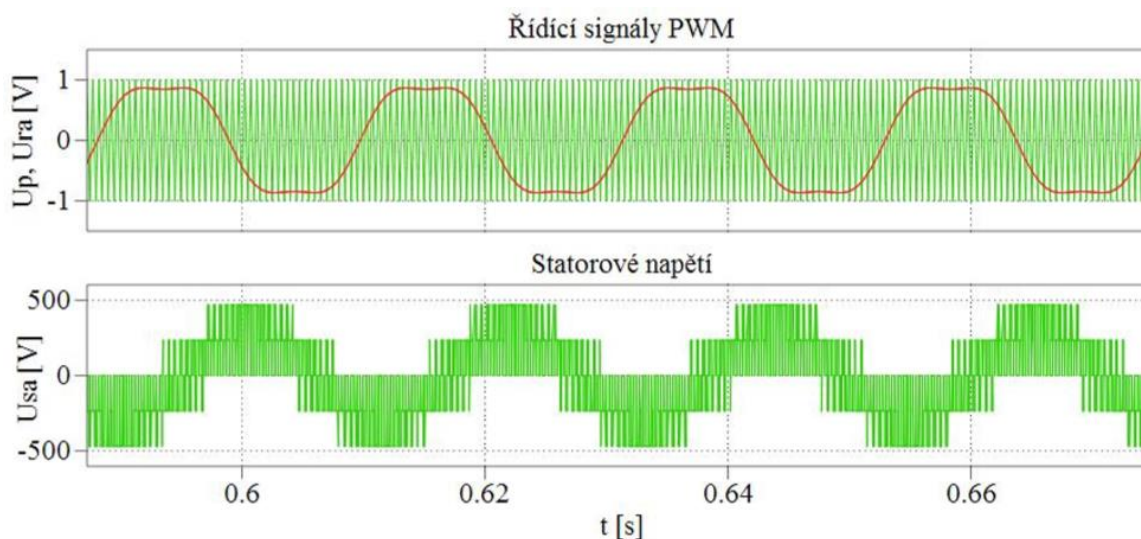
Napětí na výstupu střídače je pulzní a dochází tím k pulznímu namáhání izolace motoru a její degradaci. Tímto typem modulace je možné dosáhnout na výstupu střídače pouze 82% ( $U_a$ )<sub>ef</sub>. Pokud bychom chtěli dosáhnout vyššího napětí na výstupu měniče, museli bychom použít na vstupu měniče transformátor, který by zvýšil vstupní napětí. [6]



Obr. 6.5. Průběh napětí u sinusové PWM modulace [9]

### 6.5.3 Sinusová PWM modulace s 3. Harmonickou

Tento typ PWM modulace se využívá pro zvýšení výstupního napětí střídače. U tohoto typu modulace není potřeba pro zvýšení vstupního napětí použít na vstupu transformátor. Princip je v tom, že na 1. harmonickou je přidána 3. harmonická. Na motor bez vyvedeného středu, nemá 3. harmonická střídače žádný vliv, protože nemůže ve vinutí statoru vyvolat žádný proud. [6]



Obr. 6.6. Průběh napětí u sinusové PWM modulace s 3. harmonickou [9]

## 6.6 Skalární řízení bez čidla otáček s náběhovou rampou

Skalární řízení bez čidla otáček je nejjednodušší a levná varianta skalární regulace. Její nevýhodou jsou ale nedokonalé průběhy. [6]

Blokové schéma algoritmu skalárního řízení bez čidla otáček je na Obr. 6.7.

Blok F plní funkci náběhové rampy a zajišťuje dostatečně pomalý náběh požadované hodnoty při skokové změně regulované veličiny. Díky tomu nám bude motor pracovat v lineární části momentové charakteristiky. Jestliže by došlo k odbuzování motoru a asynchronní motor by začal pracovat v nelineární části momentové charakteristiky, tak by došlo ke snížení maximálního momentu, což je nežádoucí. [6]

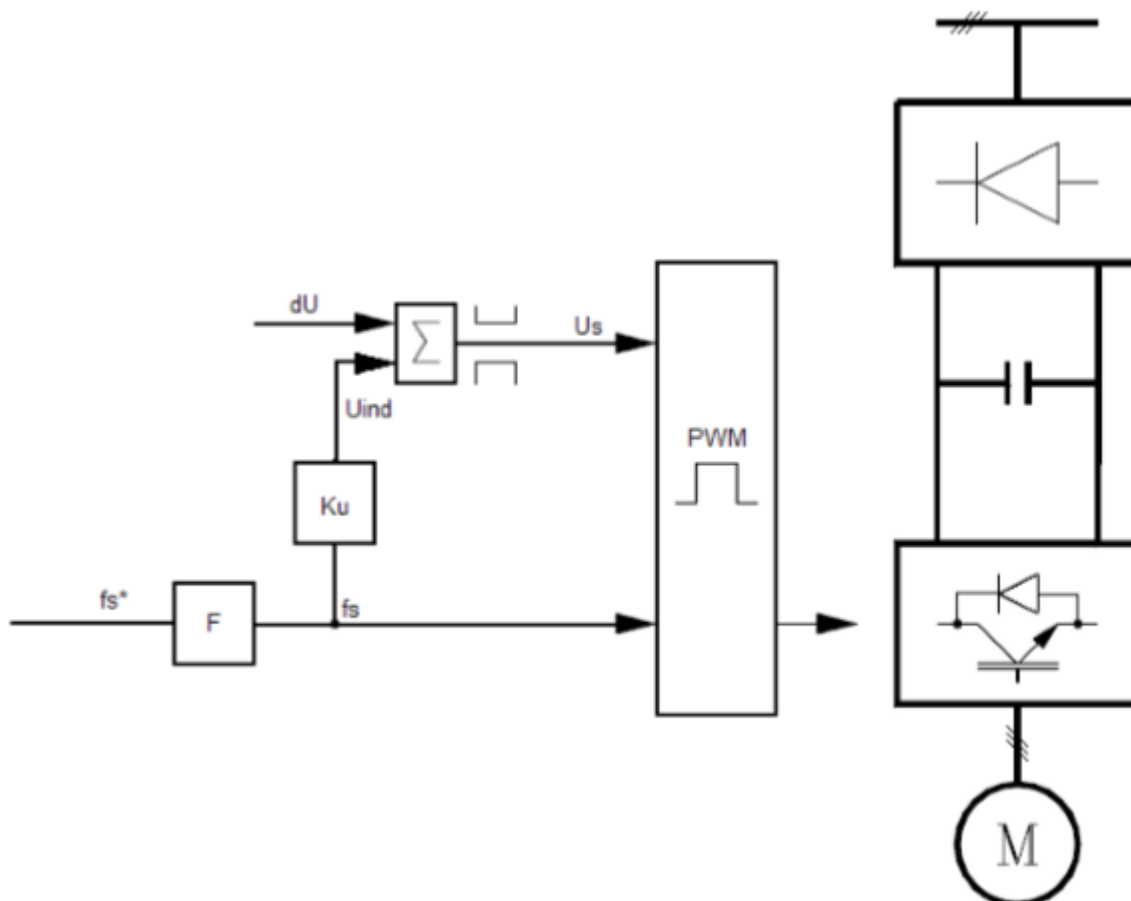
Blok  $\Delta U$  zajišťuje napětí v oblasti nízkých otáček, které je třeba na pokrytí úbytků vznikajících na statorovém vinutí. Při požadované  $f_s \rightarrow 0$  je požadavek na  $U_s \rightarrow 0$ , ale tak malé napětí by neprotlačilo statorovým vinutím potřebný proud k rozběhnutí motoru. Proto se přičítá malá konstanta  $\Delta U$ , která zabezpečí potřebné napětí na pokrytí úbytku na statorovém vinutí. [6]

Blok  $K_u$  počítá přibližné indukované napětí ve stroji. Za blokem  $K_u$  se  $U_{ind}$  sečte s  $\Delta U$ , které pokrývá úbytky napětí na vinutí statoru. Součtem těchto dvou napětí pak dostaneme potřebné statorové napětí  $U_s$ . [6] Uvnitř asynchronního motoru, který je skalárně regulován můžeme spočítat přibližné indukované napětí podle rovnice (6.3.).

$$K_U = \frac{U_{(sN)ef} \cdot \sqrt{2}}{f_{sN}} \quad (6.3.)$$

Blok PWM generuje, pomocí algoritmu sinusové PWM nebo sinusové PWM s 3. harmonickou, spínací impulsy pro tranzistory ve střídači. V skutečných provedeních se mezi spínací impulsy přidávají krátké časové zpoždění (1-3  $\mu$ s), aby součástky stíhaly obnovit svoji blokovací schopnost a nevznikl nám zkrat. [6]





Obr. 6.7. Blokové schéma skalárního řízení asynchronního motoru bez čidla otáček [6]

## 6.7 Skalární řízení s čidlem otáček

Skalární regulace s čidlem otáček je už velmi kvalitní regulace oproti variantě bez čidla. Můžeme říci, že má už v celku dobré dynamické vlastnosti, přesto ale pro dynamicky náročné pohony je dobré využít vektorové regulace nebo přímé regulace momentu. Její nevýhodou je, že pro správnou práci tohoto algoritmu, je nutné mít velmi přesné čidlo otáček, které nám dodává informace o aktuální mechanické rychlosti motoru. [6]

Blokové schéma algoritmu skalárního řízení s čidlem otáček je na Obr. 6.8.

Blok  $R_{\omega}$  je regulátor otáček, realizovaný jako PI v analogové verzi regulátoru, nebo PS v mikroprocesorové verzi regulátoru. [6]

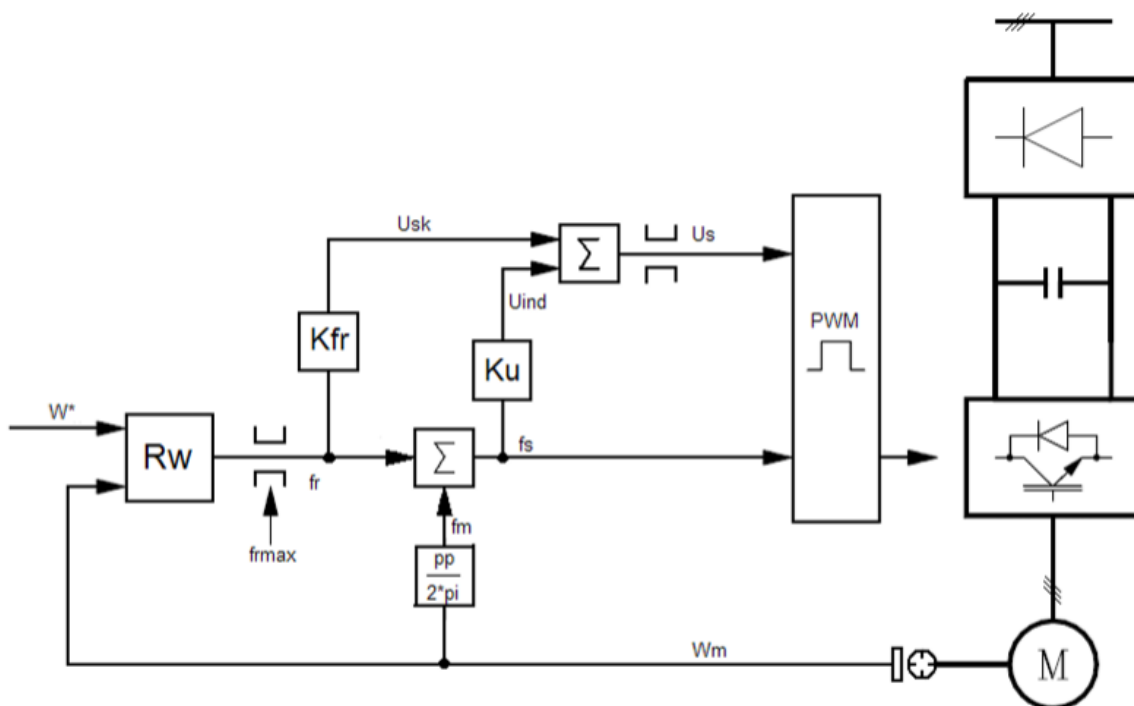
Blok  $K_{fr}$  z rovnice (6.4.) počítá relativně přesně úbytek napětí na statorovém vinutí, který se sečte s přibližným indukovaným napětím, které se počítá z rovnice (6.3.). Zpřesní

se výpočty pro regulaci a tím se zlepši mimo jiné i dynamické vlastnosti pohonu. To znamená, že bude lepší odezva momentu i rychlosti na požadovanou hodnotu. [6]

$$K_{fr} = \frac{U_{(sN)ef} \cdot \sqrt{2} \cdot R_s}{f_{sN} \cdot R_r} \quad (6.4.)$$

Blok  $K_u$  počítá přibližné indukované napětí ve stroji. Za blokem  $K_u$  se  $U_{ind}$  sečte s  $\Delta U$ , které pokrývá úbytky napětí na vinutí statoru. Součtem těchto dvou napětí pak dostaneme potřebné statorové napětí  $U_s$ . [6] Uvnitř asynchronního motoru, který je skalárně regulován můžeme spočítat přibližné indukované napětí podle rovnice (6.3.).

Blok PWM generuje, pomocí algoritmu sinusové PWM nebo sinusové PWM s 3. harmonickou, spínací impulsy pro tranzistory ve střídači. V skutečných provedeních se mezi spínací impulsy přidávají krátké časové zpoždění (1-3  $\mu$ s), aby součástky stihaly obnovit svoji blokovací schopnost a nevznikl nám zkrat. [6]



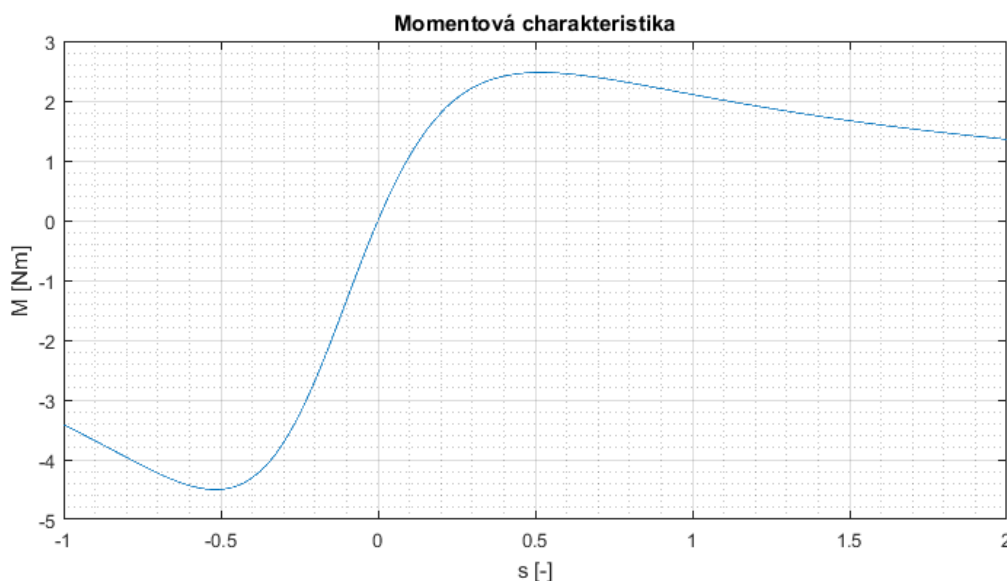
Obr. 6.8. Blokové schéma skalárního řízení asynchronního motoru s čidlem otáček [6]

## 7 Simulace

Simulace je zaměřena na porovnání skalárního řízení bez čidla otáček oproti skalárnímu řízení s čidlem otáček. Je provedena pomocí prostředí MATLAB/Simulink. K simulaci řízení jsou použity parametry skutečného asynchronního motoru. Asynchronní motor je simulován jeho matematickým modelem. Pro simulace byl vybrán motor s následujícími parametry:

- $P_N = 250 \text{ W}$
- $U_{sN} = 48 \text{ V (D)}$
- $I_N = 3,65 \text{ A}$
- $f_{sN} = 50 \text{ Hz}$
- $n_n = 1350 \text{ ot/min}$
- $R_s = 2 \text{ } \Omega$
- $L_{s\sigma} = 0,01049 \text{ H}$
- $R_r = 3,56 \text{ } \Omega$
- $L_{r\sigma} = 0,01049 \text{ H}$
- $L_h = 0,0567 \text{ H}$
- $2p = 4$
- $J = 0,0004 \text{ Nms}^2$

Pro tyto parametry vychází momentová charakteristika uvedená na Obr. 7.1.



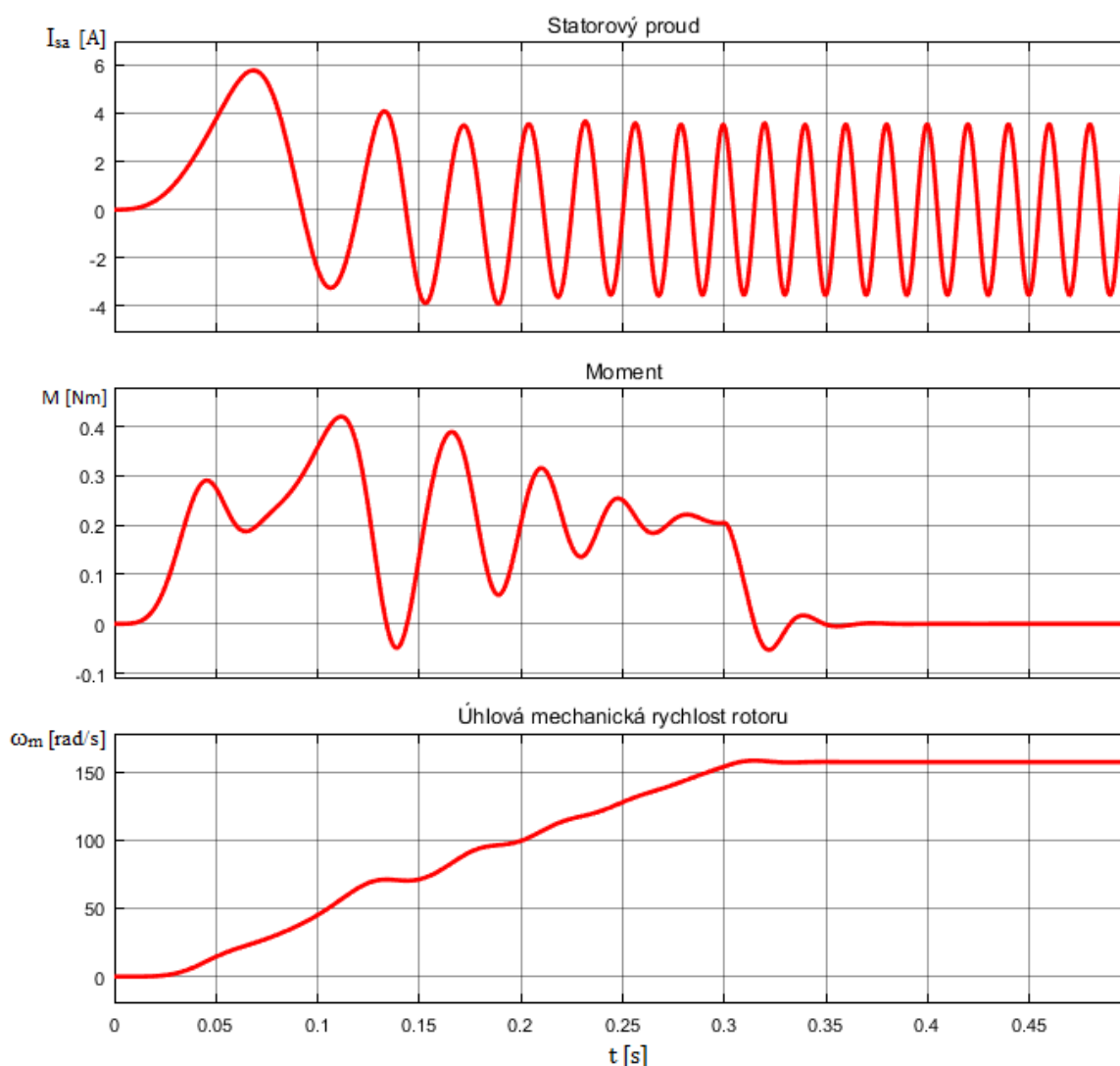
Obr. 7.1. Momentová charakteristika asynchronního motoru použitého v simulaci

## 7.1 Simulace skalárního řízení bez čidla otáček

Na Obr. 7.2 můžeme vidět průběh statorového proudu  $I_{sa}$ , momentu  $M$  a mechanickou úhlovou rychlost rotoru  $\omega_N$  při spouštění. Protože má motor čtyři póly, tudíž dva pólpáry ( $p = 2$ ) je jeho jmenovitá mechanická frekvence poloviční.

$$\omega_N = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} \quad (7.1.)$$

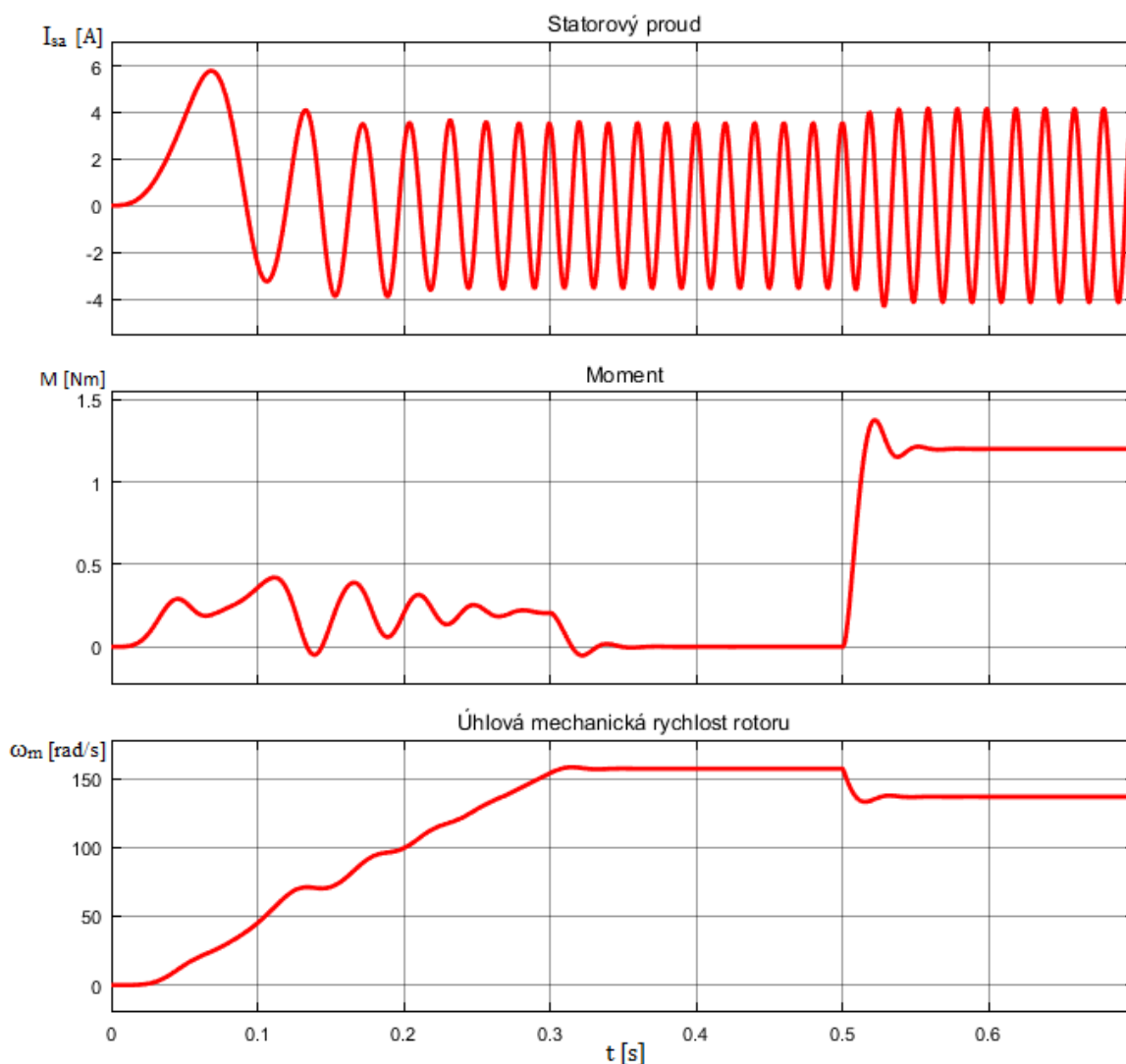
V čase  $t = 0$  je asynchronní motor připojen k napětí 48 V a frekvenci 50 Hz. Za použití náběhové rampy se frekvence nezmění skokově, ale ze začátku, než se motor roztočí, pomalu poroste. Otáčky se ustálí na jmenovité hodnotě  $\omega_N = 157,1$  [rad/s] v čase  $t = 0,33$  [s].



Obr. 7.2. Průběhy spouštění asynchronního motoru při skalárním řízení bez čidla otáček

Na Obr. 7.3. můžeme vidět průběh satorového proudu  $I_{sa}$ , momentu  $M$  a mechanickou úhlovou rychlost rotoru  $\omega_N$  při spouštění a následném připojení zátěže.

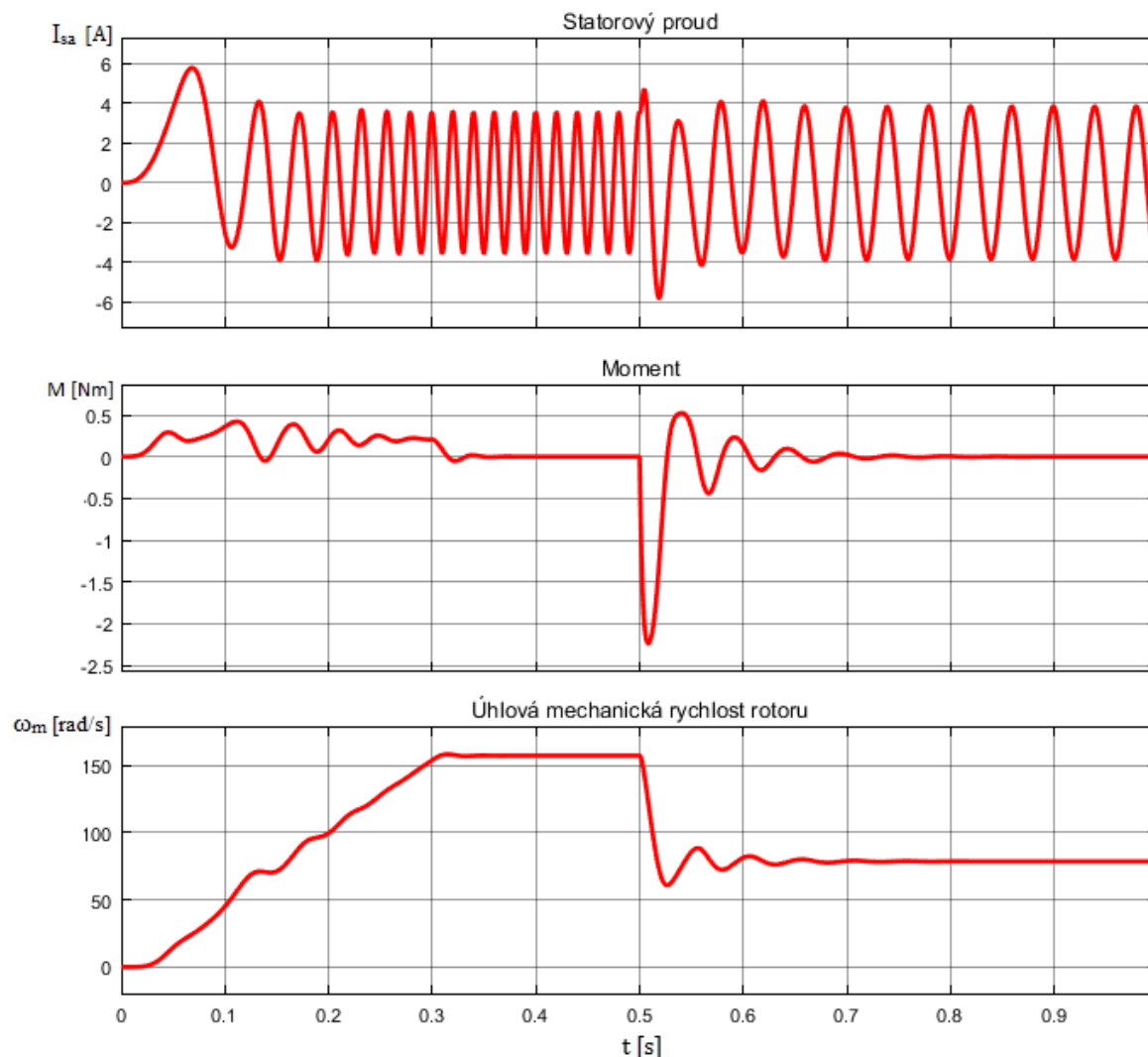
Nyní po rozeběhnutí motoru připojíme v čase  $t = 0,5$  [s] zátěž, a to v podobě zátěžného momentu 1,2 Nm. Po připojení zátěže můžeme vidět mírný nárůst satorového proudu a také nárůst momentu na hřídeli motoru. Protože tato varianta skalárního řízení není vybavena zpětnou vazbou z čidla otáček, tak nám úměrně poklesne mechanická rychlost na hřídeli rotoru a zůstane tak.



Obr. 7.3. Průběhy spuštění a následné připojení zátěže

Na Obr. 7.4 můžeme vidět přechodový děj, kdy v čase  $t = 0,5$  [s] je zadán požadavek na snížení mechanické rychlosti na polovinu. Moment při přechodovém ději

kmitá a ustálí se přibližně za 0,1 s. Na úhlové mechanické rychlosti rotoru je vidět při zpomalení kolísání otáček.

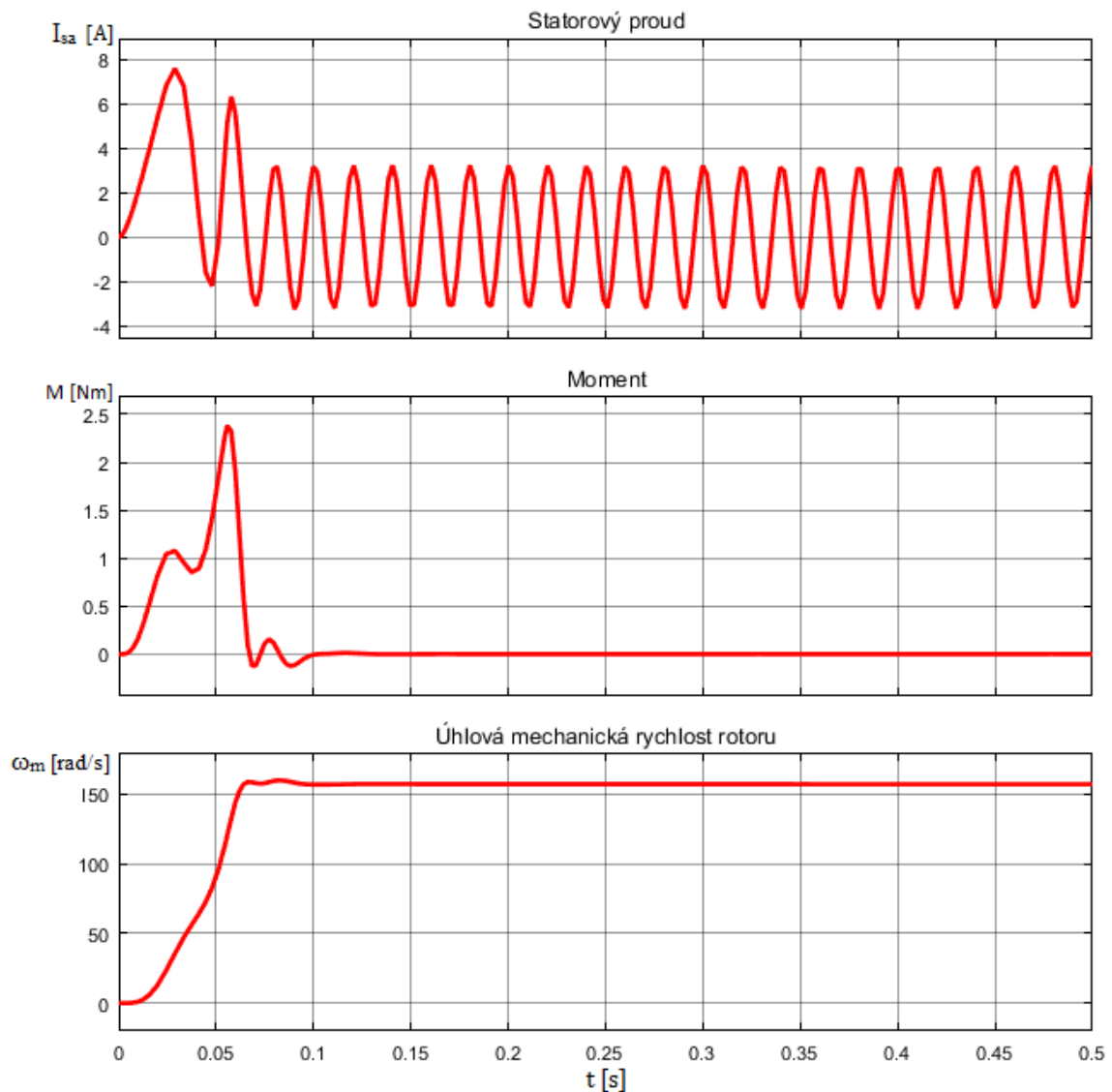


Obr. 7.4. Průběhy rozběhu a následné změny otáček

## 7.2 Simulace skalárního řízení s čidlem otáček

V této variantě skalárního řízení asynchronního motoru je použita jako zpětná vazba čidlo otáček. Simulace je provedena se sinusovou PWM modulací.

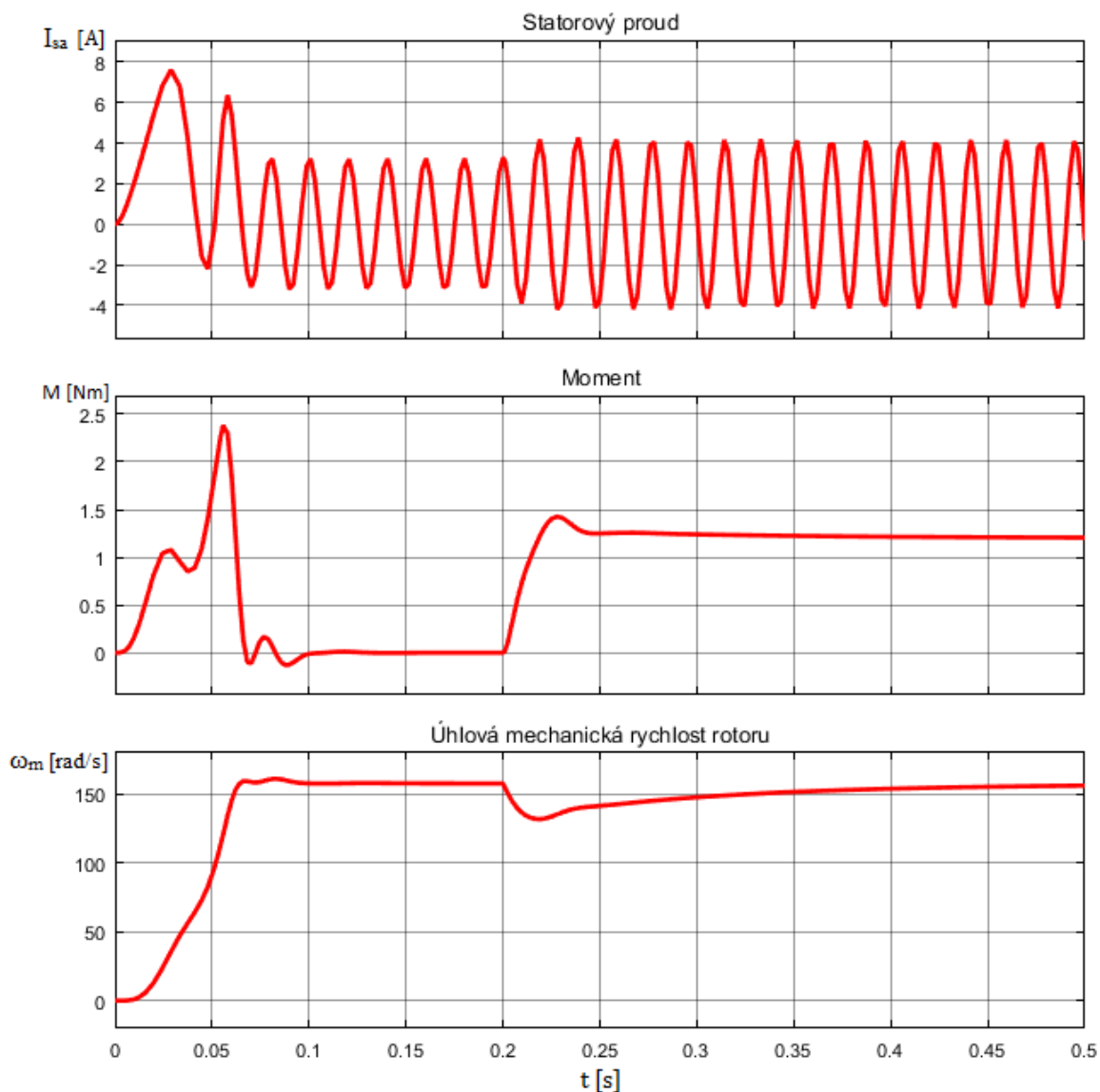
Nastavení PI regulátoru otáček je provedeno tak, aby se průběh mechanické rychlosti  $\omega_m$  co nejrychleji ustálil a dobře tlumil. Proto je zvolené zesílení regulátoru  $K_P = 0,85$  [-] a  $K_I = 8$  [-]. Regulátor s  $K_P = 0,85$  [-] s  $K_I = 0$  [-] reguluje dobře k požadované hodnotě. Přidáním integrační složky  $K_I = 8$  [-] se zvětší přesnost regulované veličiny. Při tomto nastavení regulátoru se motor rozběhne na mechanickou úhlovou rychlost  $\omega \rightarrow \omega_N$  za 0,1 s a ustálí se bez velkých překmitů na požadované hodnotě.



Obr. 7.5. Průběhy spouštění asynchronního motoru při skalárním řízení s čidlem otáček

Na Obr. 7.5. je vidět, že při skalární regulaci s čidlem otáček se motor rozeběhne a ustálí na jmenovité mechanické rychlosti za 0,1 s, což je přibližně o 0,25 s rychlejší než u skalární regulace bez čidla otáček.

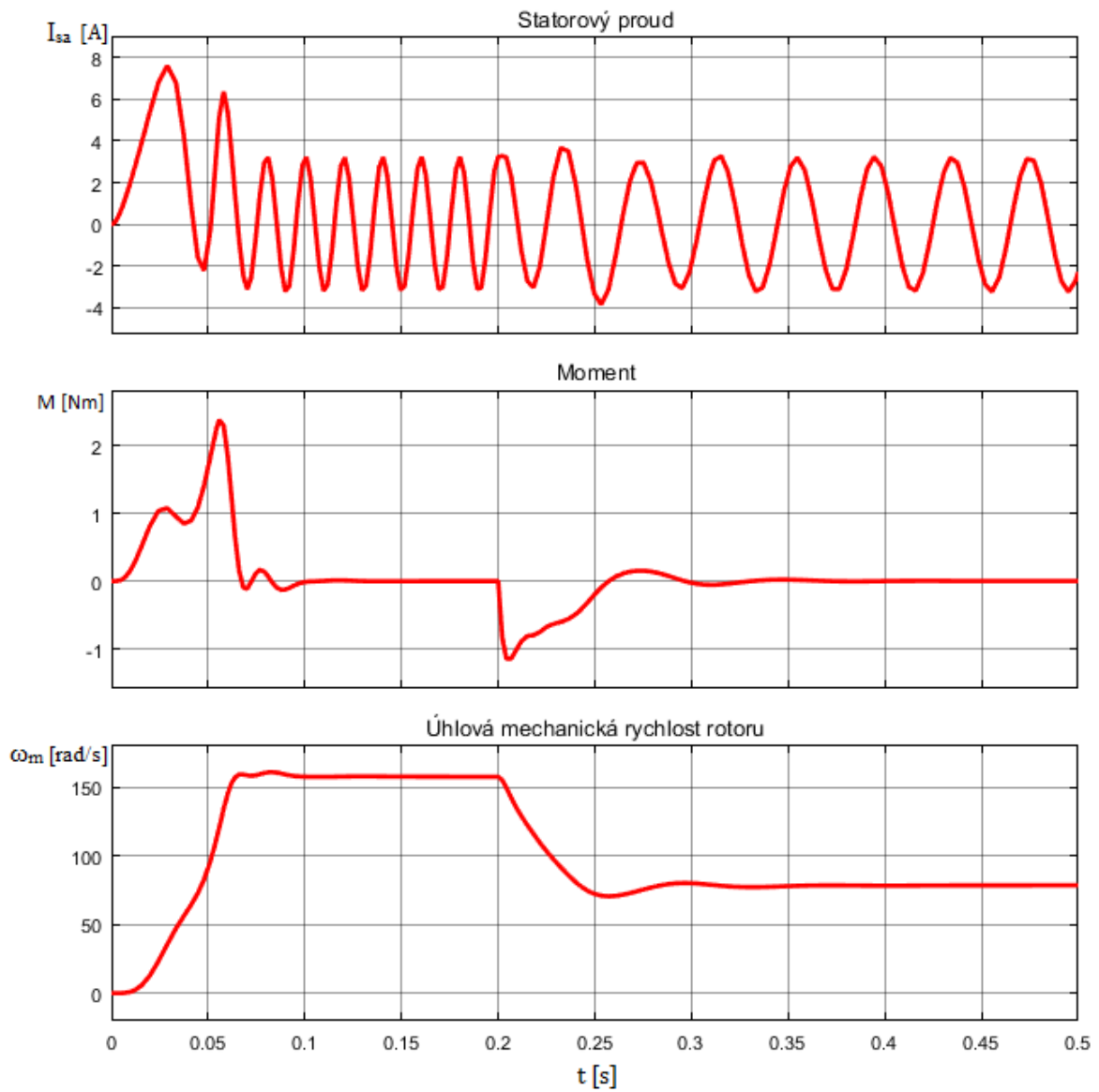
Na Obr.7.6. je připojena v čase  $t = 0,2$  [s] zátěž, a to v podobě zátěžného momentu 1,2 [Nm]. Díky tomu, že je tato varianta vybavena čidlem otáček, regulátor doreguluje pokles mechanické rychlosti zpět na požadovanou hodnotu za 0,25 s.



Obr. 7.6. Průběhy spuštění a následné připojení zátěže

Na Obr. 7.7. můžeme vidět přechodový děj, kdy v čase  $t = 0,2$  [s] je zadán požadavek na snížení mechanické rychlosti na polovinu. Moment při přechodovém ději nekmitá, ale plynule mění svou velikost a ustálí se přibližně za 0,1 s. Na úhlové mechanické rychlosti rotoru je vidět, že ke zpomalení dochází díky čidlu otáček a regulátoru plynule bez kmitání. Rychlost je na požadované velikosti přibližně za 0,05 s.





Obr. 7.7. Průběhy rozběhu a následné změny otáček

## Závěr

V bakalářské práci jsem popsal druhy asynchronních motorů, jejich části, a princip funkce. Následně jsem popsal ustálený stav asynchronního motoru, a jeho momentovou charakteristiku.

Dále jsem se zabýval možnými způsoby rozběhu asynchronních motorů, kde jsem popsal základní princip dané metody.

V další části této práce jsem se zabýval problematikou řízení otáček asynchronního motoru. Uvádím zde možné druhy bezztrátové regulace. Popisuji části frekvenčního měniče a možné typy řízení jeho střídače. Dále se pak zaměřuji na skalární regulaci bez čidla otáček a s čidlem otáček. Popisuji princip funkce, a jednotlivé bloky blokového schéma daného řízení. Uvádím zde také jejich výhody a nevýhody.

V závěrečné části této práce verifikuji skalární řízení bez čidla otáček a s čidlem otáček na simulaci. Simulaci jsem provedl pomocí prostředí MATLAB/Simulink, kde jsem asynchronní motor simuloval jeho matematickým modelem. Ze simulací je patrné, že skalární regulace bez čidla otáček má špatné dynamické vlastnosti. Při rozběhu moment tlumeně kmitá. Po ustálení na požadované hodnotě je moment téměř konstantní. Při zatížení motoru zátěžným momentem klesnou mechanické otáčky motoru a ustálí se na nižší hodnotě než jmenovité. Motor se pak točí s odchylkou od požadované rychlosti dál. Oproti tomu skalární regulace s čidlem otáček má lepší dynamickou odezvu na požadované hodnoty než skalární regulace bez čidla otáček. Při této variantě regulace je velmi důležité mít kvalitní a přesné čidlo otáček, které nám měří aktuální velikost mechanických otáček rotoru pro zpětnou vazbu. Jinak by i tato varianta skalární regulace neměla dobré vlastnosti. I přes tyto lepší vlastnosti je vhodnější pro dynamicky náročné pohony využít vektorové regulace nebo přímé regulace momentu. Pořád má ale lepší vlastnosti než skalární regulace bez čidla otáček.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PETROV, G. N. Elektrické stroje 2 : *Asynchronní stroje - synchronní stroje*. 1. vydání . Praha : Academia, 1982. 732 s.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. Elektrické stroje : *Působení, provedení a navrhování*. 6. upravené vydání. Praha : Technicko-vědecké vydavatelství, 1951. 816 s.
- [3] ŠTĚPINA, Jaroslav. *Jednofázové indukční motory*. 1. vydání . Praha : Sntl, 1957. 198 s.
- [4] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 180 s. ISBN 80-7043-422-8.
- [5] JAVŮREK, Jiří. *Regulace moderních elektrických pohonů*. 1. vyd. Praha, 2003. 264 s. ISBN 80-247-0507-9.
- [6] ZEMAN, Karel, PEROUTKA, Zdeněk, JANDA, Martin. *Automatická regulace pohonů s Asynchronními motory*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2007. 204 s. ISBN 978-80-7043-350-8.
- [7] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické regulované pohony*. Brno: FEKT VUT v Brně. 123 s.
- [8] PITTERMANN, Martin. *Elektrické pohony základy*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. 100 s. ISBN 978-80-7043-729-2
- [9] KORANDA, Václav. *Simulace pohonu s asynchronním motorem v prostředí Matlab/Simulink*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, FEL

