

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Simulace pohonu s asynchronním motorem  
v prostředí Matlab/Simulink**

Zadání

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřena hlavně na simulaci přechodových dějů v pohonu s asynchronním motorem. K simulaci bylo použito prostředí Matlab/Simulink se speciální knihovnou Plecs, která je určena pro simulaci v oboru výkonové elektroniky a pohonů.

Teoretická část se zabývá teorií skalárního řízení asynchronního motoru a možnostmi, jak lze řídit střídač. Dále se zabývá vlastnostmi asynchronního motoru, které se využívají v pohonu se skalární regulací (náhradní schéma a jeho matematický popis). Praktická část je zaměřena na simulace vybraných přechodových dějů v pohonu.

## **Klíčová slova**

Elektrický pohon, asynchronní motor, skalární řízení, napěťový střídač, simulace, Plecs.

## **Abstract**

This work is aimed at simulation of the induction motor drive. The simulation uses Matlab / Simulink environment. Simulation is mainly focused on the transition going on in the drive.

Theoretical part deals with theory of scalar control of induction motor and possibilities of control of voltage inverter. Also this work deals with properties of induction motor which are used within propulsion with scalar regulation. Practical part deals with simulation of chosen propulsion's transients.

## **Key words**

Electric drive, induction motor, scalar control, voltage inverter, simulation, Plecs.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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.

V Plzni dne 7.6.2012

.....

Václav Koranda

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Kamenickému za metodické vedení při vypracování práce a tvorbě modelů v simulačním programu. Děkuji mu i za věcné připomínky a rady při řešení práce.

# Obsah

<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>11</b>
<b>1. ASYNCHRONNÍ STROJ .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1. Provedení rotoru asynchronního stroje .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2. Momentová charakteristika .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3. Náhradní schéma asynchronního motoru v ustáleném stavu.....</b>	<b>15</b>
<b>2. REGULACE ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. Asynchronní motor s vinutou kotvou .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2. Asynchronní motor s kotvou nakrátko .....</b>	<b>17</b>
2.2.1. Přepínání počtu pólů.....	18
2.2.2. Rozběh $Y \rightarrow D$ .....	18
2.2.3. Soft-start.....	18
2.2.4. Regulace frekvenčním měničem .....	19
<b>3. SKALÁRNÍ REGULACE ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1. Výkonový obvod napět'ově kmitočtového řízení .....</b>	<b>21</b>
3.1.1. Vstupní měnič (usměrňovač).....	21
3.1.2. Stejnoseměrný meziobvod .....	22
3.1.3. Výstupní měnič (střídač) .....	22
<b>3.2. Modulace.....</b>	<b>23</b>
3.2.1. Obdélníkové řízení .....	23
3.2.2. Sinusová PWM modulace .....	24
3.2.3. Sinusová PWM modulace s 3. harmonickou.....	25
<b>3.3. Skalární řízení bez čidla otáček s náběhovou rampou.....</b>	<b>26</b>
<b>3.4. Skalární řízení s čidlem otáček .....</b>	<b>27</b>

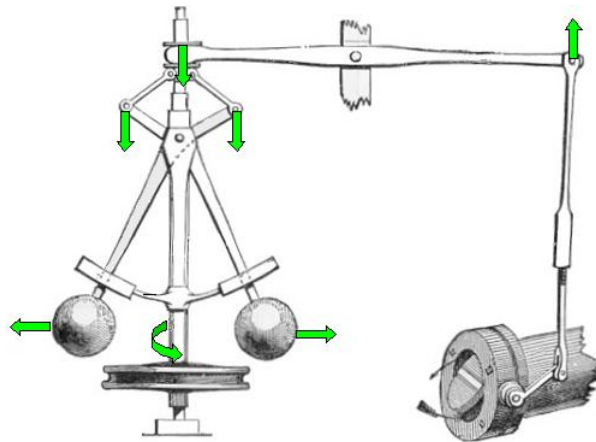
<b>4. MATLAB A PROSTŘEDÍ SIMULINK.....</b>	<b>29</b>
4.1. Matlab .....	29
4.2. Simulink .....	29
4.3. Plecs.....	29
<b>5. SIMULACE.....</b>	<b>31</b>
5.1. Napět'ově kmitočtové řízení bez čidla otáček .....	31
5.1.1. Obdélníkové řízení .....	32
5.1.2. PWM modulace.....	33
5.1.3. PWM modulace s 3. harmonickou .....	34
5.2. Napět'ově kmitočtové řízení s čidlem otáček .....	35
5.2.1. PWM modulace.....	36
5.2.2. PWM modulace s 3. Harmonickou .....	42
<b>6. ZÁVĚR .....</b>	<b>48</b>
<b>7. LITERATURA .....</b>	<b>49</b>
<b>8. PŘÍLOHY .....</b>	<b>50</b>
8.1. Seznam obrázků .....	50
8.2. Seznam grafů.....	50
8.3. M-script pro výpočet Klossova vztahu .....	51



## Úvod

V celé historii lidstva bylo vždy zapotřebí regulovat různé zařízení. Větrné mlýny, vodní mlýny, pily, parní stroje. To se vždy provádělo mechanicky. U vodních mlýnů průtokem vody skrz mlýnské kolo. U větrných mlýnů se natáčely lopatky.

U parního stroje se používal Wattův odstředivý regulátor. U tohoto regulátoru bylo mechanickou konstrukcí dosaženo záporné zpětné vazby. Tímto regulátorem bylo možné dobře regulovat velmi výkonné stroje.[6]



Obr. 1: Wattův odstředivý regulátor pro parní stroj [6]

Jako první regulované elektrické pohony byly stejnosměrné stroje. Nejprve se regulovaly skokově, při této regulaci byly v pohonu velké ztráty. V pozdější době, s příchodem polovodičových součástek, se začaly stejnosměrné elektrické pohony regulovat pulsně a tato regulace byla bezztrátová. Ztráty vznikaly pouze na spínacích součástkách.

Asynchronní motory bylo možné regulovat pouze s vinutou kotvou. To se realizovalo skokově změnou odporu v rotoru nebo pomocí složitých kaskád. Byla to ztrátová regulace.

Asynchronní motor s kotvou nakrátko nebylo možné regulovat bez frekvenčních měničů. Pro dobrou plynulou regulaci je zapotřebí měnit napájecí frekvenci a amplitudu napětí. To bylo možné až příchodem lepších spínacích součástek v 90. letech. Do té doby se nedal asynchronní motor kvalitně plynule regulovat. Dnes se používá téměř ve všech pohonech asynchronní motor se skalárním řízením, vektorovým řízením nebo přímým řízením momentu.

Tato práce je zaměřena na simulaci vybraných přechodových dějů v pohonu s asynchronním motorem, který je napájen z napětového střídače a je řízen skalární regulací

s čidlem otáček a bez čidla otáček. Tuto práci jsem si vybral, protože v dnešní době, se téměř všude využívají pohony s asynchronními motory. Mimo jiné je téma regulace asynchronních motorů velmi populární pro moderní aplikace pohonů.

Teoretická část je zaměřena na vlastnosti a matematický popis asynchronního motoru, který se využívá ve skalární regulaci. Dále je zaměřena způsoby skalární regulace asynchronního motoru a na způsoby, kterými lze řídit střídač.

## Seznam symbolů a zkratk

$f_s, f_r, f_m$	frekvence statoru, frekvence rotoru, frekvence mechanická [Hz]
$\omega_s, \omega_r, \omega_m$	úhlová rychlost statoru, rotoru, mechanická [rad/s]
$R_s, R_r$	odpor statoru, odpor rotoru [ $\Omega$ ]
$I_r, I_s$	proud statoru, proud rotoru [A]
$L_\sigma, X_\sigma$	rozptylová indukčnost [H], rozptylová reaktance [ $\Omega$ ]
$M, M_k$	moment [N.m], kritický moment [N.m]
$s, s_k$	skluz [-], kritický skluz [-]
$f_{rk}$	kritická frekvence rotoru [Hz]
$P_\delta$	výkon ve vzduchové mezeře [W]
$p_p$	počet pól párů [-]
$n$	otáčky motoru [1/min]
$L_h, L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$	indukčnost hlavní, rozptylová statoru, rozptylová rotoru [H]
$X_h, X_{s\sigma}, X_{r\sigma}$	reaktance hlavní, rozptylová statoru, rozptylová rotoru [ $\Omega$ ]
$U_a, U_s$	fázové napětí statoru [V]
$U_d$	výstupní napětí usměrňovače [V]
$U_N$	jmenovité napětí motoru [V]
$U_r$	řídící napětí [V]
$U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}$	fázové napětí na statoru motoru napájeného ze střídače
$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$	proud protékající statoru motoru napájeného ze střídače
$f_N$	jmenovitá frekvence napájecího napětí motoru [Hz]
$f_{sw}$	požadovaná frekvence napájecího napětí [Hz]
$\psi_s$	elektrický tok [V.s; Wb]
$I_s^{(1)}$	proud 1. harmonické [A]
$T, t$	perioda, čas [s]
$(U_{sN})_{ef}$	jmenovité efektivní napětí statoru [V]
$U_{ra}, U_{rb}, U_{rc}$	koincidenční napětí (sinusová PWM modulace + 3. Harm.) [V]
$U_p$	pilové napětí [V]
$\omega_N$	jmenovitá úhlová rychlost motoru (mechanická)

## 1. Asynchronní stroj

Asynchronní stroj dnes patří mezi nejpoužívanější a nejrozšířenější motory díky své ceně a jednoduchosti. Lze se s nimi setkat prakticky všude (kuchyňské přístroje, zahradní technika, nářadí, trakce a další jiné aplikace).

Výhoda asynchronního motoru je, že nemá komutátor, který je velmi drahý a složitý na výrobu. Mimo jiné se musí udržovat a tím se zvyšují náklady na provoz. Protože asynchronní motor nemá komutátor, není potřeba údržba kartáčů a nedochází k znečištění uvnitř stroje od prachu z kartáčů.

### 1.1. Provedení rotoru asynchronního stroje

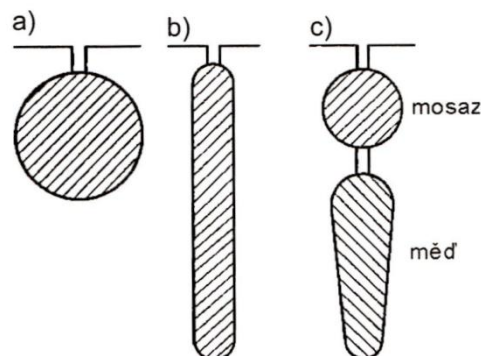
Konstruktivním provedením rotoru asynchronního motoru lze ovlivnit parametry stroje (momentovou charakteristiku, rozběhové proudy, záběrný moment, ztráty, účinnost). Tím nám vzniká velká škála variant a možností pro využití v různých aplikacích. Pro regulované pohony jsou vhodné asynchronní motory s tvrdou momentovou charakteristikou, protože mají menší ztráty v rotoru.

Z konstrukčního provedení rotoru lze asynchronní motory rozdělit na dvě základní skupiny:

- s kotvou nakrátko
- s vinutou kotvou

Motory s kotvou nakrátko lze dále dělit také podle provedení drážek na rotoru:

- Jednoduchá
- Vírová klec
- Dvojitá (Boucherotova) klec



Obr. 2: Tvary drážek u asynchronního motoru [5]

## 1.2. Momentová charakteristika

Momentovou charakteristiku asynchronního stroje lze rozdělit na několik částí. V oblasti od  $s \in (0 \div 1)$  je asynchronní stroj provozován v režimu motor. V oblasti  $s \in (1 \div 2)$  je asynchronní stroj provozován v režimu brzda. V oblasti  $s \in (-1 \div 0)$  je asynchronní stroj provozován v režimu generátor.

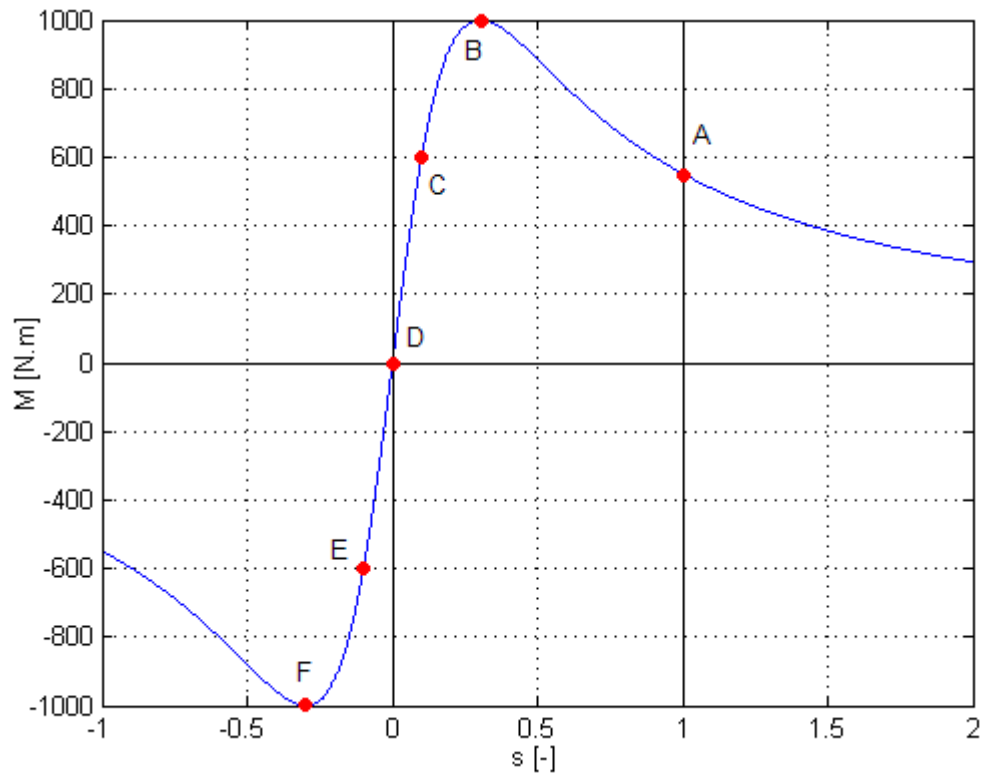
Asynchronní stroj se snažíme provozovat v lineární části momentové charakteristiky. Toho dosáhneme jen regulací frekvenčními měniči. Při spouštění motoru připojením přímo k síti, nebo jiným jednoduchým způsobem regulace (spouštění Y-D, soft-start, atd.), asynchronní motor pracuje v celé části momentové charakteristiky. V případě regulace změnou rotorového odporu u asynchronního motoru s vinutou kotvou lze docílit toho, že bude motor od nulových otáček pracovat v lineární části momentové charakteristiky.

Na Obr. 3 je možno vidět lineární část momentové charakteristiky, ta se nachází mezi body CE. Stabilní oblast momentové charakteristiky se nachází mezi body BF. V oblasti CE pracují jen pohony regulované skalárním řízením, vektorovým řízením nebo přímým řízením momentu.

Od bodu B doprava se nachází nestabilní část, která se také nazývá labilní část momentové charakteristiky. V této oblasti motor pracuje krátkodobě jen tehdy, když se asynchronní motor rozbíhá připojením přímo k síti nebo se reguluje jednoduchou metodou (soft-start, spouštění Y-D, atd.). Nechceme, aby v této oblasti pracoval motor, který je napájený z frekvenčního měniče.

Při brzdění se pracovní bod posouvá mezi DF. Z režimu motor do režimu brzda se pohon dostane zmenšením napájecího kmitočtu. To platí při napájení motoru frekvenčním měničem.

- Bod A: záběrný moment motoru
- Bod B: moment zvratu (maximální moment) v režimu motor
- Bod C: je jmenovitý pracovní bod motoru v režimu motor
- Bod D: ideální motor naprázdno
- Bod E: je jmenovitý pracovní bod motoru v režimu generátor
- Bod F: moment zvratu v režimu generátor



Obr. 3: Momentová charakteristika asynchronního stroje

Ze znalosti parametrů motoru, pomocí Klossova vztahu, lze spočítat přibližný průběh momentové charakteristiky. Výsledek výpočtu Klossova vztahu je na Obr. 3.

$$M_k = \frac{U_s^2}{\omega_s} \quad (1) \quad [1]$$

$$s_k = \frac{R_r}{\omega_s \cdot L_\sigma} \quad (2) \quad [1]$$

$$M(s) = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} \quad (3) \quad [1]$$

V dnešní době, kdy se využívají pro regulaci pohonů frekvenční měniče, se Klossův vztah modernizuje do tvaru:

$$M(s) = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{f_{rk}}{f_r} + \frac{f_r}{f_{rk}}} \quad (4) \quad [1]$$

$$P_\delta = 3 \cdot \frac{R_r}{s} \cdot I_r^2 = 3 \cdot \frac{R_r}{s} \cdot \frac{U_s^2}{X_\sigma^2 + \left(\frac{R_r}{s}\right)^2} \quad (5) \quad [1]$$

$$M = \frac{P}{\omega_m} = \frac{P_\delta \cdot p_p}{2 \cdot \pi \cdot f_s} \quad (6) \quad [1]$$

Z rovnice (5) se spočítá výkon přenesený ze statoru na rotoru skrz vzduchovou mezeru ve stroji. Z rovnice (6) můžeme spočítat pomocí rovnice (5) moment. Pro tyto výpočty si vystačíme s parametry stroje, které se dají jednoduše změřit a skluz se spočítá z rovnice (13).

### 1.3. Náhradní schéma asynchronního motoru v ustáleném stavu

Náhradní schéma asynchronního motoru se používá ve skalárním řízení.

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s \quad (7) \quad [1]$$

$$\omega_m = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} = 2 \cdot \pi \cdot f_m \quad (8) \quad [1]$$

$$\omega_r = \omega_s - p_p \cdot \omega_m \quad (9) \quad [1]$$

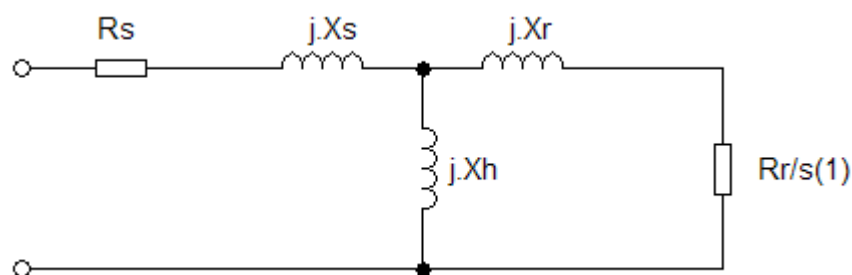
$$X_{s\sigma} = \omega_s \cdot L_{s\sigma} \quad (10) \quad [1]$$

$$X_{r\sigma} = \omega_s \cdot L_{r\sigma} \quad (11) \quad [1]$$

$$X_h = \omega_s \cdot L_h \quad (12) \quad [1]$$

Z rovnic (7), (8), (9) lze spočítat úhlové rychlosti, případně frekvence. Z rovnice (8) lze spočítat otáčky motoru.

Z rovnic (10), (11), (12) lze spočítat rozptylovou reaktanci statoru, rotoru a hlavní příčnou reaktanci motoru.



Obr. 4: Náhradní schéma asynchronního motoru [1]

$$s^{(1)} = \frac{\omega_s - p_p \cdot \omega_m}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad (13) \quad [1]$$

$$\begin{aligned}\bar{u}_s^{(1)} &= R_s \cdot \bar{i}_s^{(1)} + j \cdot \omega_s \cdot \bar{\Psi}_s^{(1)} = R_s \cdot \bar{i}_s^{(1)} + j \cdot \omega_s \cdot L_{s\sigma} \bar{i}_s^{(1)} + j \cdot \omega_s \cdot \bar{\Psi}_h^{(1)} = \\ &= R_s \cdot \bar{i}_s^{(1)} + j \cdot X_{s\sigma} \bar{i}_s^{(1)} + j \cdot X_m \cdot \bar{i}_m^{(1)}\end{aligned}\quad (14) \quad [1]$$

$$0 = R_r \cdot \bar{i}_r^{(1)} + j \cdot \omega_r \cdot \bar{\Psi}_r^{(1)} \quad | : s^{(1)} \quad (15) \quad [1]$$

$$\begin{aligned}0 &= \frac{R_r}{s^{(1)}} \cdot \bar{i}_r^{(1)} + j \cdot \omega_s \cdot L_{r\sigma} \cdot \bar{i}_r^{(1)} + j \cdot \omega_s \cdot \bar{\Psi}_h^{(1)} \\ &= \frac{R_r}{s^{(1)}} \cdot \bar{i}_r^{(1)} + j \cdot X_{r\sigma} \cdot \bar{i}_r^{(1)} + j \cdot X_h \cdot \bar{i}_h^{(1)}\end{aligned}\quad (16) \quad [1]$$

Z rovnice (13) lze spočítat skluz 1. harmonické. Pomocí této rovnice můžeme spočítat skluz pro libovolný motor.

Z rovnice (14) lze spočítat satorové napětí 1. harmonické z vypočtení úbytku napětí, ke kterému dochází při průchodu proudu 1. harmonické přes  $R_s$  a indukované napětí.

Rovnice (7) až (16) popisují náhradní obvod asynchronního motoru na Obr. 4.



## 2. Regulace asynchronního motoru

V řadě oborů vznikla potřeba regulace strojů. Ať již šlo o regulaci otáček, napětí nebo proudu. Jako první se regulovaly parní stroje Wattovým regulátorem, kde se regulovala pára. Příchodem elektrických strojů se začaly regulovat elektrické veličiny napětí a proud, včetně mechanické veličiny otáček.

Stejnoseměrné stroje lze regulovat velice jednoduše pomocí změny napětí kotvy nebo změnou budicího proudu. To záleží na provedení stejnosměrného stroje (sériový, derivační, kompaundní, cize buzený). U těchto strojů se používaly dva způsoby regulace:

- **Skoková:** Používaly se stejnosměrné sériové motory, které měly vhodnou momentovou charakteristiku a řídily se změnou odporu (stejnoseměrná trakce), nebo přepínáním odboček na transformátoru (střídavá trakce).
- **Plynulá:** Na regulaci těžkých pohonů se používala Ward-Leonardova skupina před vznikem pulzních měničů. Tato regulace měla špatnou účinnost. Po vzniku pulzních měničů se regulace stejnosměrných cize buzených motorů stala mnohem efektivnější, účinnější a hlavně levnější než Ward-Leonardova skupina.

Asynchronní motor se plynule reguluje podstatně hůře a je potřeba složitějších regulačních zařízení než u stejnosměrných strojů, ale i tak je regulace asynchronních motorů lepší a levnější z hlediska pořizovací ceny motoru a údržby (komutátor u stejnosměrných motorů).

### 2.1. Asynchronní motor s vinutou kotvou

Asynchronní motor s vinutou kotvou lze regulovat bez polovodičových měničů, ale se špatnými regulačními vlastnostmi. Tato regulace se provádí skokovou změnou odporu kotvy, kdy je přes kroužky připojen k rotoru rozběhový rotorový spouštěč.

### 2.2. Asynchronní motor s kotvou nakrátko

Tento motor lze regulovat skokově i plynule. Když asynchronní motor regulujeme skokově, tak nemá dobré regulační vlastnosti. Tyto způsoby se většinou používají pouze pro rozběh motoru kvůli omezení rozběhových proudů. Každá z variant skokové regulace má své výhody i nevýhody.

- přepínání počtu pólů na statoru
- rozběh motoru  $Y \rightarrow D$

- soft-start

V dnešní době se pro skutečnou plynulou regulaci využívají frekvenční měniče, které se ve většině aplikací skládají z usměrňovače a střídače. V některých aplikacích není potřeba používat usměrňovač, a proto se může použít napájení z baterie nebo stejnosměrné troleje. Napájení z troleje se využívá ve stejnosměrné trakci na železnici a v městské hromadné dopravě. Napájením z baterií se můžeme setkat u elektromobilů a částečně u hybridních automobilů.

Střídač může být proudového nebo napěťového typu. Podle střídače se liší i stejnosměrné meziobvody a vstupní měnič. Pomocí nejmodernějších vstupních měničů můžeme energii vracet zpět do sítě. Lze se setkat s třemi typy regulace:

- skalární regulace
- vektorová regulace
- přímé řízení momentu

### 2.2.1. Přepínání počtu pólů

Motor, u kterého lze tento způsob použít je dražší než normální asynchronní motor. Má i menší účinnost a je větší. Většinou se tyto motory vyrábějí jen dvourychlostní, ale jsou k vidění i třírychlostní motory. Statorové vinutí každé fáze je rozděleno na několik částí. Každá část vinutí je vyvedena ven na svorkovnici a pak se pomocí stykačů nebo PLC připojuje vinutí.

### 2.2.2. Rozběh Y→D

Tímto způsobem lze rozbíhat v síti 230/400 V všechny asynchronní motory, které mají na štítku hodnotu 400/690 V. Rozběh motoru zapojením Y-D se provádí ve stavu naprázdno, protože má motor v zapojení hvězda pouze 1/3 záběrný moment než v zapojení trojúhelníku. V případě, že by měla zátěž větší moment než motor, tak by se motor nerozběhl.

Zmenšení momentu je způsobeno změnou napětí  $M \approx U^2$ . Při rozběhu motoru do hvězdy odebírá motor jen 1/3 rozběhový proud a tím se zmenší proudový ráz. Tuto metodu rozběhu lze provést jak stykači, tak pomocí PLC.

### 2.2.3. Soft-start

Soft-start se používá pro rozběhy asynchronních motorů. Dnes ho většina výrobců prodává jako kompakt (black-box). Lze na něm nastavit rozběhovou a doběhovou rampu. Uvnitř soft-startu menších výkonů lze nalézt triaky, ale většinou se uvnitř setkáme s tyristory.

Soft-start povolna po rampě zvyšuje napájecí napětí a rozběhne motor. Soft-start je prováděn bez zátěže, protože moment asynchronního motoru klesá s kvadrátem napětí ( $U^2$ ).

#### **2.2.4. Regulace frekvenčním měničem**

Tento způsob regulace se začal vyvíjet až příchodem polovodičových vypínatelných součástek. Takto lze plynule regulovat jakýkoliv asynchronní motor. Je to nejefektivnější regulace díky tomu, že je bezeztrátová a že udržuje konstantní požadovanou rychlost. Bezeztrátová regulace je myšlena tak, že jsou jen úbytky na polovodičových prvcích. Pro běžné jednodušší pohony si vystačíme se skalárním řízením, když chceme lepší řízení u větších pohonů, pak již musíme použít vektorové řízení nebo přímé řízení momentu, které je složitější a dražší.

### 3. Skalární regulace asynchronního motoru

U skalární regulace regulujeme velikost a frekvenci akční veličiny. U regulace napěťového typu požadujeme regulaci velikosti a frekvence výstupního napětí ze střídače. Je proto výhodné využít PWM modulaci nebo PWM modulaci s 3. harmonickou v oblasti  $\omega \in (0 \div \omega_N)$  a obdélníkové řízení využít v oblasti vysokých otáček  $\omega \in (\omega_N \div 2\omega_N)$ . [3]

V oblasti frekvence  $f_s \in (0 \div f_N)$  a  $U_a \in (0 \div U_N)$  vykazuje asynchronní motor konstantní moment, který odpovídá až  $M_{max}$ . Při  $f \in (f_N \div \infty)$  a  $U_a = U_{sN}$  dochází k odbuzování stroje a jeho maximální moment klesá. Problém při regulaci nastává v oblasti nízkých otáček. Při  $f_{sw} \rightarrow 0$  by mělo být  $U \rightarrow 0$  a tím se nám motor nerozběhne, protože malé napětí, které bude na výstupu střídače, neprotlačí vinutím dostatečně velký proud. Proto se musí přidat malé napětí  $\Delta U$ , které nám rozběhne motor při nízkých otáčkách. [1]

Skalární regulace asynchronního motoru frekvenčním měničem je poměrně jednoduchá, ale nedosáhne se s ní špičkových dynamických parametrů pohonu. Většinou se používají u jednodušších regulovaných pohonů, kde není zapotřebí výborných dynamických parametrů. Pro kvalitní frekvenční regulaci je zapotřebí, aby se při změně napájecího kmitočtu změnilo i napájecí napětí z důvodu konstantního sycení magnetického toku obvodu motoru. [3]

Při maximálním  $U_N$  se může zvyšovat napájecí frekvence, ale dochází k odbuzování motoru a tím dojde ke snížení maximálního momentu motoru.

Při skalárním řízení požadujeme konstantní tok v motoru, kterého dosahujeme konstantním  $U_N/f$ .

Skalární regulace vychází z následujícího vztahu:

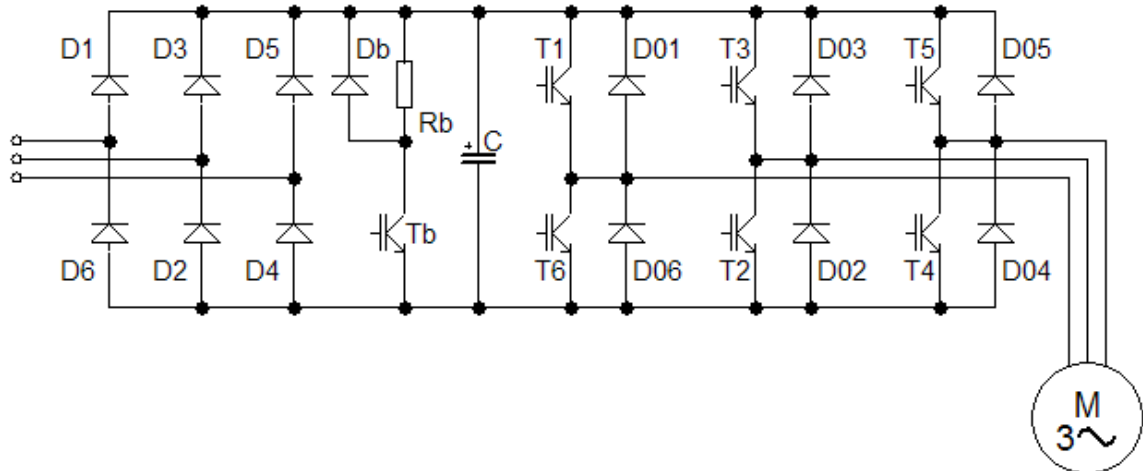
$$U_s = R_s \cdot I_s + j \cdot \omega_s \cdot \Psi_s \quad (17) \quad [1]$$

Skalární řízení lze realizovat dvěma způsoby:

- Napěťově kmitočtové řízení
- Proudově kmitočtové řízení

V dnešní době se realizuje převážně skalární řízení napěťově kmitočtového typu. To je dáno jednoduchostí algoritmu a spínacími součástkami, které jsou výkonnější a lze je spínat vyššími spínacími frekvencemi.

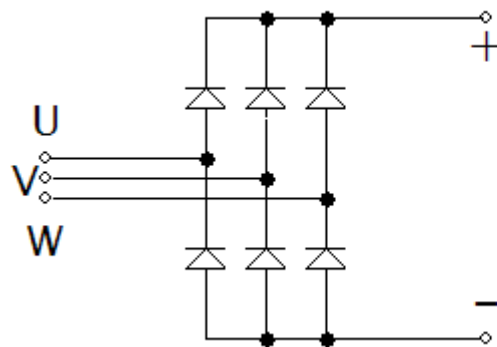
### 3.1. Výkonový obvod napěťově kmitočtového řízení



Obr. 5: Výkonový obvod napěťově kmitočtového řízení asynchronního motoru [2]

#### 3.1.1. Vstupní měnič (usměrňovač)

U nejjednodušších měničů, u kterých se nepočítá s rekuperací, se používá 1f nebo 3f můstkový neřízený usměrňovač z diod. Jestliže je měnič napájen pouze z jedné fáze sítě, pak se musí u motoru na 230/400V přepojit vinutí statoru do trojúhelníku, aby nedošlo ke snížení maximálního momentu. Když bude měnič napájen ze třífázové sítě, pak se motor 230/400V napájí se statorovým vinutím zapojeným do hvězdy. [2]



Obr. 6: 3-f můstkový diodový usměrňovač [2]

V případě, že by se frekvenční měnič provozoval i pro rekuperaci, pak by musel být použit jako vstupní měnič pulzní usměrňovač. Pulzní usměrňovač je napěťový střídač, který pracuje v režimu, kdy se chová jako usměrňovač. Rozdíl je, že neodebírá ze sítě proud s vysokým obsahem harmonických jako diodový usměrňovač. [2]

Pulzní usměrňovač odebírá téměř harmonický proud. Mimo to je schopný přenášet výkon zpět do sítě. [1]

### 3.1.2. Stejnoseměrný meziobvod

Stejnoseměrný obvod je mezi vstupním a výstupním měničem a skládá se z kondenzátoru nebo soustavy kondenzátorů, které nám zajišťují přenos a akumulaci energie mezi sítí a motorem (vstupním a výstupním měničem). [1]

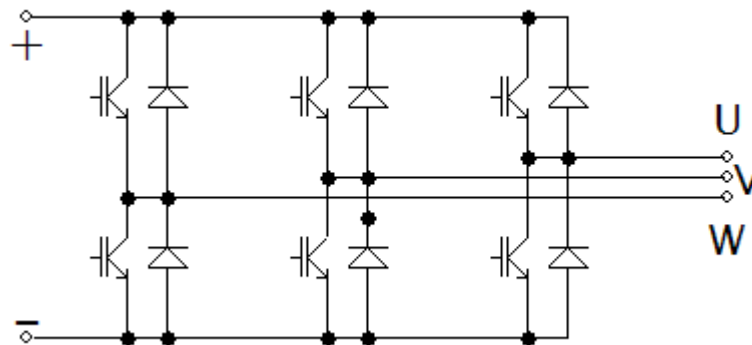
Ve stejnosměrném obvodu je mimo kondenzátoru umístěn tranzistor v sérii s brzdným odporem. K brzdnému odporu je paralelně připojena dioda, protože výkonové brzdné odpory jsou vinuté z drátu a mají indukčnost. Po vypnutí  $T_b$  se na brzdném odporu indukuje napětí a dioda  $D_b$  nám uzavírá po vypnutí  $T_b$  obvod, aby zaniklo vzniklé indukované napětí na odporu  $R_b$ .

Při brzdění se nabíjí kondenzátor ve stejnosměrném obvodu. Po zvýšení napětí na kondenzátoru se sepne  $T_b$  a kondenzátor se začne vybíjet přes  $R_b$ . Po vypnutí  $T_b$  se na  $R_b$  naindukuje napětí. Obvod se uzavře přes  $D_b$  a naindukované napětí zanikne na  $R_b$ .

Jestliže se chce rekuperovat do sítě, musí být vstupní měnič schopen přenášet energii do sítě. Když vstupní měnič není schopen přenášet energii zpět do sítě, pak se musí energie měnit na teplo v  $R_b$ .

### 3.1.3. Výstupní měnič (střídač)

Výstupní měnič je vždy střídač, který na zátěži vytváří střídavý výstup a napájí motor. Při použití PWM modulace jde ze střídače do motoru téměř sinusový proud, který obsahuje vyšší harmonické, ale napětí má velmi špatný průběh a nemá dobrý vliv na izolaci motoru. Izolace motoru je pulzně namáhána. [2]



Obr. 7: 3-f napěťový střídač [2]

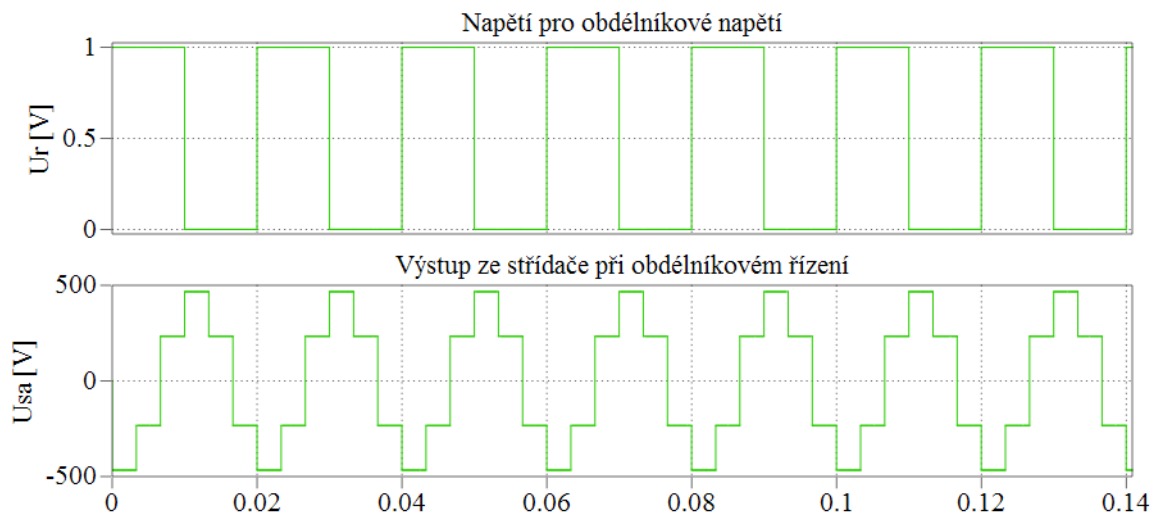
## 3.2. Modulace

Pro řízení střídače se používají různé způsoby řízení. Mezi nejjednodušší patří obdélníkové řízení. Mezi nejvíce používané patří sinusová PWM modulace a PWM modulace s 3. harmonickou. Každý typ řízení má své výhody a oblasti využití.

### 3.2.1. Obdélníkové řízení

Obdélníkové řízení je nejjednodušší řízení, které lze realizovat pro řízení napěťového střídače. Na výstupu střídače je obdélníkový průběh napětí a proud je dán přechodovým dějem na vinutí v motoru. Průběhy jsou nepříznivé, protože obsahují vyšší harmonické.[3]

Obdélníkové řízení se převážně používá a dvouhladinových napěťových střídačů. U tohoto řízení není možné měnit amplitudu výstupního napětí střídače. Při použití tohoto řízení pro napájení asynchronního motoru je nutné, aby vstupní měnič byl regulovatelný a aby byl tok v motoru konstantní.[3]



Graf 1: Obdélníkové řízení

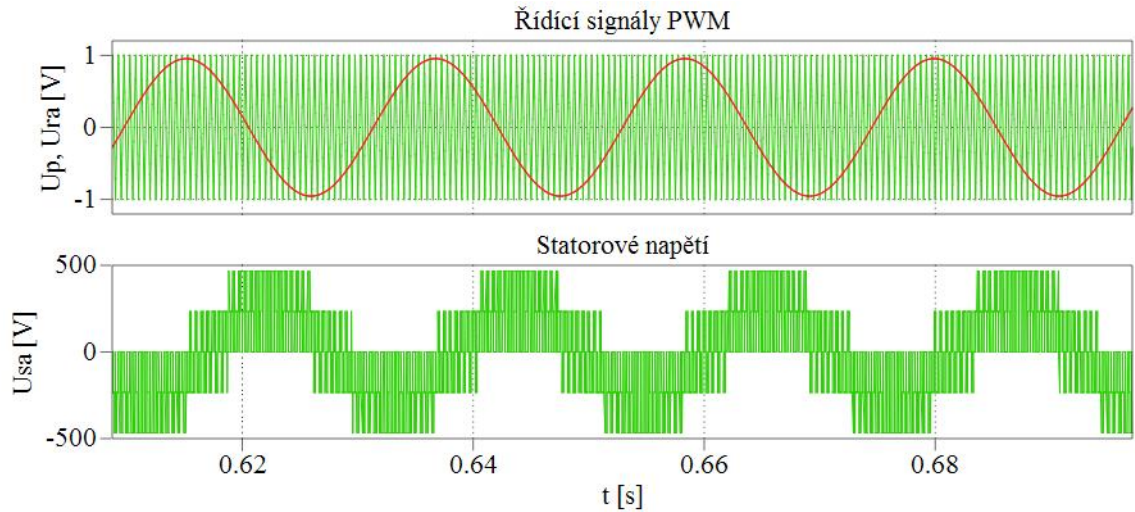
Nebo se používá ve vysokých otáčkách k odbuzování motoru. V tomto případě dochází k přechodu z PWM na obdélníkové řízení. Většinou se používá u motorů velkých výkonů, když se dosáhne jmenovitých hodnot.[3]

$$\left| \bar{U}_{A0}^{(1)} \right| = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_d}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (18) \quad [1]$$

Z rovnice (18) můžeme vidět, že vztah pro výpočet efektivní hodnoty výstupního napětí ze střídače ve stejnosměrném meziobvodu, je dán jako velikost napětí na kondenzátoru.

### 3.2.2. Sinusová PWM modulace

V dnešní době nejvíce používaný způsob modulace napět'ového střídače. Touto modulací získáme na výstupu střídače téměř harmonický sinusový proud. Tato modulace umožňuje změnu kmitočtu i výstupního napětí.[3]



Graf 2: PWM modulace

Napětí na výstupu střídače je pulzní a dochází k pulznímu namáhání izolace motoru a k její degradaci. Touto modulací je možné dosáhnout na výstupu střídače pouze 82% ( $U_a$ )<sub>ef</sub>. Pokud by se chtělo dosáhnout vyššího napětí na výstupu měniče, musel by se použít na vstupu měniče transformátor, který by zvýšil vstupní napětí.[1]

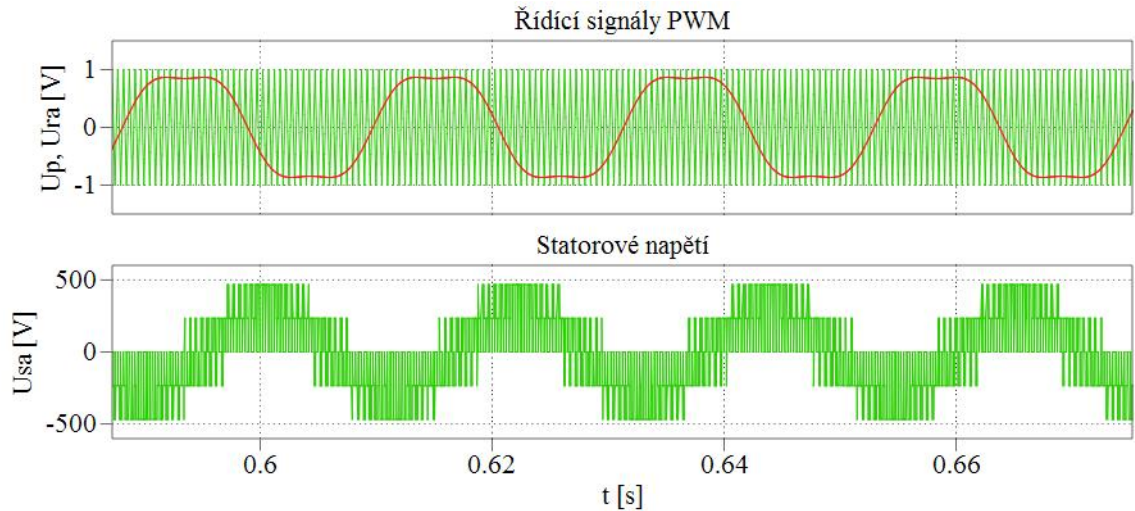
$$U_{A0}^{(1)} = U_{sa}^{(1)} = U_{ra} \cdot \frac{U_d}{2} \quad (19) \quad [1]$$

$$U_{ra} = 1 \cdot \sin(\omega_s \cdot t) \quad (20) \quad [1]$$



### 3.2.3. Sinusová PWM modulace s 3. harmonickou

Tato verze PWM modulace se používá pro zvýšení výstupního napětí střídače. U této verze modulace není zapotřebí použít na vstupu transformátor pro zvýšení vstupního napětí.



Graf 3: PWM modulace s přidáním 3. harmonické

Na 1. harmonickou je přidána 3. harmonická. Na motor, který nemá vyvedený střed, nemá 3. harmonická střídače žádný vliv, protože nemůže ve vinutí statoru vyvolat proud. [1]

$$U_{ra} = U_{ra1} + U_{ra2} \quad (21) \quad [1]$$

$$U_{A0}^{(1)} = U_{sa}^{(1)} = U_{ra} \cdot \frac{U_d}{2} \quad (22) \quad [1]$$

$$U_{ra1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega_s \cdot t) \quad (23) \quad [1]$$

$$U_{r2m} = \frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \quad (24) \quad [1]$$

$$U_{ra2} = U_{r2m} \cdot \sin(3 \cdot \omega_s \cdot t) \quad (25) \quad [1]$$

Rovnice (23) počítá časový průběh 1. harmonické koincidenčního signálu. V rovnici (24) se počítá amplituda 3. harmonické. V rovnici (25) se počítá časový průběh 3. harmonické, který se přičítá ke každému signálu 1. harmonické.

### 3.3. Skalární řízení bez čidla otáček s náběhovou rampou

Skalární řízení bez čidla otáček je nejjednodušší varianta regulace. Tento způsob je levná varianta skalární regulace, ale je vykoupena nedokonalými průběhy. [1]

Blok F nám zajišťuje dostatečně pomalý náběh požadované hodnoty při skokové změně regulované veličiny tak, aby motor pracoval v lineární části momentové charakteristiky. V případě, že by došlo k odbuzování motoru a motor by začal pracovat v nelineární části momentové charakteristiky, tak by došlo ke snížení maximálního momentu. [1]

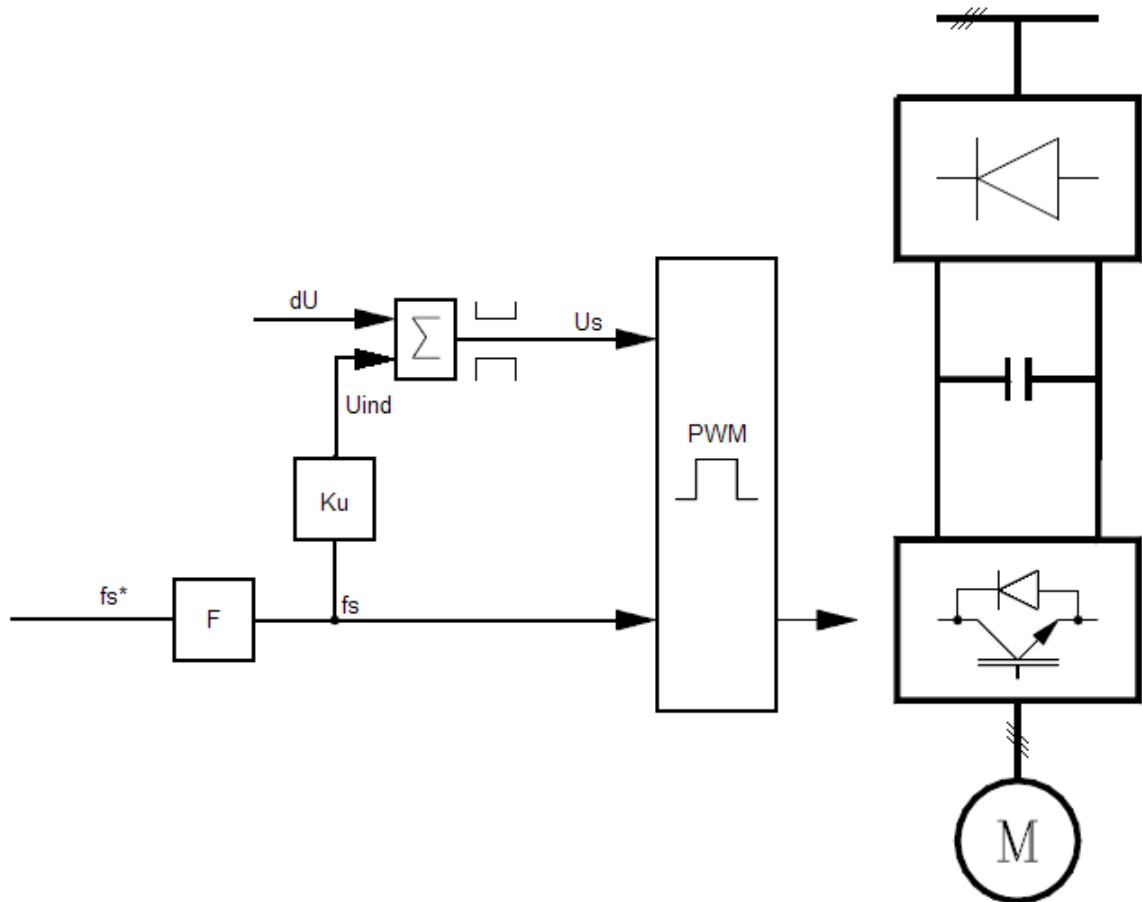
Blok  $\Delta U$  je nelineární obvod, který zajišťuje v oblasti nízkých otáček napětí, které je potřebné na pokrytí úbytků na statorovém vinutí. Při požadované  $f_s \rightarrow 0$  je požadavek na  $U_s \rightarrow 0$ , ale tak malé napětí by neprotlačilo statorovým vinutím potřebný proud. Proto je přičítána malá konstanta, která nám zajistí potřebné napětí na pokrytí úbytku. [1]

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. Součet nám vrací potřebné statorové napětí. [1]

Blok PWM nám generuje pomocí algoritmu sinusové PWM nebo PWM s 3. Harmonickou, spínací impulsy pro tranzistory ve střídači. V reálných provedeních se mezi spínací impulsy přidávají krátké časové zpoždění (1-3  $\mu s$ ). V simulacích této práce tuto dobu zanedbáme. [1]

$$K_U = \frac{U_{(sN)ef} \cdot \sqrt{2}}{f_{sN}} \quad (26) \quad [1]$$

Z rovnice (26) se počítá přibližné indukované napětí uvnitř asynchronního motoru, který je skalárně regulován.



Obr. 8: Schéma skalárního řízení asynchronního motoru bez čidla otáček [4]

### 3.4. Skalární řízení s čidlem otáček

Skalární regulace s čidlem otáček je už velmi kvalitní regulace. Lze o ní říci, že se téměř vyrovná vektorové regulaci nebo přímé regulaci momentu, ale nemá dobré dynamické vlastnosti v oblasti nízkých otáček. 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. [1]

Blokové schéma algoritmu skalárního řízení s čidlem otáček je na Obr. 9.

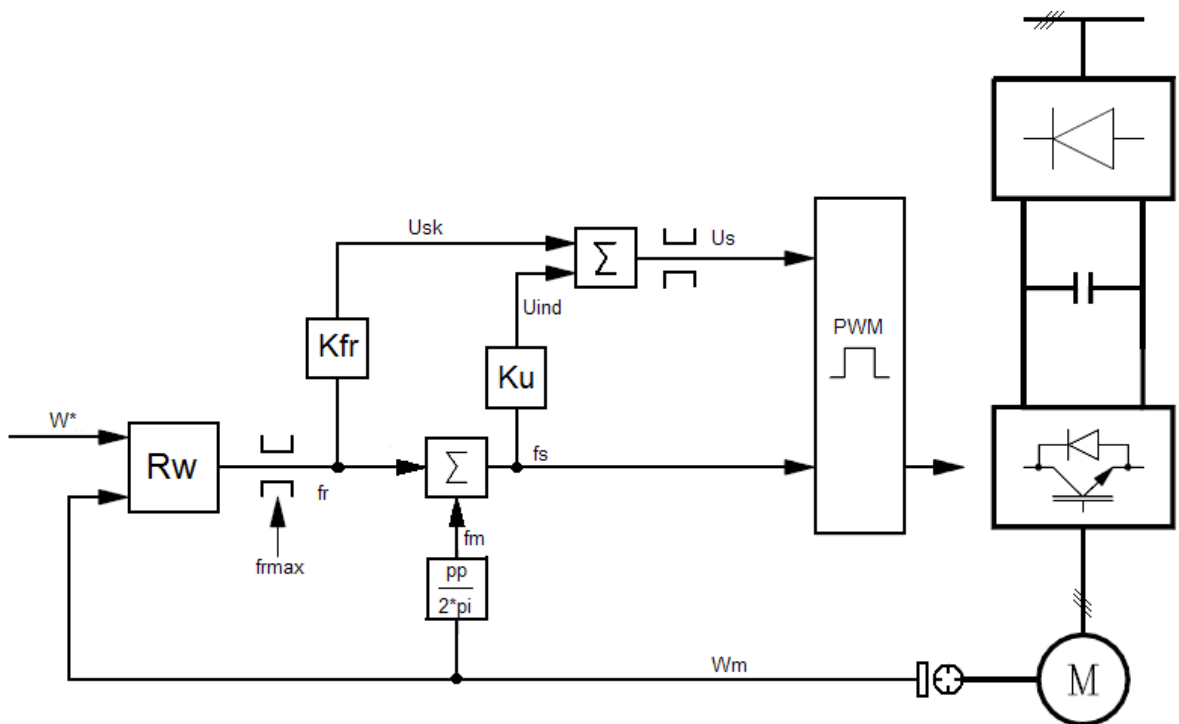
Blok  $R_{\omega}$  je regulátor otáček, realizovaný jako PI v analogové verzi regulátoru, nebo PS v mikroprocesorové verzi regulátoru. [1]

Blok  $K_{fr}$  (rovnice (27)) počítá relativně přesně úbytek napětí na statorovém vinutí, který se musí přičíst přibližnému indukovanému napětí, které je počítáno z rovnice (26). Tím se zpřesní výpočty pro regulaci a zlepší se mimo jiné dynamické vlastnosti pohonu. Bude lepší průběh odezvy momentu i rychlosti na požadovanou hodnotu. [1]

$$K_{fr} = \frac{U_{(sN)ef} \cdot \sqrt{2} \cdot R_s}{R_r \cdot f_{sN}} \quad (27) \quad [1]$$

Blok  $K_u$  počítá z rovnice (26) přibližné indukované napětí ve stroji. Za blokem  $K_u$  se  $U_{ind}$  sečte s  $\Delta U$ , které pokrývá úbytky napětí na vinutí statoru. Součet nám vrací potřebné statorové napětí. [1]

Blok PWM nám generuje pomocí algoritmu sinusové PWM nebo PWM s 3. harmonickou spínací impulsy pro tranzistory ve střídač. V reálných provedeních se mezi spínací impulsy přidávají krátké časové zpoždění (1-3  $\mu s$ ). V simulacích této práce tuto dobu zanedbáme. [1]



Obr. 9: schéma skalárního řízení asynchronního motoru s čidlem otáček [4]

## 4. Matlab a prostředí Simulink

### 4.1. Matlab

Matlab je matematický výkonný výpočetní software, který pracuje s vektory a maticemi. Součástí Matlabu jsou základní matematické funkce (absolutní hodnota, mocnina, odmocnina a další) a složitější funkce, které velmi usnadní řešení daného problému. Mezi tyto funkce patří funkce pro řešení soustav lineárních rovnic, soustav diferenciálních rovnic a další jiné. To značně urychlí řešení daného problému oproti psaní vlastních funkcí v jazyku C, Pascal a jiných programovacích jazycích.

Lze v něm simulovat a modelovat problémy různých druhů z oblasti fyziky, mechaniky, elektrotechniky a matematiky. V elektrotechnice lze pomocí Matlabu řešit přechodové děje v elektrických obvodech a jiné složitější problémy.

V Matlabu se pracuje pomocí příkazové řádky. Používají se v něm běžné příkazy, které lze najít v jiných programovacích jazycích. Mezi příkazy patří například for, while, if a jiné speciální matematické funkce (ode45 a ode23 funkce pro řešení diferenciálních rovnic, atd.).

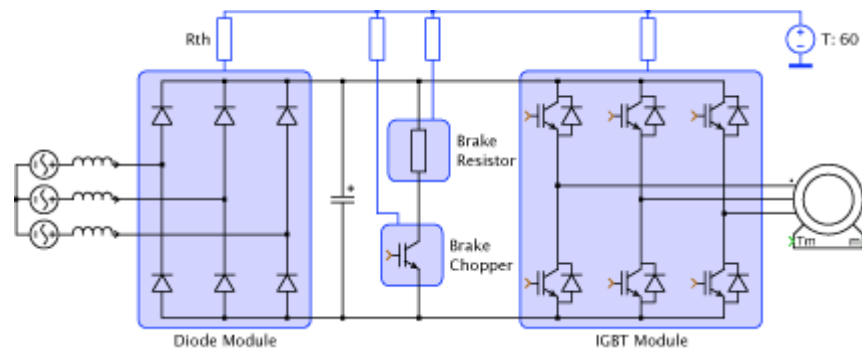
Zakoupením a přidáváním Toolboxů lze zvýšit flexibilitu Matlabu pro další oblasti. Toolbox je sada funkcí, příkazů a knihoven pro práci s danou problematikou (práce se signály, ChebFun Toolbox pro práci s Čebyševovým polynomem).

### 4.2. Simulink

Simulink je podprogram matlabu, pomocí kterého lze simulovat různé fyzikální problémy jako v Matlabu. S tím rozdílem, že v Simulinku se již pracuje s grafickým rozhraním. V modelu se pracuje s bloky, které se pospojují pro řešení daného problému. Simulink je prostředí, které pracuje s knihovnamí a dalšími částmi z Matlabu.

### 4.3. Plecs

Plecs je speciální knihovna v Simulinku od společnosti Plexim GmbH. Je určena pro simulaci v oboru výkonové elektroniky a elektrických pohonů. V této knihovně jsou již sestaveny různé výkonové součástky a řídicí bloky pro regulaci. Lze i řešit jejich spínací ztráty, oteplení a chlazení součástek. Touto knihovnou lze řešit široké spektrum problémů v oblasti regulace a výkonových měničů. [7]



Obr. 10: Simulace oteplení a spínacích ztrát pomocí tepelné knihovny v Plecs [7]

Jako základní část tepelné knihovny je idealizovaný chladič (poloprůhledné pole), který pohlcuje ztráty v jeho mezích. Stejně tak chladič definuje tepelné prostředí a rozšiřuje teplo do okolí. [7]

Také lze pomocí této tepelné knihovny vytvořit tepelnou ekvivalentní síť. Můžeme simulovat přenos tepla ze součástky na chladič a z chladiče do okolního prostředí. Tepelná ekvivalentní síť je modelována pomocí tepelných odporů a kapacit. Tímto způsobem můžeme řídit úroveň detailů tepelného strukturálního modelu. [7]

## 5. Simulace

V této práci jsou uvedeny simulace, zaměřené na přechodové děje v pohonech s asynchronním motorem, který je řízen skalárně.

V simulaci je použito jako napájecího zdroj pro střídač konstantní stejnosměrné napětí a mezi spínacími signály nejsou vkládány žádné dopravní zpoždění ani mrtvé časy (1-3 $\mu$ s).

Simulace byla provedena na motoru z knihovny SimPowerSystems (Machines) v Simulinku. V kapitolách 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3, 5.2.1 a 5.2.2 jsou použity motor s těmito parametry:

- $P_N=7,5$  [kW]
- $R_s=0,7384$  [ $\Omega$ ]
- $L_s=3,045$  [mH]
- $R_r=0,7402$  [ $\Omega$ ]
- $L_r=3,045$  [mH]
- $L_m=0,1241$  [H]
- $p_p=2$  [-]
- $U_{sN}=230$  [V]
- $f_N=50$  [Hz]

### 5.1. Napěťově kmitočtové řízení bez čidla otáček

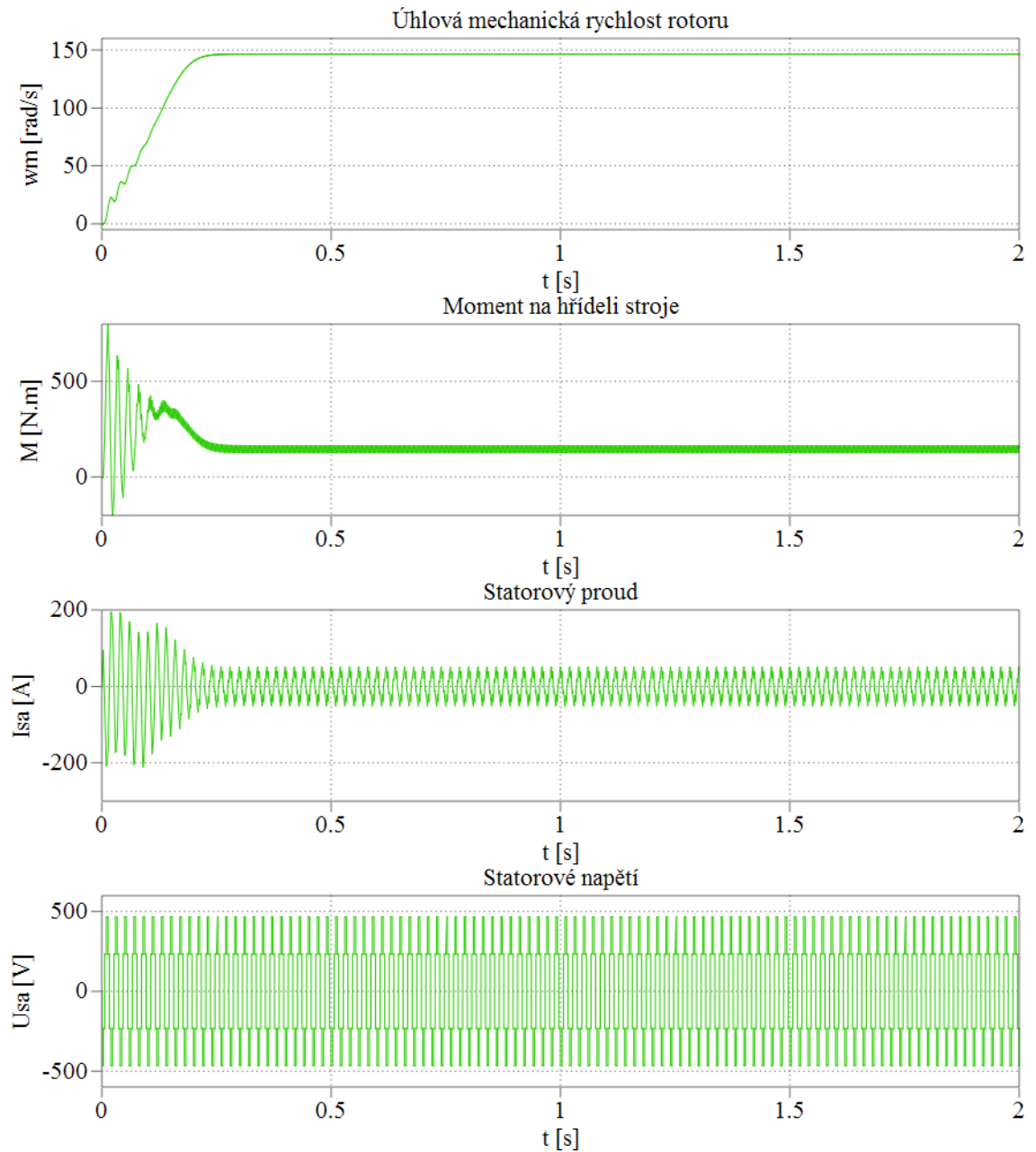
V těchto simulacích jsou vykresleny přechodové děje, které se uskutečňují při změně řídicího signálu. Tato varianta skalární regulace není vybavena zpětnou vazbou čidla otáček.

Při obdélníkovém řízení je simulován pouze ustálený stav. Při obdélníkovém řízení jsou přechodové děje velmi špatné a průběh proudu je dán přechodovým jevem na vinutí motoru a napětí má obdélníkový průběh.

Při simulaci se sinusovou PWM modulací a PWM modulací s 3. Harmonickou, jsou přechodové děje lepší než u obdélníkového řízení. Z toho důvodu se obdélníkové řízení používá pouze v oblasti vysokých otáček, nebo při odbuzování.

### 5.1.1. Obdélníkové řízení

V Graf 4 lze vidět průběhy a přechodové děje v pohonu s asynchronním motorem s obdélníkovým řízením. Průběh proudu a napětí v motoru je totožný s Graf 1.

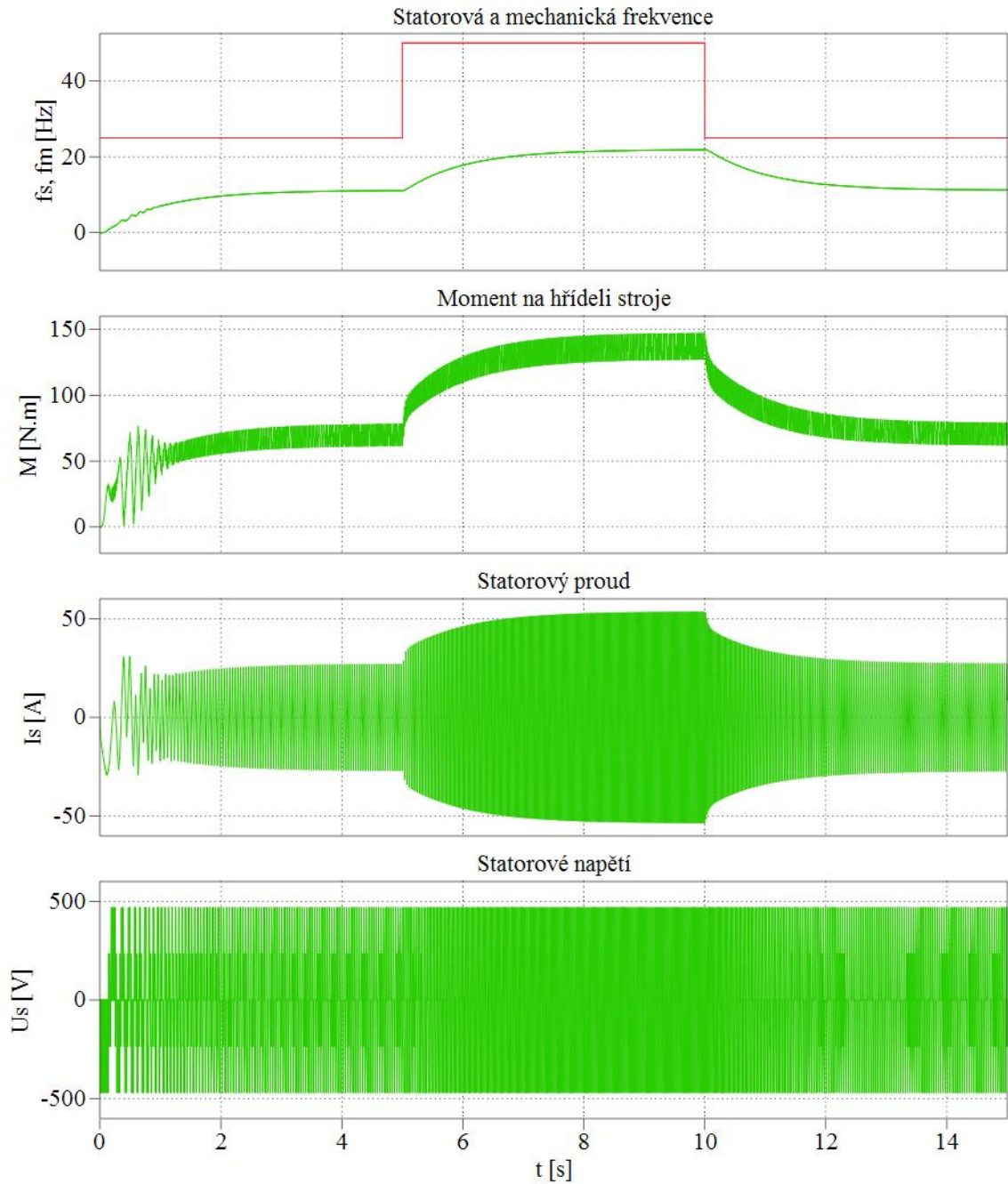


Graf 4: Pohon s obdélníkovým řízením



### 5.1.2. PWM modulace

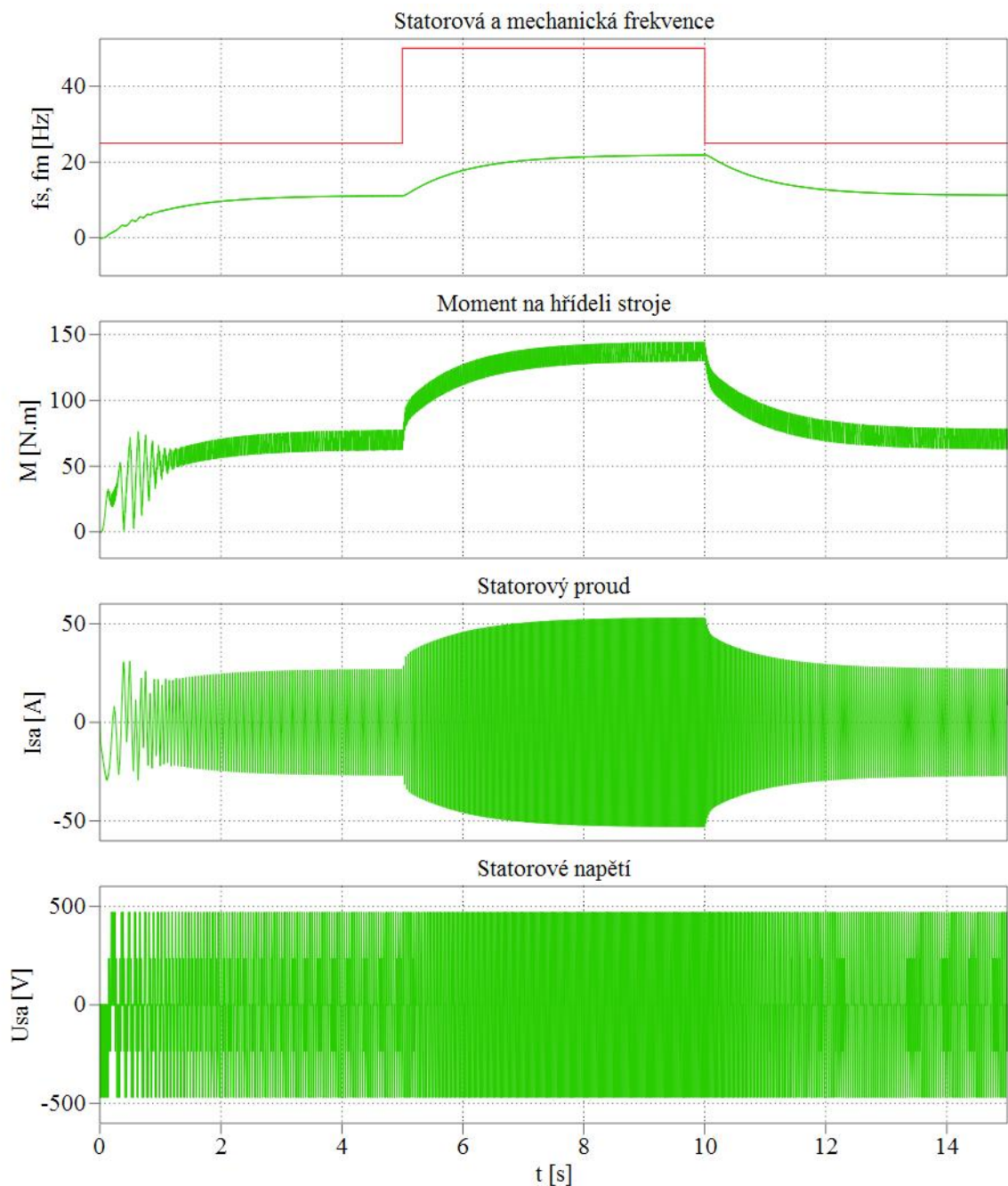
V Graf 5 je vidět v „Mechanická frekvence“, že červený a zelený průběh. Červený průběh je požadovaná frekvence napájecího napětí statoru. Zelený průběh je mechanická frekvence motoru. Protože motor má 4 póly je jeho mechanická frekvence poloviční. Mechanická frekvence je vždy menší o rotorovou frekvenci (skluz). Průběh proudu a napětí je podobný jako v Graf 2.



Graf 5: Změna požadované z  $f_s=0$  [Hz] na  $f_s=25$  [Hz],  $f_s=50$  [Hz] a  $f_s=25$  [Hz]

### 5.1.3. PWM modulace s 3. harmonickou

Tato simulace byla provedena na stejném modelu jako v kapitole 5.1.2, pouze řízení bylo realizováno pomocí PWM modulace s přidáním 3. harmonické. Bližším zkoumáním lze zjistit, že tímto řízením lze dosáhnout vyššího momentu. Průběh proudu a napětí v motoru je totožný jako v Graf 3.



Graf 6: Změna požadované z  $f_s=0$  [Hz] na  $f_s=25$  [Hz],  $f_s=50$  [Hz] a  $f_s=25$  [Hz]

## 5.2. Napět'ově kmitočtové řízení s čidlem otáček

V této variantě skalárního řízení asynchronního motoru je použita jako zpětná vazba čidlo otáček. Tato varianta řízení je téměř srovnatelná v oblasti vysokých otáček s vektorovým řízením nebo s přímým řízením momentu. V oblasti nízkých otáček je i řízení s čidlem otáček špatné, ale je kvalitnější než skalární regulace bez čidla otáček.

Simulace byla provedena se sinusovou PWM modulací a PWM modulací s přidanou 3. harmonickou.

Se sinusovou PWM modulací s přidanou 3. harmonickou získáme na výstupu vyšší napětí než u sinusové PWM modulace.

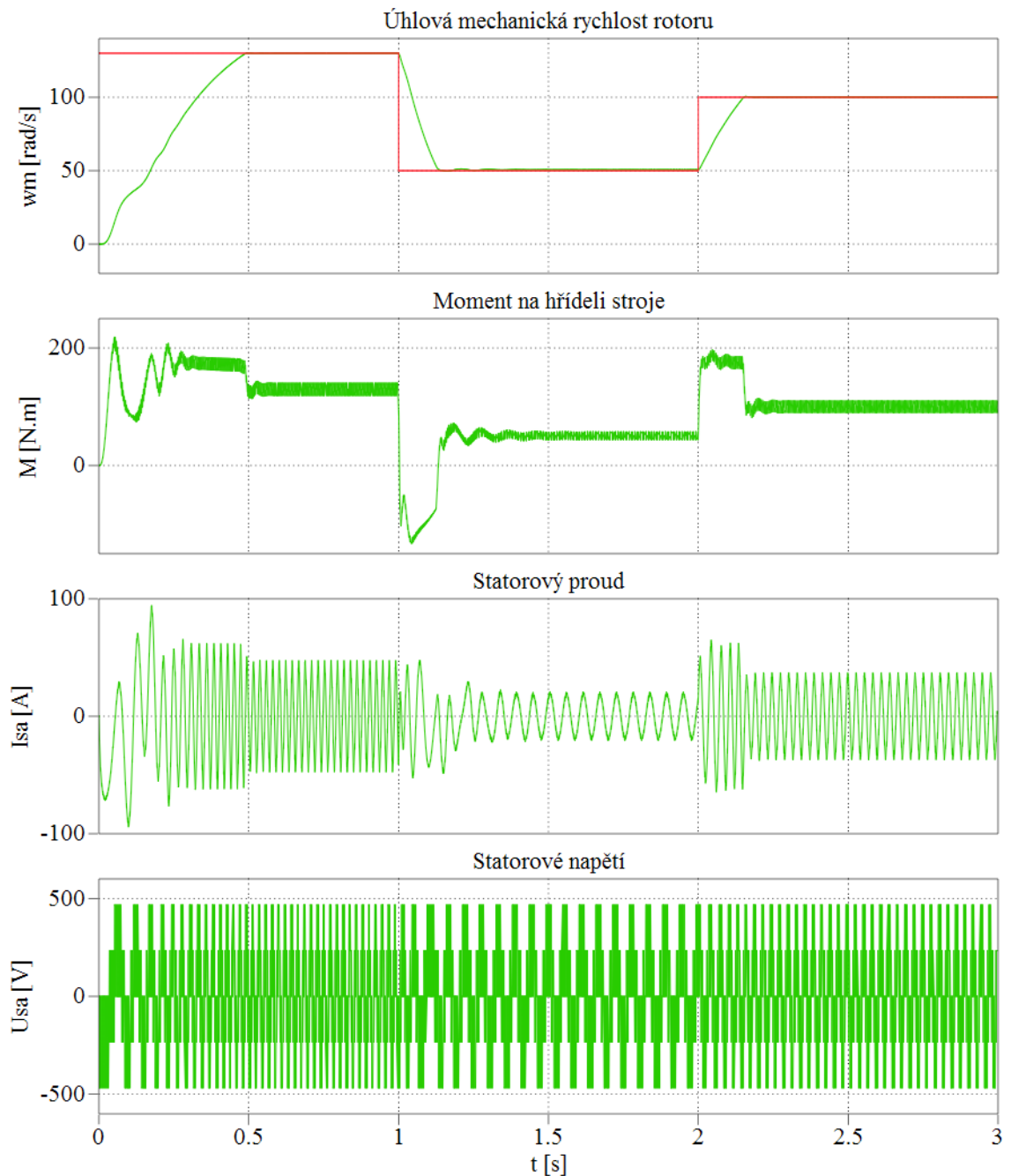
Nastavení PI (PS) regulátoru otáček bylo provedeno tak, aby se průběh rychlosti ( $\omega_m$ ) co nejrychleji ustálil a dobře tlumil. Proto bylo zvoleno zesílení regulátoru  $K_p=3$  [-] a  $K_i=0,16$  [-]. Regulátor s  $K_p=3$  [-] s  $K_i=0$  [-] reguluje dobře k požadované hodnotě. Přidáním integrační složky  $K_i=0,16$  [-] se zvětší přesnost regulované veličiny.

Při tomto nastavení regulátoru se motor rozběhne na úhlovou rychlost  $\omega \rightarrow \omega_N$  za cca 0,5 [s] a ustálí se bez velkých překmitů na téměř požadované hodnotě. Rozdíl mezi požadovanou a aktuální úhlovou rychlostí je pouze několik setin.

Při změně požadavku úhlové rychlosti se PI regulátor po ustálení přechodového děje je mechanická rychlost vyšší, než je požadovaná. To nevádí, protože rozdíl jsou jen setiny.

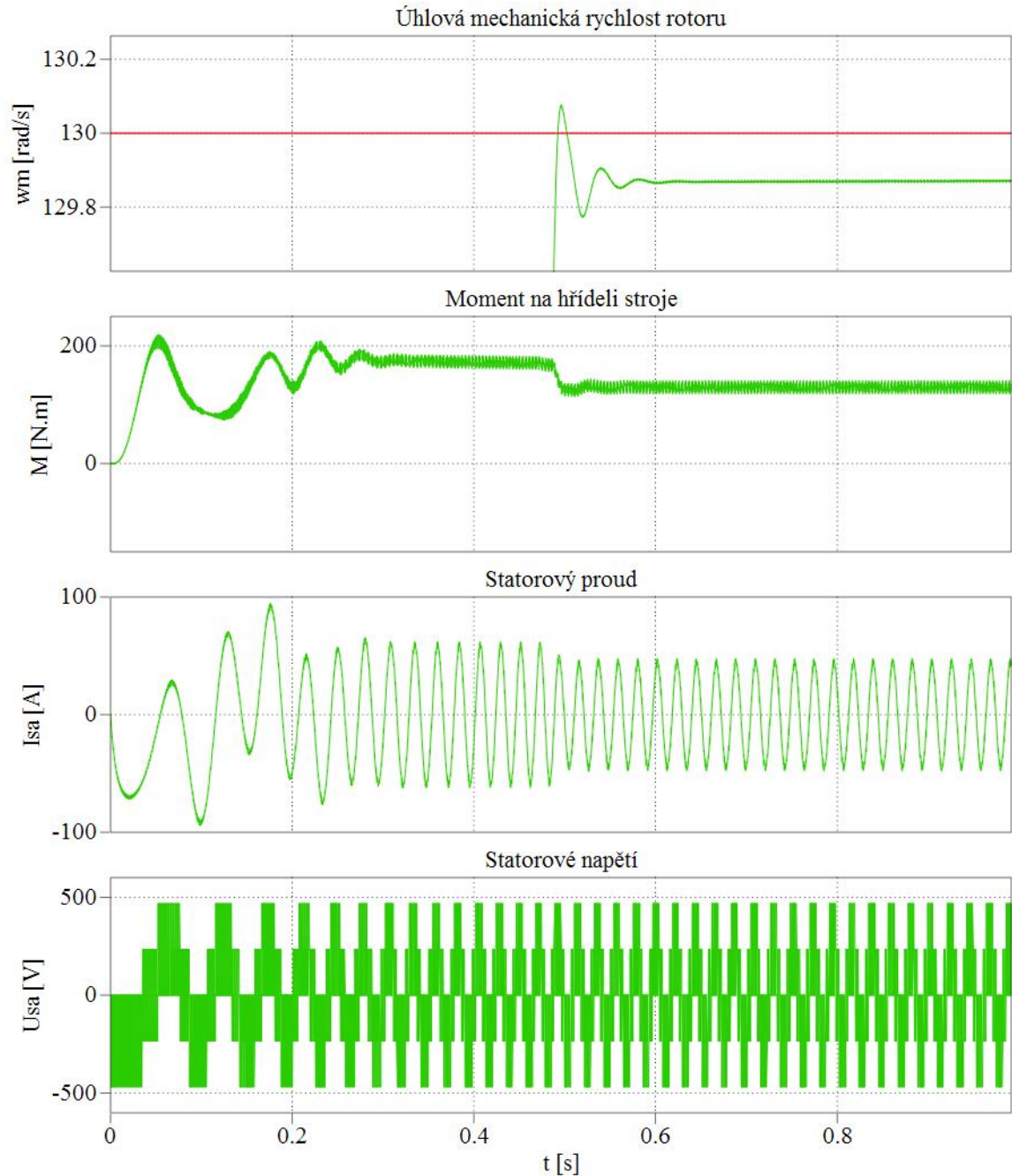
### 5.2.1. PWM modulace

Graf 7 zobrazuje rozběh průběhu přechodového jevu při rozběhu z  $\omega_m=0$  [rad/s] na  $\omega_m=130$  [rad/s]. V  $t=1$  [s] změna z  $\omega_m=130$  [rad/s] na  $\omega_m=50$  [rad/s] a v  $t=2$  [s] změna z  $\omega_m=50$  [rad/s] na  $\omega_m=100$  [rad/s].



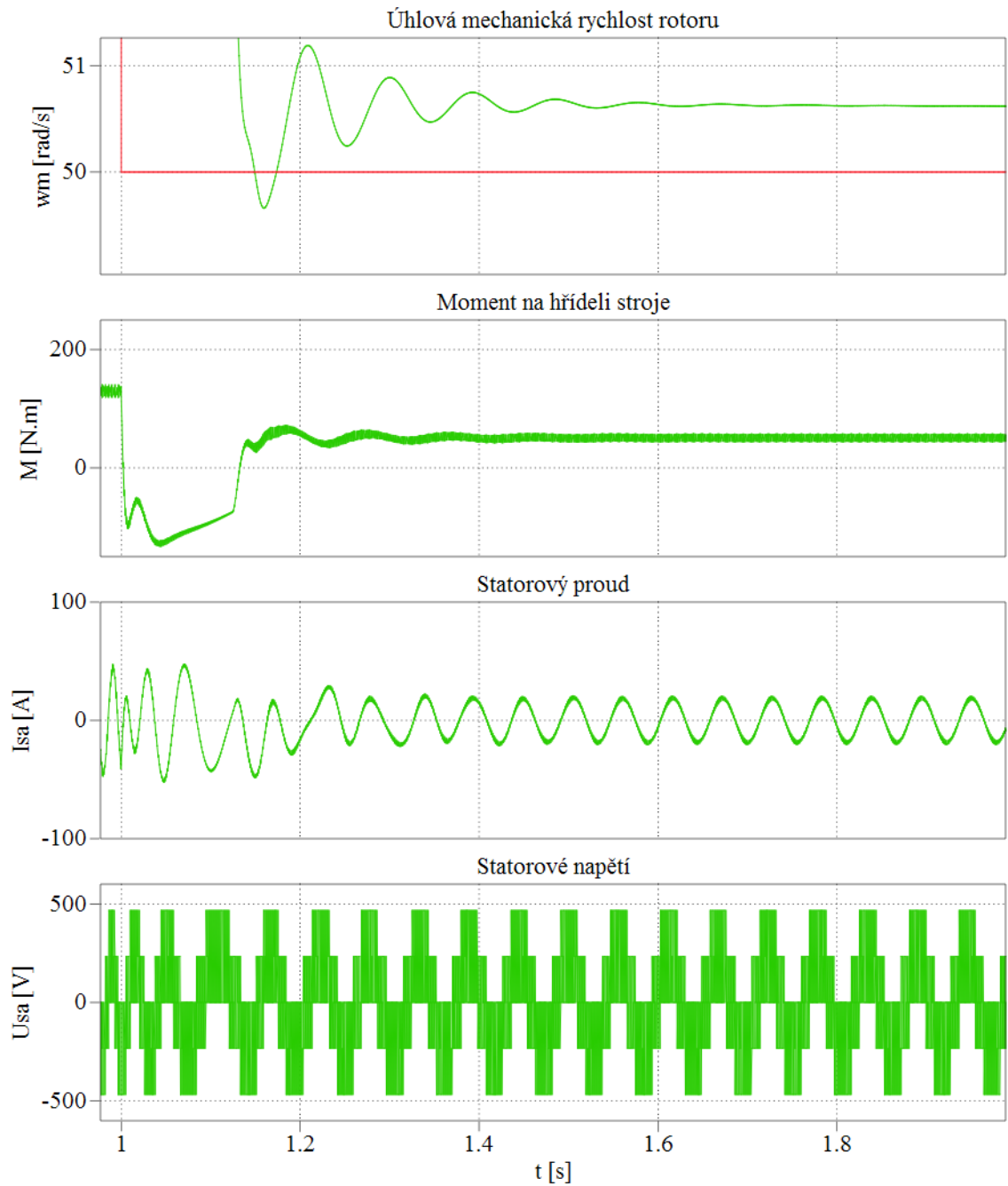
Graf 7: Rozběh na  $\omega_m=130$  [rad/s], změna na  $\omega_m=50$  [rad/s] a na  $\omega_m=100$  [rad/s],  $K_P=3$  [-] a  $K_I=0,16$  [-]

Graf 8 zobrazuje detail přechodového děje při rozběhu motoru z  $\omega_m=0$  [rad/s] na  $\omega_m=130$  [rad/s]. Je vidět že rychlost překmitne, ale ustálí se téměř na požadované hodnotě. Detail je vyjmut z Graf 7.



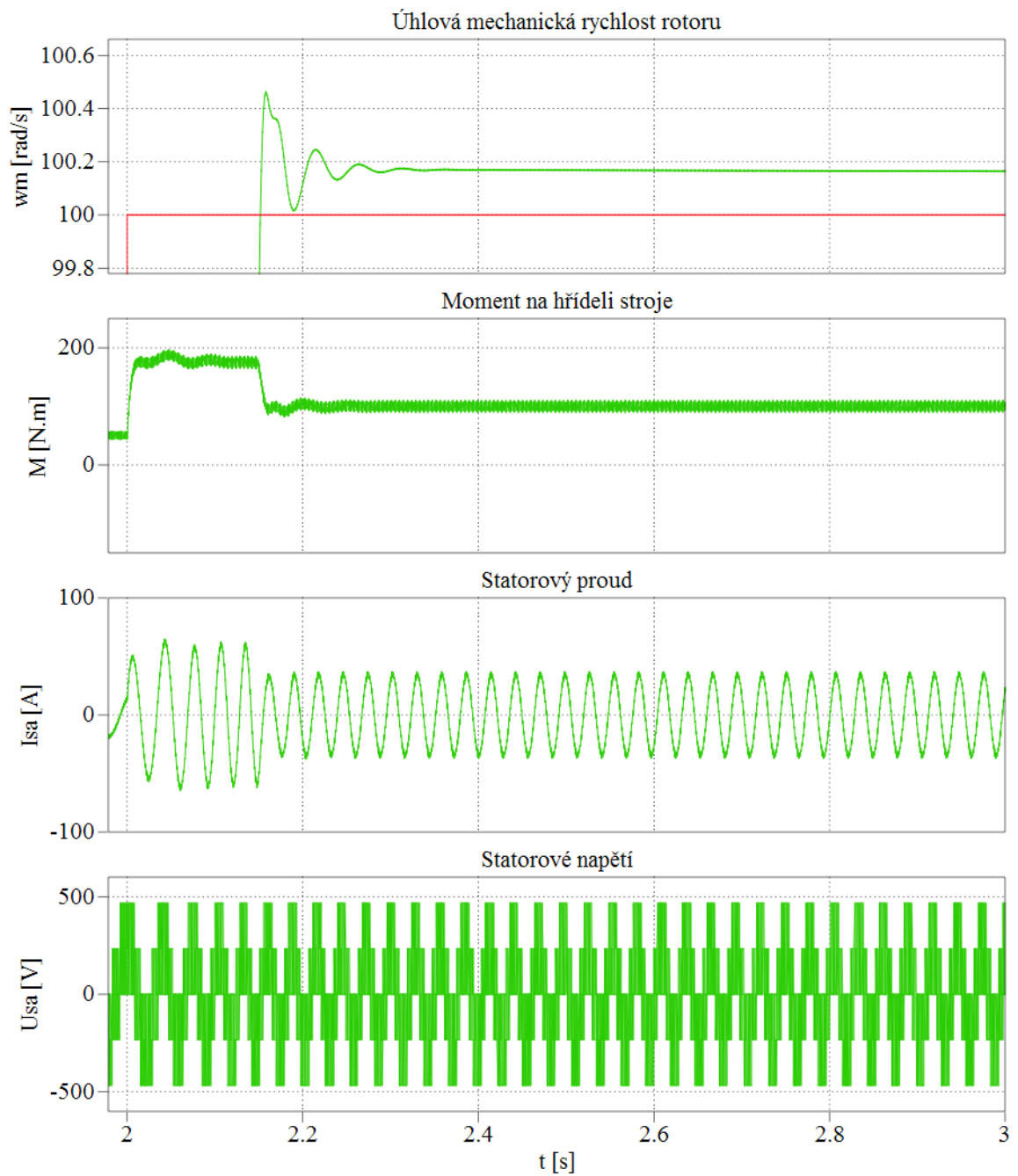
Graf 8: Přechodový děj z  $\omega_m=0$  [rad/s] na  $\omega_m=130$  [rad/s],  $K_p=3$  [-] a  $K_I=0,16$  [-]

V Graf 9 je detail přechodového děje z  $\omega_m=130$  [rad/s] na  $\omega_m=50$  [rad/s]. Je vidět, že po ustálení kmitání se  $\omega_m$  ustálí na větší rychlosti, než je požadovaná. Detail je vyjmut z Graf 7.



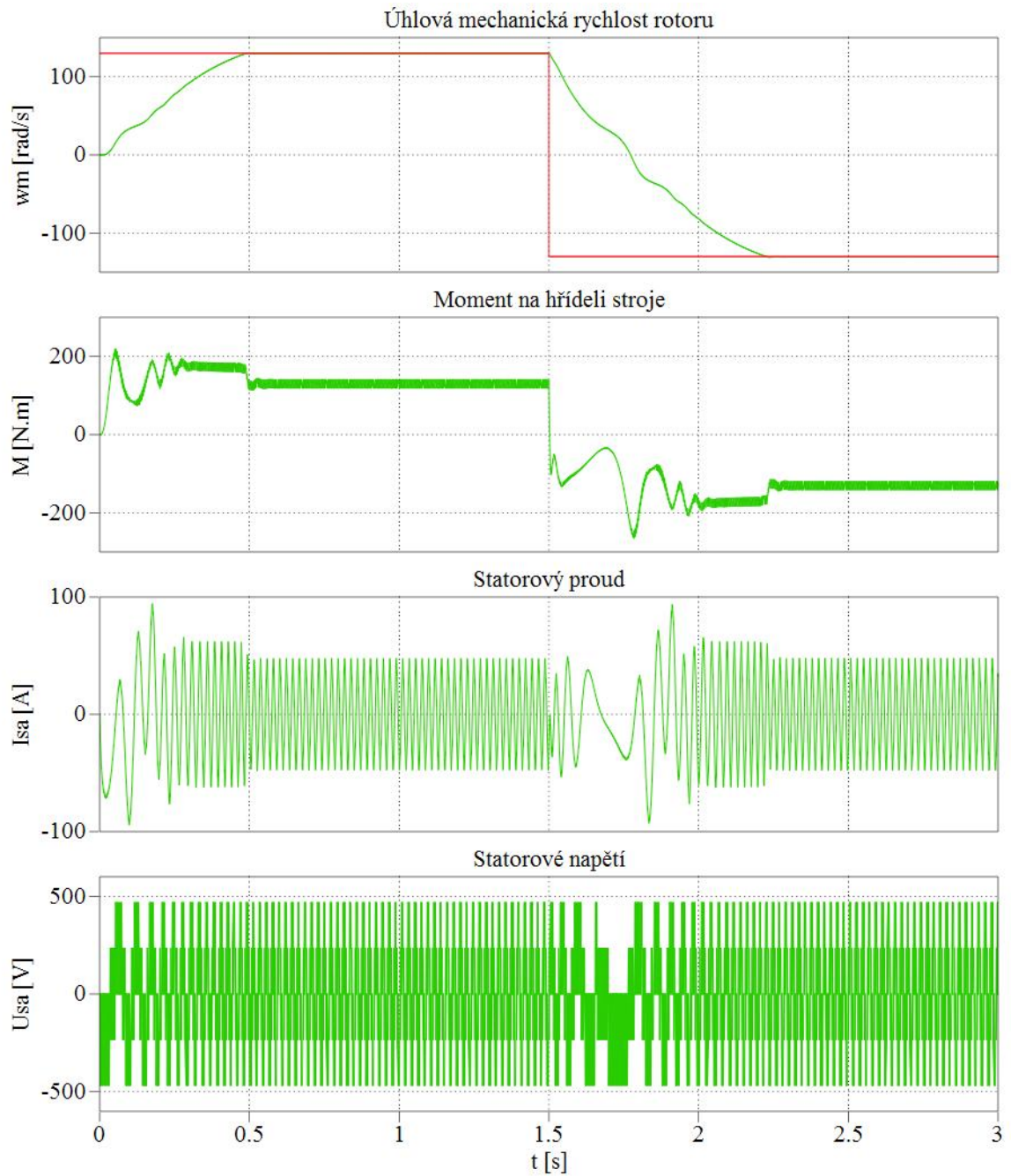
Graf 9: Přechodový děj z  $\omega_m=130$  [rad/s] na  $\omega_m=50$  [rad/s],  $K_P=3$  [-] a  $K_I=0,16$  [-]

V Graf 10 je vidět přechodový děj, při změně z  $\omega_m=50$  [rad/s] na  $\omega_m=100$  [rad/s]. Při této změně dojde ke zrychlení motoru. Detail je vyjmut z Graf 7.



Graf 10: Přechodový děj z  $\omega_m=50$  [rad/s] na  $\omega_m=100$  [rad/s],  $K_P=3$  [-] a  $K_I=0,16$  [-]

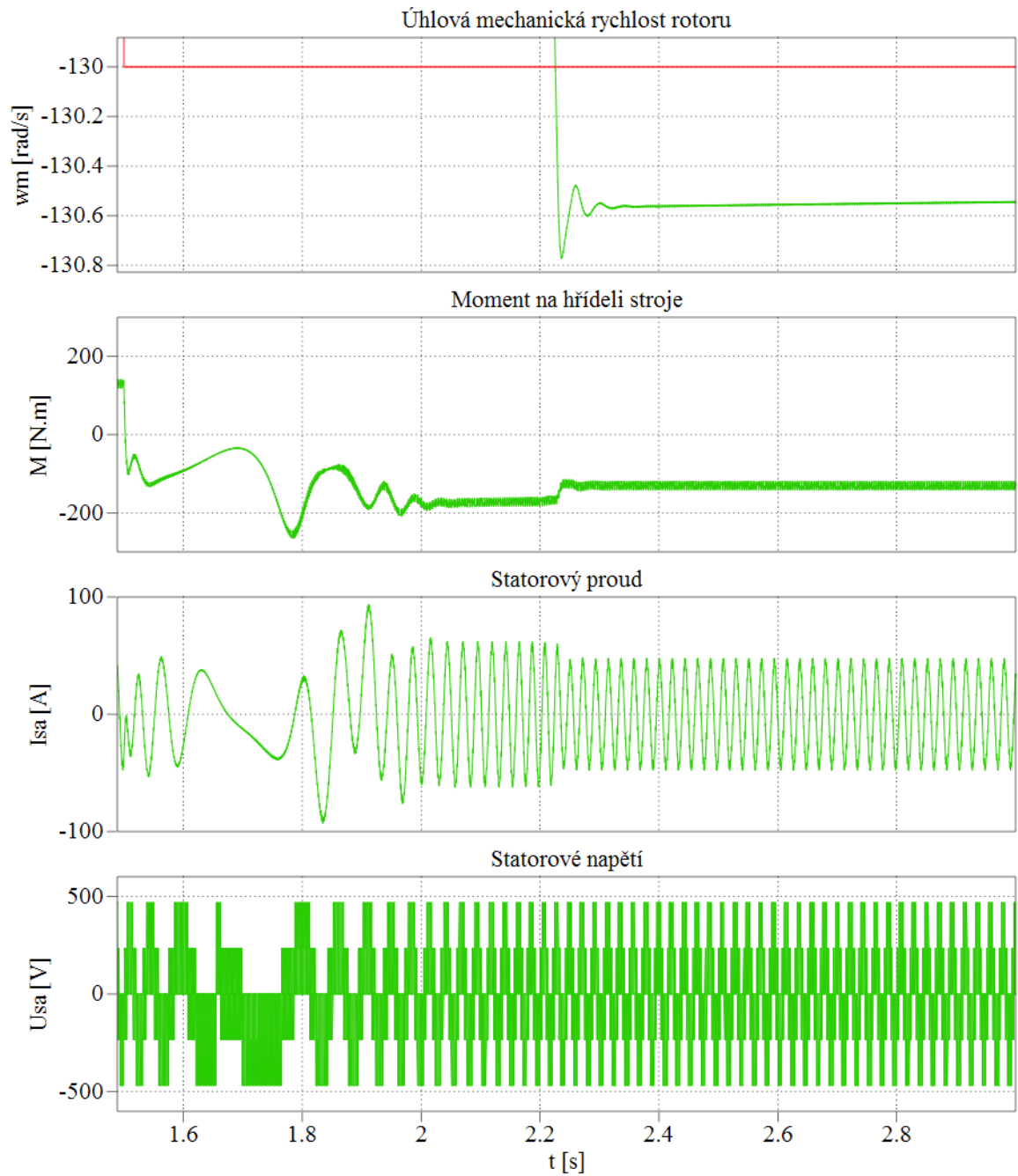
V Graf 11 je vidět rozběh na  $\omega_m=130$  [rad/s] a v čase  $t=1,5$  [s] dojde ke změně směru otáčení na  $\omega_m=-130$  [rad/s].



Graf 11: Rozběh motoru  $\omega_m=130$  [rad/s] a změna směru otáčení na  $\omega_m=-130$  [rad/s],  $K_P=3$  [-] a  $K_I=0,16$  [-]



V Graf 12 lze vidět detail přechodového děje, ke kterému dojde při změně směru otáčení. Detail je vyjmut z Graf 11.

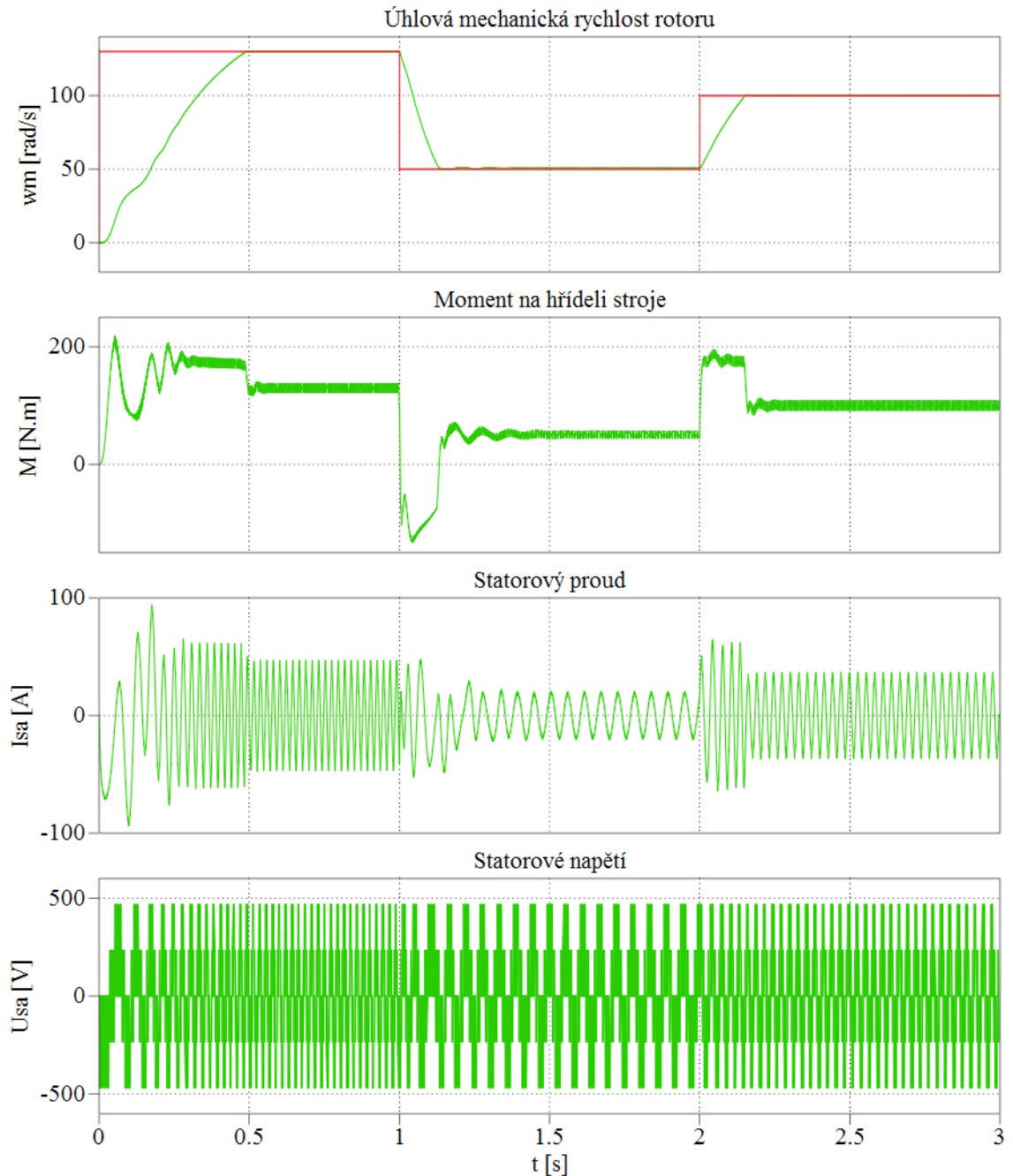


Graf 12: Přechodový děj při změně směru otáčení  $\omega_m=130$  [rad/s] a změna směru točení na  $\omega_m=-130$  [rad/s],  $K_p=3$  [-] a  $K_f=0,16$  [-]

### 5.2.2. PWM modulace s 3. Harmonickou

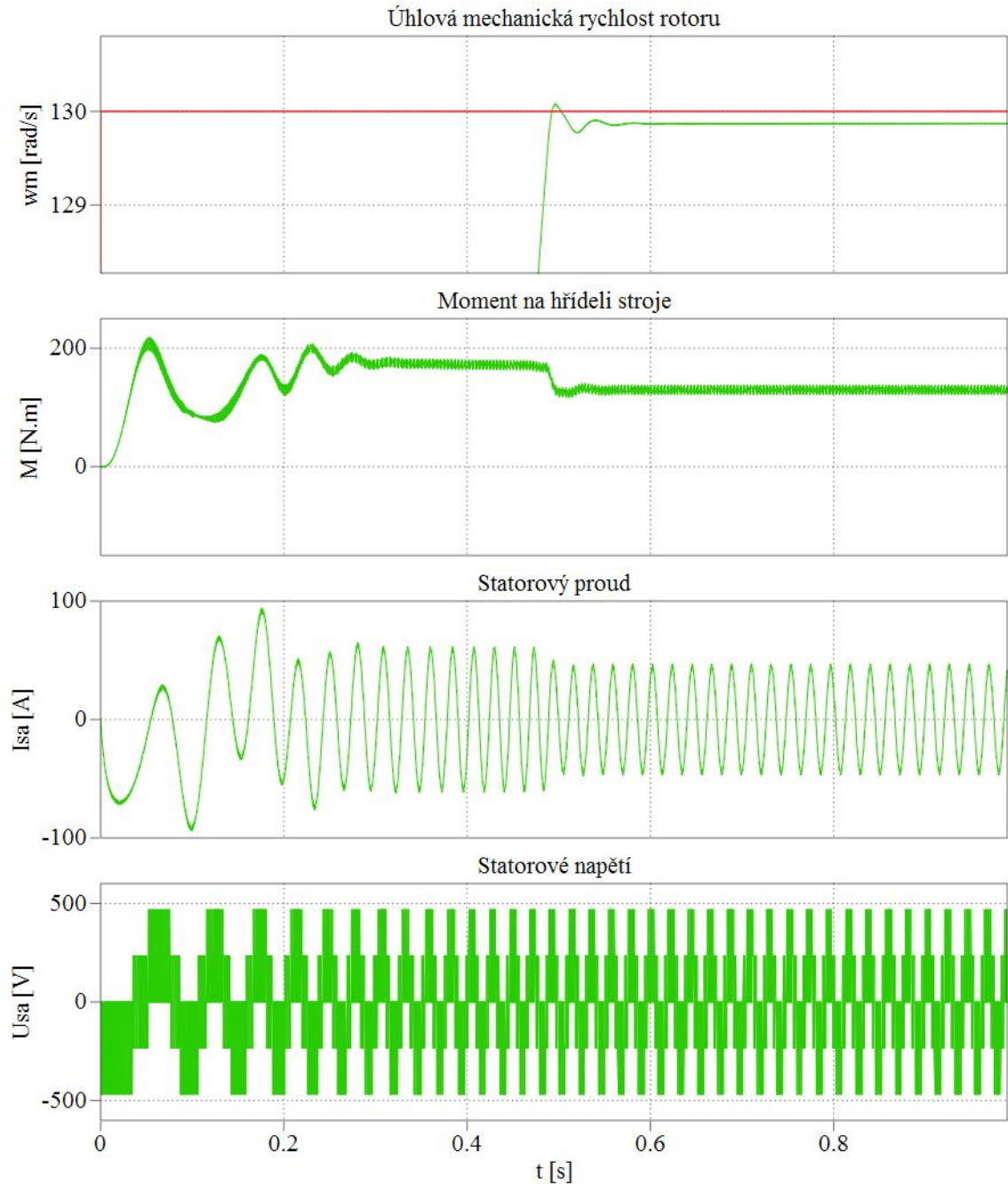
V této simulaci byl použit stejný regulátor, jako v kapitole 5.2.1.

V Graf 13 lze vidět rozběh z  $\omega_m=0$  [rad/s] na  $\omega_m=130$  [rad/s]. V  $t=1$  [s] změna z  $\omega_m=130$  [rad/s] na  $\omega_m=50$  [rad/s] a v  $t=2$  [s] změna z  $\omega_m=50$  [rad/s] na  $\omega_m=100$  [rad/s].



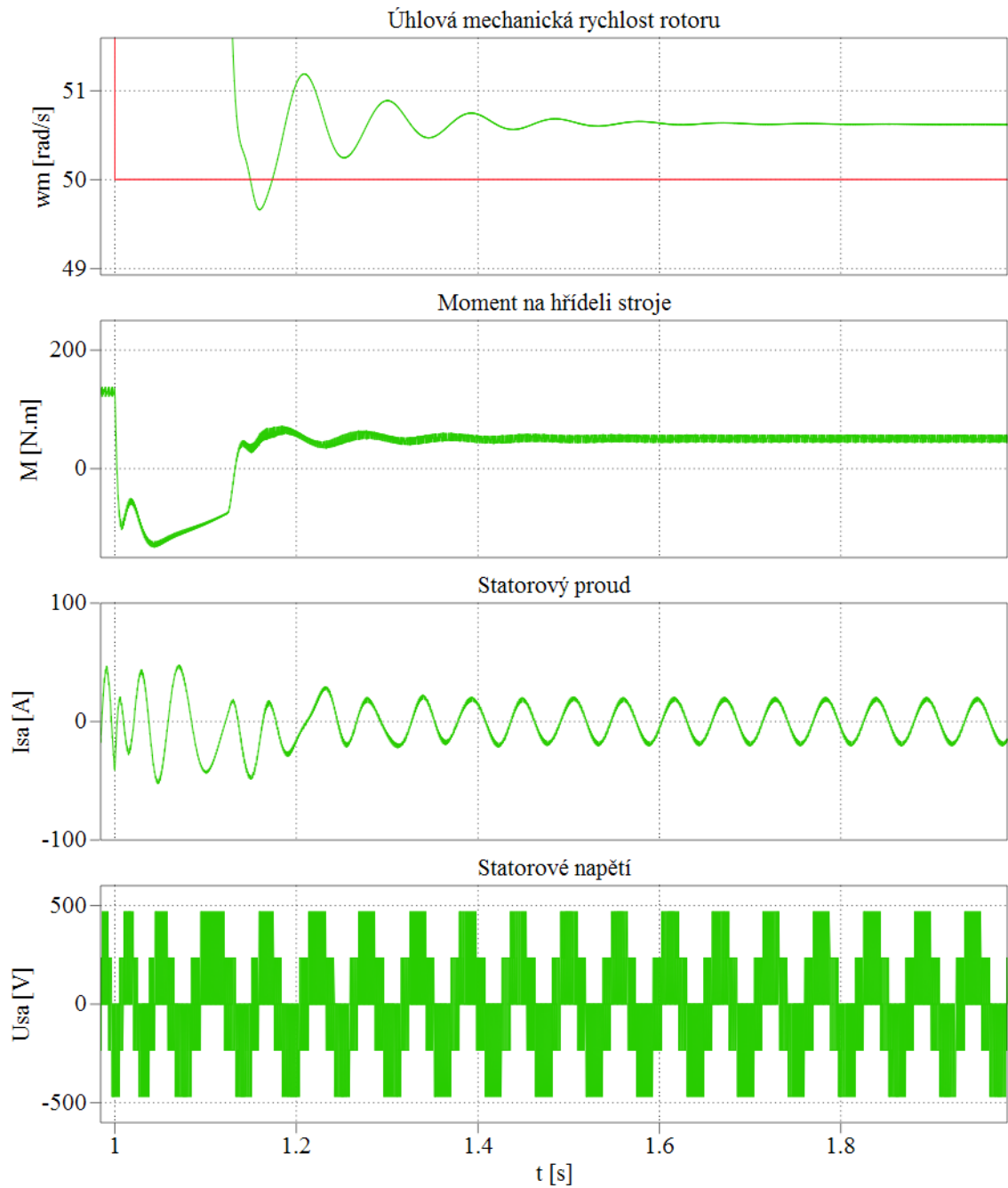
Graf 13: Rozběh na  $\omega_m=130$  [rad/s], změna na  $\omega_m=50$  [rad/s] a na  $\omega_m=100$  [rad/s],  $K_P=3$  [-] a  $K_I=0,16$  [-]

V Graf 14 lze vidět detail přechodového děje při rozběhu motoru  $\omega_m=0$  [rad/s] na  $\omega_m=130$  [rad/s]. Je vidět že rychlost překmitne, ale ustálí se téměř na požadované hodnotě. Detail je vyjmut z Graf 13.



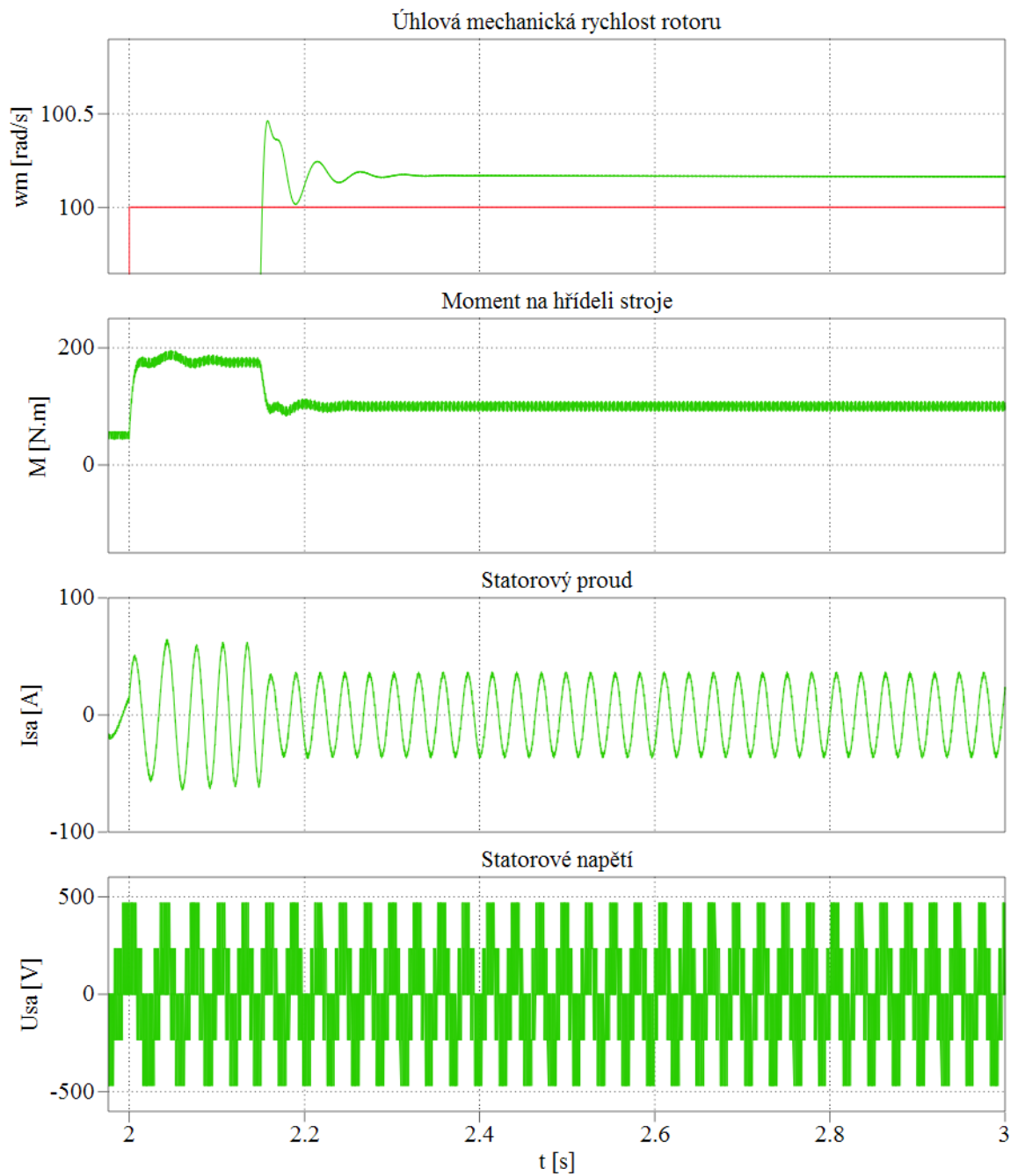
Graf 14: Přechodový děj z  $\omega_m=0$  [rad/s] na  $\omega_m=130$  [rad/s],  $K_p=3$  [-] a  $K_I=0,16$  [-]

V Graf 15 je detail přechodového děje z  $\omega_m=130$  [rad/s] na  $\omega_m=50$  [rad/s]. Je vidět, že po ustálení kmitání se  $\omega_m$  ustálí na větší rychlosti, než je požadovaná. Detail je vyjmut z Graf 13.



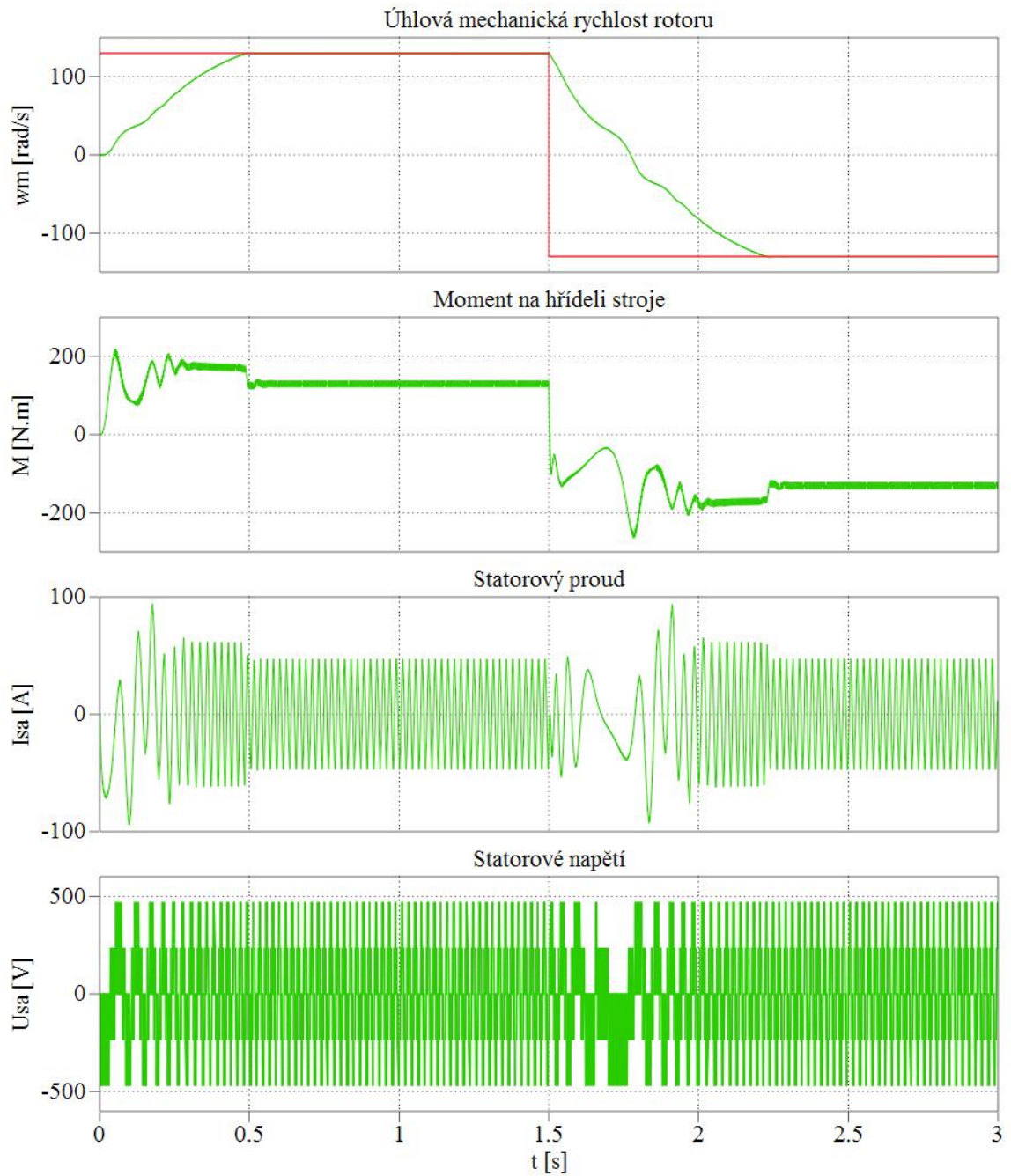
Graf 15: Přechodový děj z  $\omega_m=130$  [rad/s] na  $\omega_m=50$  [rad/s],  $K_P=3$  [-] a  $K_I=0,16$  [-]

V Graf 16 je vidět přechodový děj, při změně z  $\omega_m=50$  [rad/s] na  $\omega_m=100$  [rad/s]. Při této změně dojde ke zrychlení motoru. Detail je vyjmut z Graf 13.



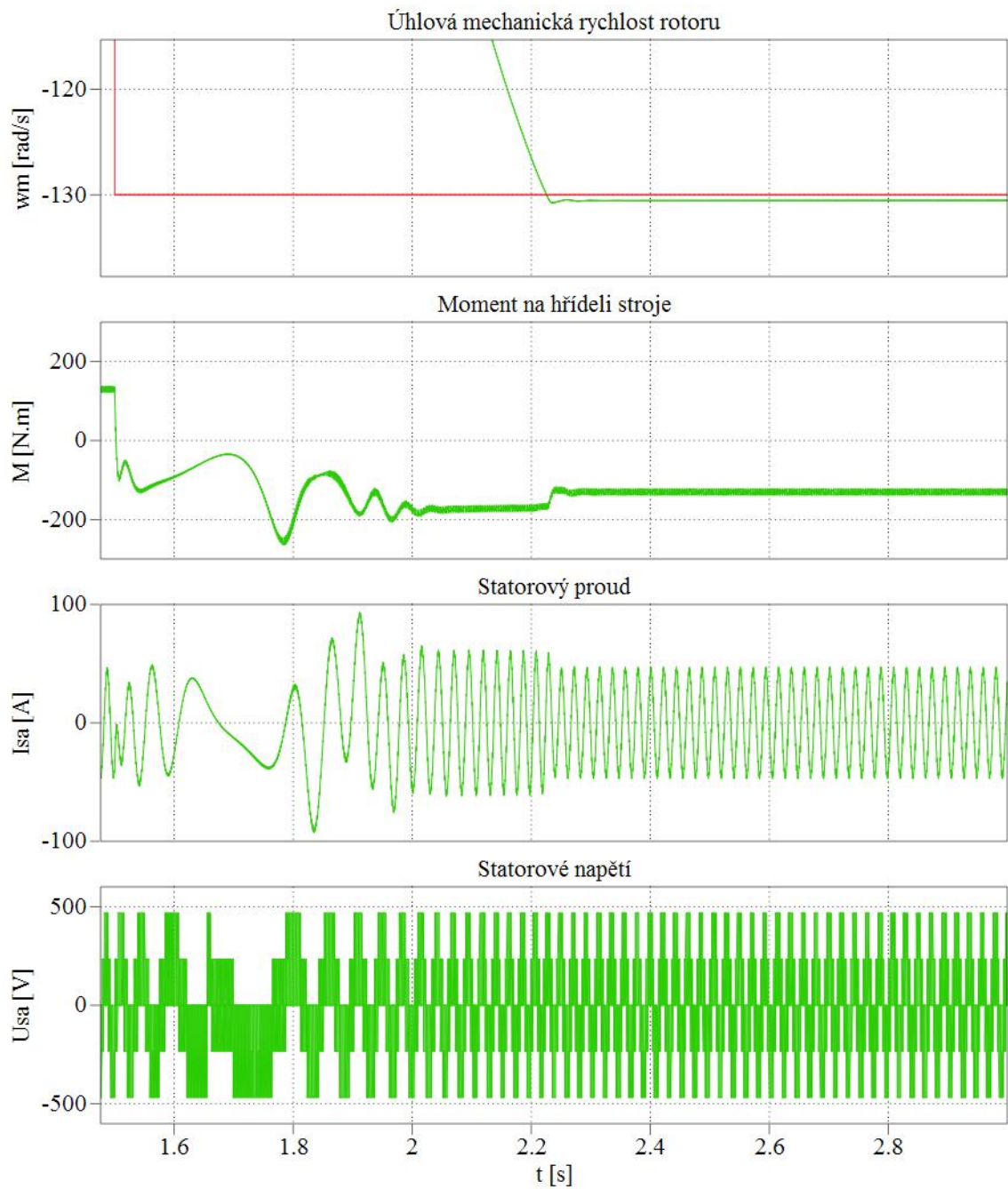
Graf 16: Přechodový děj z  $\omega_m=50$  [rad/s] na  $\omega_m=100$  [rad/s],  $K_P=3$  [-] a  $K_I=0,16$  [-]

V Graf 17 je vidět rozběh na  $\omega_m=130$  [rad/s] a v čase  $t=1,5$  [s] dojde ke změně směru otáčení na  $\omega_m=-130$  [rad/s].



Graf 17: Rozběh motoru  $\omega_m=130$  [rad/s] a změna směru otáčení na  $\omega_m=-130$  [rad/s],  $K_P=3$  [-] a  $K_I=0,16$  [-]

V Graf 18 lze vidět detail přechodového děje, ke kterému dojde při změně směru otáčení. Detail je vyjmut z Graf 17.



Graf 18: Přechodový děj při změně směru otáčení  $\omega_m=130$  [rad/s] a změna směru točení na  $\omega_m=-130$  [rad/s],  $K_P=3$  [-] a  $K_I=0,16$  [-]

## 6. Závěr

Na modelech pohonů s asynchronním motorem se skalárním řízením jsem simuloval přechodové děje uvnitř pohonu, které se dějí při změně řídicích signálů a požadovaných hodnot. Hlavní veličiny, které mě zajímaly, byly  $\omega_m$ ,  $M$ ,  $I_s$ . Modely jsem sestavil v prostředí Matlab/Simulink s podporou speciální knihovny Plecs. Simulace jsem provedl na dvou regulačních schématech:

- bez čidla otáček
- S čidlem otáček

Skalární regulace bez čidla otáček má špatné dynamické vlastnosti. Při rozběhu moment tlumeně kmitá. Po ustálení na požadované hodnotě je moment téměř konstantní.

U skalární regulace s čidlem otáček moment při rozběhu pohonu z nulové rychlosti kmitá velkou amplitudou, která se poměrně rychle tlumí, moment se ustálí přibližně za 0,5 až 1 [s]. Po ustálení stavu lze říci, že moment je konstantní.

Když při této regulaci, s čidlem otáček, změním požadovanou rychlost, tak nám moment nebude kmitat, tak jako u rozběhu.

Z výsledků simulací je zřejmé, že skalární regulace s čidlem otáček má lepší dynamickou odezvu na požadované hodnoty než skalární regulace bez čidla otáček. Při této regulaci je velmi důležité mít přesné a kvalitní čidlo. Jinak by i tato skalární regulace neměla dobré vlastnosti. Dobře realizovaná regulace s čidlem otáček má srovnatelně dobré vlastnosti jako vektorová regulace, ale jenom v oblasti vysokých otáček. V oblasti nízkých otáček nemá skalární regulace s čidlem otáček dobré vlastnosti ve srovnání s vektorovou regulací, ale má lepší vlastnosti než skalární regulace bez čidla otáček.



## 7. Literatura

- [1] K. Zeman, Z. Peroutka, M. Janda, Automatická regulace pohonů s Asynchronními motory, Plzeň, 2007
- [2] M. Pittermann, Elektrické pohony základy, Plzeň, 2008
- [3] J. Javůrek, Regulace moderních elektrických pohonů, Praha, 2003
- [4] K. Zeman, Dynamické vlastnosti asynchronních motorů, napájených frekvenčními měniči, strukturní schémata řídicích a regulačních obvodů., Plzeň, 2006
- [5] O. Roubíček, Elektrické motory a pohony, Praha, 2008
- [6] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Wattův\\_odstředivý\\_regulátor](http://cs.wikipedia.org/wiki/Wattův_odstředivý_regulátor)
- [7] <http://www.plexim.com/>

## 8. Přílohy

### 8.1. Seznam obrázků

Obr. 1: Wattův odstředivý regulátor pro parní stroj [6] .....	9
Obr. 2: Tvary drážek u asynchronního motoru [5].....	12
Obr. 3: Momentová charakteristika asynchronního stroje .....	14
Obr. 4: Náhradní schéma asynchronního motoru [1].....	15
Obr. 5: Výkonový obvod napěťově kmitočtového řízení asynchronního motoru [2].....	21
Obr. 6: 3-f můstkový diodový usměrňovač [2].....	21
Obr. 7: 3-f napěťový střídač [2] .....	22
Obr. 8: Schéma skalárního řízení asynchronního motoru bez čidla otáček [4].....	27
Obr. 9: schéma skalárního řízení asynchronního motoru s čidlem otáček [4] .....	28
Obr. 10: Simulace oteplení a spínacích ztrát pomocí tepelné knihovny v Plecs [7] .....	30

### 8.2. Seznam grafů

Graf 1: Obdelníkové řízení.....	23
Graf 2: PWM modulace .....	24
Graf 3: PWM modulace s přidanou 3. harmonickou .....	25
Graf 4: Pohon s obdelníkovým řízením .....	32
Graf 5: Změna požadované z $f_s=0$ [Hz] na $f_s=25$ [Hz], $f_s=50$ [Hz] a $f_s=25$ [Hz].....	33
Graf 6: Změna požadované z $f_s=0$ [Hz] na $f_s=25$ [Hz], $f_s=50$ [Hz] a $f_s=25$ [Hz].....	34
Graf 7: Rozběh na $\omega_m=130$ [rad/s], změna na $\omega_m=50$ [rad/s] a na $\omega_m=100$ [rad/s], $K_p=3$ [-] a $K_I=0,16$ [-] .....	36
Graf 8: Přebodový děj z $\omega_m=0$ [rad/s] na $\omega_m=130$ [rad/s], $K_p=3$ [-] a $K_I=0,16$ [-] .....	37
Graf 9: Přebodový děj z $\omega_m=130$ [rad/s] na $\omega_m=50$ [rad/s], $K_p=3$ [-] a $K_I=0,16$ [-] .....	38
Graf 10: Přebodový děj z $\omega_m=50$ [rad/s] na $\omega_m=100$ [rad/s], $K_p=3$ [-] a $K_I=0,16$ [-] .....	39
Graf 11: Rozběh motoru $\omega_m=130$ [rad/s] a změna směru otáčení na $\omega_m=-130$ [rad/s], $K_p=3$ [-] a $K_I=0,16$ [-].....	40
Graf 12: Přebodový děj při změně směru otáčení $\omega_m=130$ [rad/s] a změna směru točení na $\omega_m=-130$ [rad/s], $K_p=3$ [-] a $K_I=0,16$ [-] .....	41
Graf 13: Rozběh na $\omega_m=130$ [rad/s], změna na $\omega_m=50$ [rad/s] a na $\omega_m=100$ [rad/s], $K_p=3$ [-] a $K_I=0,16$ [-].....	42
Graf 14: Přebodový děj z $\omega_m=0$ [rad/s] na $\omega_m=130$ [rad/s], $K_p=3$ [-] a $K_I=0,16$ [-] .....	43

Graf 15: Přechodový děj z $\omega_m=130$ [rad/s] na $\omega_m=50$ [rad/s], $K_p=3$ [-] a $K_i=0,16$ [-] .....	44
Graf 16: Přechodový děj z $\omega_m=50$ [rad/s] na $\omega_m=100$ [rad/s], $K_p=3$ [-] a $K_i=0,16$ [-] .....	45
Graf 17: Rozběh motoru $\omega_m=130$ [rad/s] a změna směru otáčení na $\omega_m=-130$ [rad/s], $K_p=3$ [-] a $K_i=0,16$ [-].....	46
Graf 18: Přechodový děj při změně směru otáčení $\omega_m=130$ [rad/s] a změna směru točení na $\omega_m=-130$ [rad/s], $K_p=3$ [-] a $K_i=0,16$ [-] .....	47

### 8.3. M-script pro výpočet Klossova vztahu

```

sk=0.3; % pro tvrdý motor
Mz=300; % zátěž
Mm=1000;
h=-0.0001;
s=2;
count=1;
while (s>=-1)
    a=(s/sk);
    b=(sk/s);
    M=((2*Mm)/(a+b));
    out(count,:)= [s M Mz]; s
    count=count+1;
    s=s+h;
end
figure(1)
plot(out(:,1),out(:,2))
%plot([out(:,2),out(:,3)],out(:,1))
%plot(out(:,2),out(:,1))
grid on;
xlabel('s [-]');
ylabel('M [N.m]');
```