

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

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ**  
**ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Topologie měničů pro trakční pohony**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip DOMIN**  
Osobní číslo: **E13B0179P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Topologie měničů pro trakční pohony**  
Zadávající 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. Proveďte rešerši současně používaných topologií.
2. Vytvořte simulační model vybraného měniče.
3. Navrhněte algoritmy řízení a regulace.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

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

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

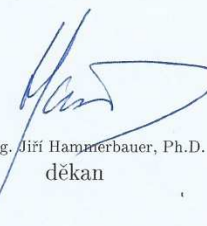
Seznam odborné literatury:

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


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ladislav Poljak**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

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**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na měniče používané pro trakční pohony. Rešerše je zaměřena na měniče, které jsou používány v současných trakčních pohonech. Měniče jsou zde uvedeny podle motoru, který napájí. V praktické části je simulace nepřímého měniče, s napětovým meziobvodem a pulzně spínaným odporem. Z tohoto měniče je napájen asynchronní motor s kotvou nakrátko. K simulaci byl použit Simulink, kde bylo vytvořeno řízení a rozšiřující knihovna Plecs, zde byl vytvořen výkonový obvod.

## **Klíčová slova**

Stejnoseměrné měniče, Napětový střídač, Pulzní měniče, Stejnoseměrné motory, Asynchronní motor, Simulink, Plecs, 1f můstkový usměrňovač

## **Abstract**

The Bachelor thesis is focused on converters for traction drives. The search is focused on converters, that are used in current traction drives. The converters are listed here according to the type of engine they are driving. In the practical part is the simulation of indirect converters with voltage circuit and pulse-switched resistance. This converters is used to power induction motor with squirrel cage. Simulink was used to create control and the Plecs library was used to create a power circuit.

## **Key words**

DC converters, Voltage inverter, Pulse converter, DC motors, Induction motor, Simulink, Plecs, Single-phase bridge rectifiers

## 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

Filip Domin

## **Poděkování**

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

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>TRAKČNÍ SOUSTAVY</b> .....	<b>12</b>
1.1    STEJNOSMĚRNÁ TROLEJ .....	12
1.2    STRÍDAVÁ TRAKČNÍ SOUSTAVA .....	12
<b>2    STEJNOSMĚRNÉ MOTORY</b> .....	<b>13</b>
2.1    STEJNOSMĚRNÉ MĚNIČE .....	13
2.1.1    Pulzní měniče .....	13
2.1.2    Snižovací pulzní měnič napětí .....	13
2.1.3    Zvyšovací pulzní měnič .....	14
2.1.4    Pulzní řízení odporu .....	15
2.1.5    Stejnosemerná trolej .....	17
2.2    STEJNOSMĚRNÉ MOTORY NAPÁJENY ZE STRÍDAVÉ SÍTĚ .....	18
2.2.1    Proudový pulzní usměrňovač .....	18
2.2.2    If řízený můstkový usměrňovač .....	20
<b>3    STRÍDAVÉ MOTORY</b> .....	<b>22</b>
3.1    STRÍDAVÉ MOTORY NAPÁJENÉ ZE STEJNOSMĚRNÉHO ZDROJE .....	23
3.1.1    Proudový meziobvod .....	23
3.1.2    Napěťový meziobvod .....	23
3.2    STRÍDAVÉ MOTORY NAPÁJENÉ ZE STRÍDAVÉ SÍTĚ .....	23
3.2.1    Napájení proudových střídačů .....	24
3.2.2    Napájení napěťových střídačů .....	24
3.2.3    Napěťové a proudové střídače .....	25
<b>4    SIMULACE</b> .....	<b>32</b>
4.1    VÝKONOVÁ ČÁST .....	33
4.2    ŘÍZENÍ .....	34
4.3    VÝSLEDKY SIMULACE .....	36
<b>5    ZÁVĚR</b> .....	<b>41</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>42</b>



## Seznam symbolů a zkratek

$C$	kapacita
$D$	dioda
$f_m$	mechanická frekvence
$f_s$	statorová frekvence
$f_r$	rotorová frekvence
$f_{rk}$	kritická rotorová frekvence
$i_a$	proud zátěží
$i_d$	okamžitá hodnota stejnosměrného proudu
$I_m$	amplituda vstupního proudu
$i_s$	proud sítě
$i_v$	proud prvkem V
$i_{v0}$	proud zpětnou diodou
$I_d$	střední hodnota proudu na zátěži
$L$	indukčnost
$P$	činný výkon
PMSM	synchronní motory s permanentními magnety
PWM	pulzně šířková modulace
$R$	odpor
$R_{ef}$	efektivní hodnota odporu
$T$	perioda
$T_1$	doba sepnutí
$T_1, T_2, T_3, T_4$	tyristory
$Tr$	IGBT tranzistor
$u_C$	napětí na kondenzátoru
$u_d$	střední hodnota napětí na zátěži
$U_d$	napětí zdroje
$u_{di}$	střední hodnota napětí na zátěži
$u_{di0}$	střední hodnota napětí na zátěži pro neřízený usměrňovač
$U_I$	indukované napětí
$u_m$	napětí motoru
$u_s$	napětí sítě

$U_{ra}, U_{rb}, U_{rc}$	řídící napětí
$U_{rm}$	amplituda řídicího napětí
$u_{10}, u_{20}, u_{30}$	fázová napětí střídače
$U_{vm}$	vstupní amplituda napětí
$u_{z12}, u_{z23}, u_{z31}$	sdružená napětí střídače
$u_{z1}, u_{z2}, u_{z3}$	fázová napětí na zátěži
$V$	spínací prvek
$VR$	zpětné diody
$V0$	nulová(zpětná) dioda
$z$	poměrná doba sepnutí ( $T_1/T$ )
$Z$	zátěž
$\alpha$	řídící úhel
$\psi$	úhel sepnutí
$\gamma$	bezpečnostní úhel
$\varepsilon$	řídící úhel
$\omega$	úhlová frekvence

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na měniče, které se využívají v trakčních pohonech. Jsou zde uvedeny měniče, které jsou používány v současných trakčních pohonech.

První tři části této práce jsou zaměřeny na topologii a princip činnosti měničů. V této části jsou měniče rozděleny podle motoru, který napájí. Další rozdělení je podle typu sítě, tedy jestli je zdrojem pro měnič stejnosměrný nebo střídavý zdroj.

V praktické části je simulace jednoho z měničů, který napájí asynchronní motor s kotvou nakrátko. Pro simulaci jsem si vybral nepřímý měnič kmitočtu. Nepřímý měnič kmitočtu se skládá ze vstupního měniče, tím je usměrňovač. Po vstupním měniči následuje stejnosměrný meziobvod, ten je zdrojem pro výstupní měnič. Pro simulaci jsem zvolil spojení 1f neřízeného usměrňovače a 3f napět'ového střídače. Zapojení muselo být doplněno pulzně spínaným odporem, na kterém se maří brzdná energie. Pro řízení asynchronního motoru jsem zvolil skalární řízení s čidlem otáček. Napět'ový střídač je řízen pomocí pulzně šířkové modulace (PWM). Pomocí těchto měničů je simulováno použití v trakci. Simulace byla zrealizována v programu Simulink s rozšiřující knihovnou Plecs.

# Trakční soustavy

Vozidla rozdělujeme podle způsobu dodávání energie, a to na vozidla závislá a nezávislá. Vozidla závislá odebírají energii z trolejového vedení. Vozidla nezávislá si vezou energii sebou.[4]

## 1.1 Stejnosměrná trolej

Historicky nejstarší. Napájení vozidel ze zdroje stejnosměrného proudu. V současnosti se používají:

- 600 V nebo 700 V pro vozidla MHD
- 1500 V pro železnice
- 3000 V hlavní dráhy [4]

Postupně se zvyšovalo napětí, s tím jak se zvyšovaly požadavky na výkony. Zdrojem napětí jsou měřírny, ty jsou napájeny z třífázové sítě:

- Pro MHD z 22 kV. Usměrněno přes můstkové usměrňovače
- Pro dráhy ze 110 kV. Upraveno pomocí transformátorů a usměrněno pomocí můstkového usměrňovače [4]

## 1.2 Střídavá trakční soustava

V evropských zemích máme dvě hlavní napájecí soustavy:

- 25 kV, 50 Hz
- 15 kV, 16,7 Hz

Jedná se o jednofázovou napájecí soustavu. Mezi hlavní výhody střídavé sítě patří malé ztráty na trolejích, menší průřezy trolejového drátu a větší vzdálenosti napájecích stanic. Vozidlo musí mít trakční transformátor, ten negativně ovlivňuje hmotnost vozidla. [6]

Střídavá trakční soustava je využívána hlavně pro železniční vozidla. Trakční transformátor nám umožňuje volit optimální velikost napětí motoru.

## 2 Stejnosměrné motory

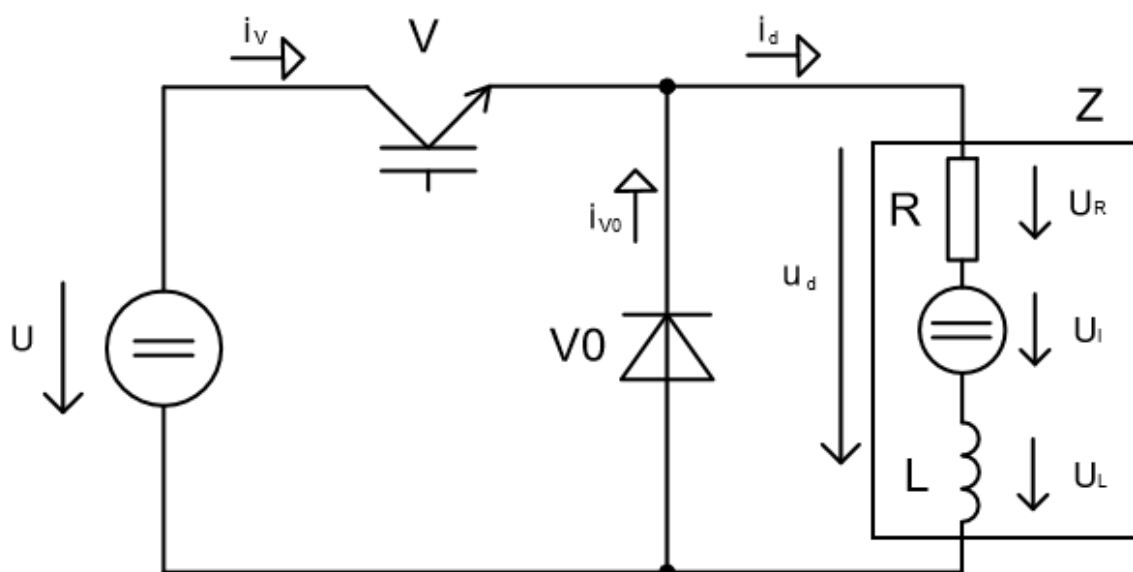
### 2.1 Stejnosměrné měniče

Stejnosměrné měniče se obvykle používají v elektrické trakci. Pomocí stejnosměrných měničů můžeme řídit střední hodnotu napětí na zátěži, pokud použijeme vhodné řízení. Spínání je realizováno pomocí spínaných polovodičových součástek, jako například IGBT tranzistory nebo GTO tyristory. [1]

#### 2.1.1 Pulzní měniče

Pulzní regulace se používá především pro plynulé řízení napětí na stejnosměrných vozidlech. Používají se i na jiné účely, například měniče pro rekuperaci (Zvyšovací pulzní měnič), vstupní měnič pro asynchronní pohon s proudovými střídači a měniče pro regulaci odporové brzdy. [2]

#### 2.1.2 Snižovací pulzní měnič napětí



Obr. 2.1 Snižovací pulzní měnič

Měnič je tvořen spínacím prvkem  $V$ , dále nulovou diodou  $V0$ . Spínací prvek  $V$  je řízen pomocí řídicího obvodu. Podmínka provozu je  $U_I < U$ .

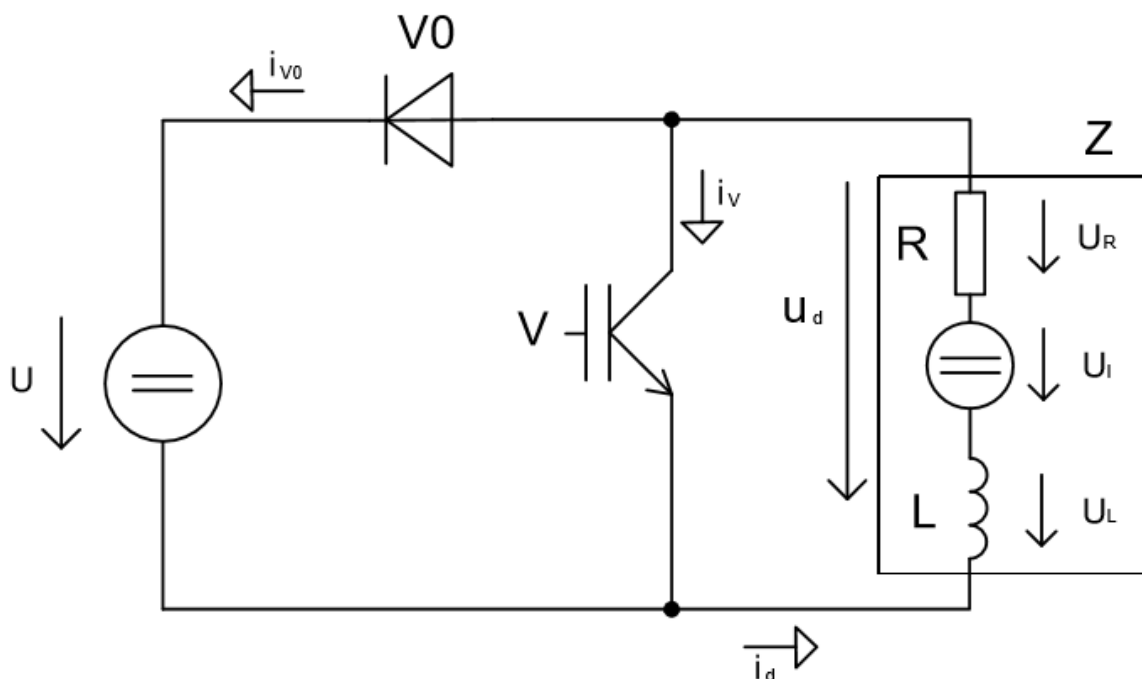
Pokud je spínací součástka V sepnuta, potom máme na zátěži napětí  $u_d = U$ . Proud prochází přes spínací prvek a zátěž. Proud roste a blíží se hodnotě  $I_d = \frac{U-U_i}{R}$ . Když je spínací součástka V rozepnuta, je napětí na zátěži  $u_d = 0$ . V tomto okamžiku prochází proud přes zátěž a nulovou diodu V0, proud klesá k nule. Pokud proud v době kdy je prvek V rozepnut neklesne k nule, jedná se o nepřerušovaný proud. [1]

Pro nepřerušovaný proud vypočteme střední hodnotu napětí jako

$$U_d = \frac{T_1}{T} * U = z * U \quad (2.1.2.1)$$

Poměrná doba sepnutí z. Pomocí poměrné doby sepnutí můžeme řídit střední hodnotu napětí na zátěži. Teoreticky můžeme řídit napětí od 0 do napětí zdroje U. V reálném světě je rozsah menší. Výkon je možné přenášet pouze ze zdroje napětí do zátěže. [1]

### 2.1.3 Zvyšovací pulzní měnič



Obr. 2.2 Zvyšovací pulzní měnič

Tento typ měniče se používá k přesunu energie ze zdroje nižšího napětí do zdroje vyššího napětí. Měnič je tvořen spínacím prvkem V a oddělovací diodou V0. [1]

Při sepnutí spínacího prvku V je napětí na zátěži  $u_d = 0$ . Zátěž je ve zkratu. Zkratu zdroje zabraňuje oddělovací dioda V0. Proud zátěže  $i_d = i_v$ , jedná se o část exponenciály, která roste k hodnotě  $U_i / R$ . Část energie z  $U_i$  se ztrácí na R a část se akumuluje v L. Pokud je spínací součástka V rozepnuta, proud se nepřerušuje. To díky indukčnosti L. Proud teče přes V0 do zdroje napětí U. V této fázi tvoří proud část exponenciály klesající k hodnotě  $(U_i - U) / R$ . Pokud proud v době rozepnutí spínací součástky V neklesne k nule, je proud nepřerušovaný. V tomto intervalu je  $u_d = U$ , energie ze zdroje  $U_i$  a indukčnosti L se přesouvá do zdroje U a část se ztrácí na odporu R. [1]

$$U_d = \frac{T_2}{T} * U = \frac{T - T_1}{T} * U = (1 - z) * U \quad (2.1.3.1)$$

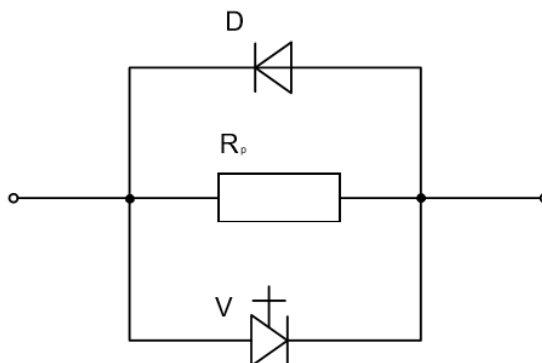
$$i_d = \frac{U_i - U_d}{R} \quad (2.1.3.2)$$

#### 2.1.4 Pulzní řízení odporu

Pulzní řízení odporu je bezkontaktní a umožňuje plynulé řízení, které je snadno ovladatelné. Tyto vlastnosti jsou výhodné oproti klasickému kontaktnímu řízení. U obou variant můžeme řídit pomocí spínání spínače V hodnotu efektivního odporu. [2] [1]

### Snižování efektivní hodnoty odporu

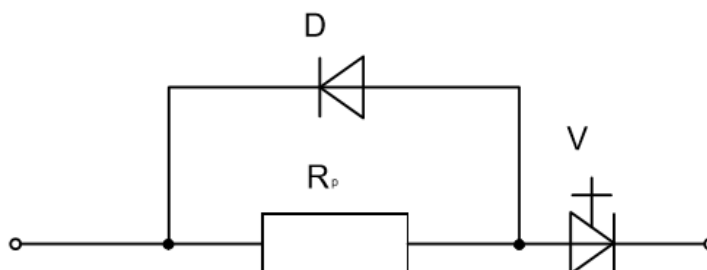
Toto zapojení se používá u stejnosměrných trakčních motorů. Kde je tento typ měniče zapojen do série s kotvou. Pomocí spínání spínače V lze řídit odporové brzdění. Můžeme ho také použít u proudových střídačů. Pomocí vhodného řízení můžeme řídit efektivní hodnotu odporu. Rozsah řízení je od  $R_{ef} = 0$  spínací součástka sepnuta ( $R_p$  je zkratován) do  $R_{ef} = R_p$ . Dioda paralelně připojená k odporu zabraňuje vzniku přepětí. [2]



Obr. 2.3 Zapojení pro snižování efektivní hodnoty odporu

### Zvyšování efektivní hodnoty odporu

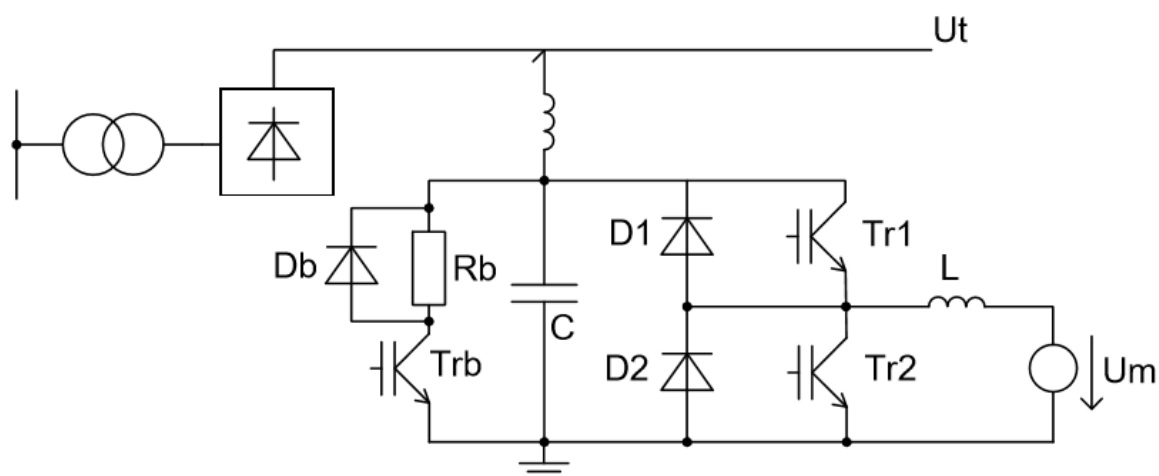
Toto zapojení se používá pro řízení odporového brzdění. Při rekuperaci se na odporu  $R_p$  maří brzdná energie. Použitím vhodného řízení můžeme řídit efektivní hodnotu odporu od  $R_{ef} = R_p$  do  $R_{ef} = \infty$  spínač rozepnut. Dioda je zde ze stejného důvodu jako u předchozího zapojení. [2]



Obr. 2.4 Zapojení pro zvyšování efektivní hodnoty odporu



### 2.1.5 Stejnosemřná trolej



Obr. 2.6 Příklad pohonu napájeného ze stejnosměrné troleje

Tr1, D2 - snižovací pulzní měnič

Tr2, D1 - zvyšovací pulzní měnič

Trb, R<sub>b</sub>, D<sub>b</sub> - Brzdový odpor

Trolej je napájena z měřírny. Ta napájí vozidla. Na vstupu je umístěna vyhlazovací cívka. Dále máme kondenzátor, ten představuje konstantní zdroj napětí. Trb, R<sub>b</sub> a D<sub>b</sub> tyto součástky tvoří pulzně spínaný brzdový odpor. Tr1, D2 představují snižovací pulzní měnič a Tr2, D1 představují zvyšovací pulzní měnič.

#### Režim jízda

V činnosti je tranzistor 1 a dioda 2, které pracují při vhodném řízení jako snižovací pulzní měnič. Řízením snižovacího pulzního měniče řídíme střední hodnotu napětí, a tím řídíme otáčky stejnosměrného motoru.

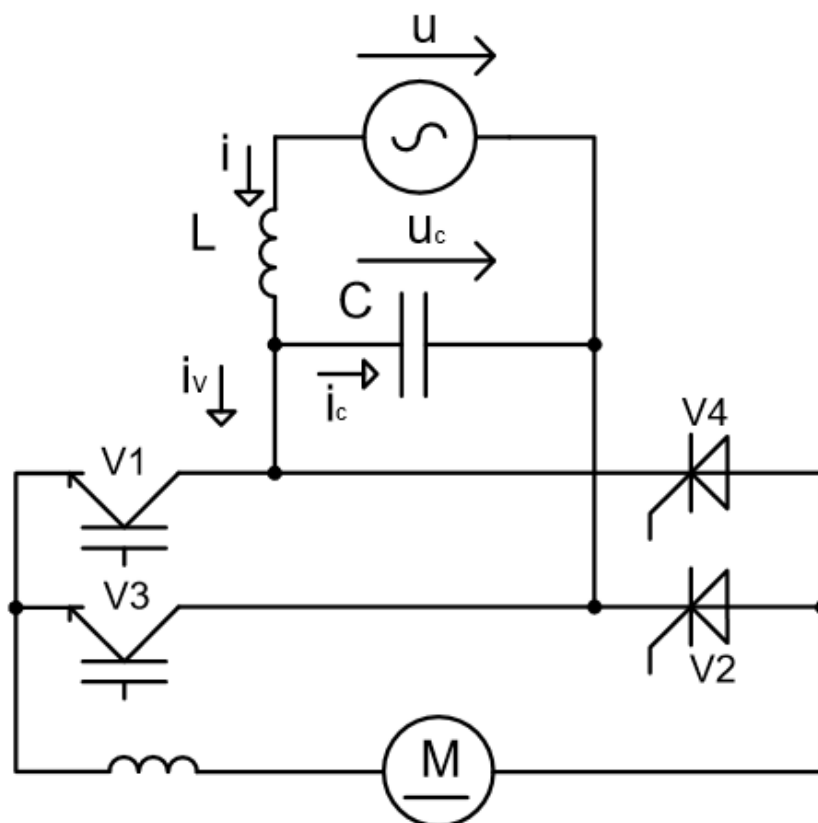
#### Režim brzda

V činnosti tranzistor 2 a dioda 1. S patřičným řízením pracují jako zvyšovací měnič. Pokud je sepnut tranzistor 2, energie motoru se akumuluje v tlumivce L. Po rozepnutí pokud jiné vozidlo, které je napájené z troleje jede, odebírá brzdovou energii. Pokud na troleji není

vozidlo, které by energii odebíralo vzniklá brzdná energie se akumuluje v kondenzátoru C. Na kondenzátoru se zvyšuje napětí a aby se kondenzátor nenabyl na příliš vysoké napětí, je nutné brzdou energii mařit. Brzdná energie se maří pomocí pulzně spínaného odporu. Dioda  $D_b$  se připojuje kvůli parazitní indukčnosti odporu.

## 2.2 Stejnosemné motory napájeny ze střídavé sítě

### 2.2.1 Proudový pulzní usměrňovač

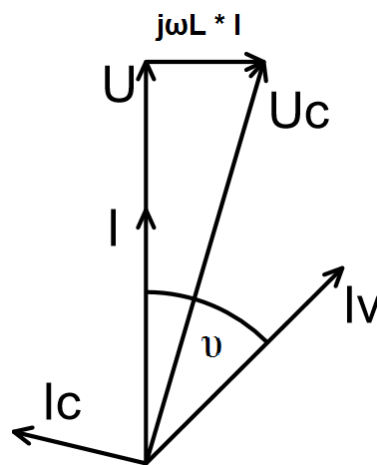


Obr. 2.7 Proudový pulzní usměrňovač

Proudové pulzní usměrňovače je vhodné používat pro stejnosměrnou zátěž. Stejnosemrou zátěží může být např. stejnosměrný motor nebo proudový střídač. Umožňuje tok energie v obou směrech. Z hlediska požadavku práce s co nejvyšším účíníkem by mohli být používány 1f proudové pulzní usměrňovače pro trakční pohony.

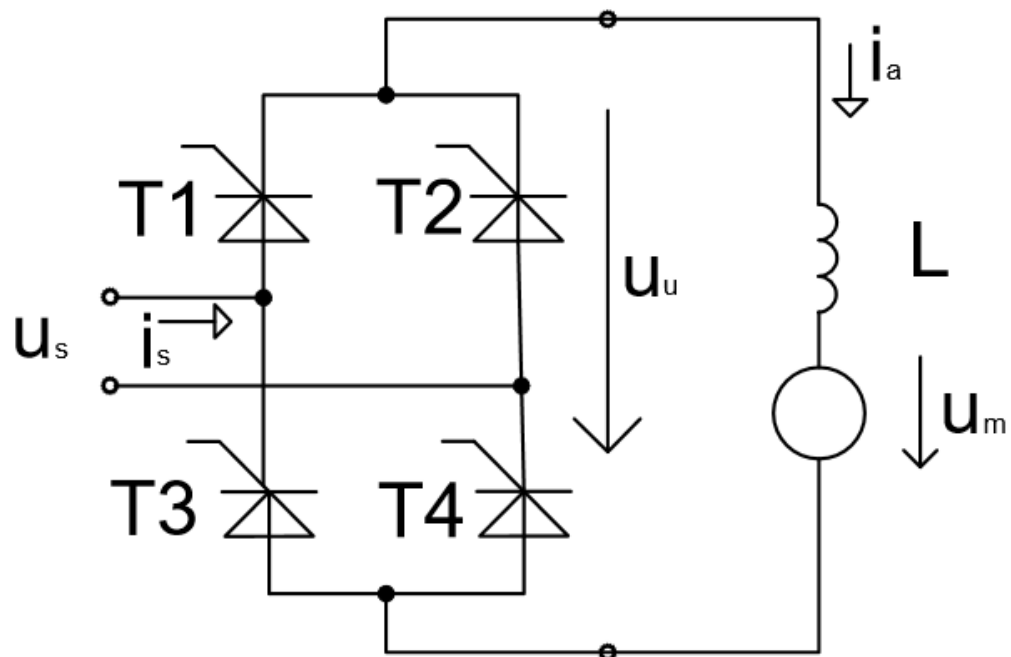
V1 a V3 jsou vypínatelné součástky. V2 a V4 jsou tyristory. Pomocí kapacity C realizujeme nezbytnou akumulaci funkci. L je indukčnost zdroje.

Součástky spínáme tak, že se mění stav vedení do zátěže se stavem nulového vedení. Pokud jsou sepnuty součástky V1,V2 nebo V3,V4 jedná se o stav vedení do zátěže. Při sepnutí součástek V1,V4 nebo V3,V4 se jedná o stav nulového vedení. Řízení tohoto typu usměrňovače můžeme realizovat prostřednictvím pulzně šířkové modulace. Pulzně šířková modulace pracuje na principu porovnávání pilového signálu se sinusovým modulačním signálem. Můžeme řídit úhel  $\nu$ , to je úhel fázového posunu mezi napájecím napětím a proudem. Kromě tohoto úhlu můžeme ještě řídit poměrné zapnutí  $z$ . Výsledný usměrněný signál odpovídá nastaveným hodnotám  $z$  a  $\nu$  a také zatížení. [1]



Obr. 2.8 Fázorový diagram proudového střídače

## 2.2.2 1f řízený můstkový usměrňovač



Obr. 2.9 1f řízený můstkový usměrňovač

Jako spínací prvky jsou zde použity tyristory, ty nám umožňují řídit napětí na zátěži. Můstkové zapojení můžeme rozdělit na dvě části, anodovou T1,T2 a katodovou T3,T4. Aby se uzavíral proud zátěží musí být vždy sepnuty dva tyristory. Jeden z anodové a jeden z katodové skupiny. 1f můstek je tedy dvoupulzní pokud by byl požadavek na menší zvlnění proudu musel by se použít 3f můstkový usměrňovač. [7]

Pokud by jsme nahradili tyristory diodami vznikl by nám 1f neřízený můstek. Tento typ se používá jako vstupní měnič pro napájení střídačů.

Pomocí Řídícího úhlu  $\alpha$  řídíme zpoždění sepnutí každého z tyristorů oproti tomu kdy by začala vést obyčejná dioda. Regulační rozsah je  $0 < \alpha < \pi$ , tento rozsah je ve skutečnosti menší. Regulační rozsah se zmenší o bezpečnostní úhel, ten označujeme  $\gamma$ . To je elektrický úhel, během kterého musí být na tyristoru závěrné napětí, aby došlo k obnově blokací schopnosti tyristoru. Při  $\alpha = 0$  je výstupní napětí shodné jako u neřízeného můstkového usměrňovače. Pokud budeme zvyšovat úhel  $\alpha$  střední hodnota napětí se bude zmenšovat. Tento typ měniče lze použít například při buzení menších stejnosměrných strojů. [7]

## Usměrňovačový a střídačový chod

Střední hodnota usměrněného proudu může mít jen jednu polaritu, a to kladnou. To je způsobeno tím, že tyristory propuští proud jen v jednom směru.

Střední hodnotu napětí na zátěži lze určit:

$$u_{di} = u_{di0} * \cos \alpha \quad (2.2.2.1)$$

Střední hodnota výkonu na zátěži je:

$$P = U_d * I_d \quad (2.2.2.2)$$

$U_d > 0$  potom je  $P > 0$  jedná se o usměrňovačový chod (Výkon jde ze střídavé strany na stejnosměrnou )

$U_d < 0$  potom je  $P < 0$  jedná se o střídačový chod (Výkon je přenášen ze stejnosměrné strany na střídavou) [7]

## 3 Střídavé motory

### Asynchronní motory

Od doby objevu asynchronního motoru byla snaha o použití pro trakční pohon. Největší snaha byla o použití motoru s kotvou na krátko. Největší překážkou zavedení asynchronního motoru byla jeho regulace otáček. Ta byla realizována pomocí změny kmitočtu a současné změny napětí. Největší pokrok nastal při objevu a následném vývoji vypínatelných polovodičových součástek.

Pro trakci se používají tří fázové motory s kotvou na krátko, napájené z měniče s proměnným napětím a kmitočtem. Jako měniče lze použít napěťový i proudový střídač. Jako první byly používány proudové střídače, a to proto, že využívaly obyčejné tyristory. S dalším vývojem vypínatelných polovodičových součástek se začali používat napěťové měniče. V dnešní době jsou používány převážně napěťové střídače. [5]

### Synchronní motory

V trakci se používají synchronní motory s permanentními magnety (PMSM). Výhodami oproti asynchronním motorům jsou menší rozměry a hmotnost. Nevýhodami pak vyšší cena a složitější konstrukce. Výkonová část pro PMSM je shodná s výkonovou částí asynchronního motoru. PMSM napájíme z 3f napěťového můstkového střídače s napěťovým meziobvodem. Rozdíl je při regulaci, PMSM musíme snímat úhlové natočení rotoru. Z tohoto důvodu musí být napájen každý PMSM z vlastního střídače. [11]

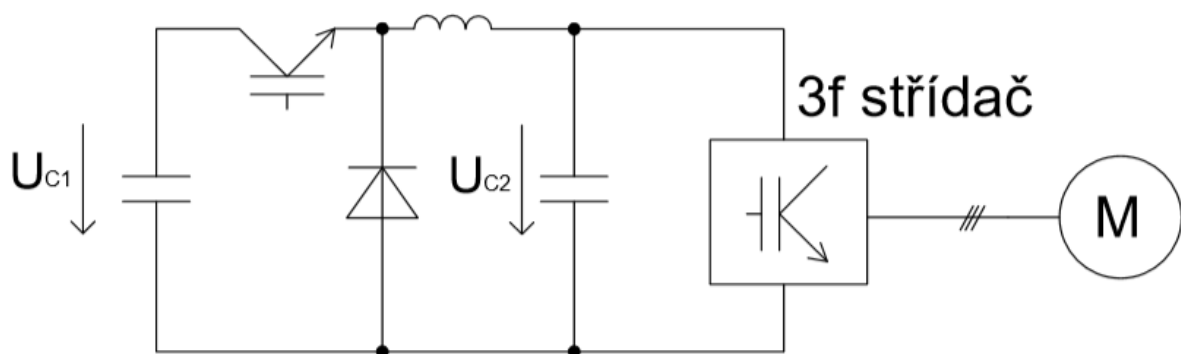
### 3.1 Střídavé motory napájené ze stejnosměrného zdroje

#### 3.1.1 Proudový meziobvod

Ten je nejčastěji tvořen pulzním měničem a vyhlazovací tlumivkou. Jsou podobné s měniči, které se používají pro napájení stejnosměrných motorů. Pokud chceme použít proudový střídač je nutné použít vstupní měnič. [5]

#### 3.1.2 Napěťový meziobvod

Napěťový meziobvod lze realizovat pomocí snižovacího pulzního měniče a LC filtru. Pomocí tohoto měniče můžeme snížit napětí troleje na vhodnou velikost. Pokud je stejnosměrné napětí troleje vhodné velikosti, můžeme meziobvod realizovat pomocí vstupního LC filtru.



Obr. 3.1 Napěťový meziobvod pro 3f napěťový střídač

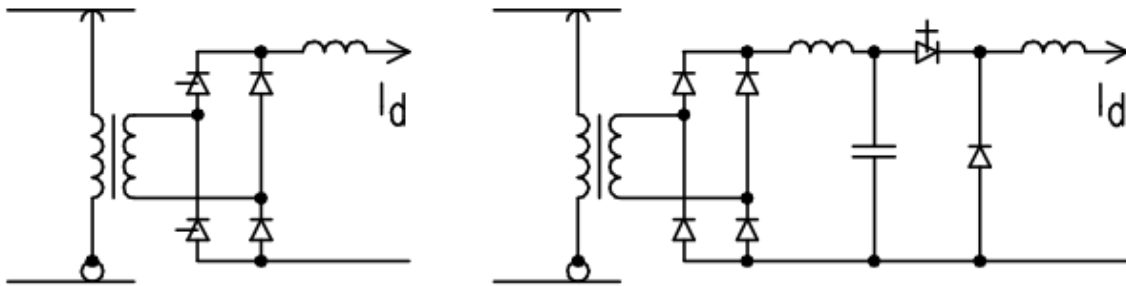
Příklad použití snižovacího pulzního měniče a LC filtru. Nevýhoda tohoto zapojení je , že není schopné pracovat v režimu brzdění. Aby bylo toto zapojení schopné pracovat v režimu brzdění, je nutné přidat pulzně spínaný odpor, na kterém se bude brzdná energie mařit. [3] [5]

### 3.2 Střídavé motory napájené ze střídavé sítě

Měniče je tvořen vstupním obvodem. Ten má za úkol vytvořit proudový nebo napěťový zdroj pro příslušný střídač. Pokud je použit proudový střídač je použití vstupního měniče nutné, protože většina zdrojů má napěťový charakter. [5]

### 3.2.1 Napájení proudových střídačů

Vytvořit proudový meziobvod lze pomocí řízených usměrňovačů a vyhlazovací tlumivky. V dvou systémových vozidlech lze také použít diodový usměrňovač, LC filtr a pulzní měnič. Tato zapojení mají podobné vlastnosti jako stejnosměrné motory i přesto, že je použit např. asynchronní motor. Nejlepších vlastností by bylo možné dosáhnout pomocí proudového pulzního usměrňovače. Ten by se mohl použít jako zdroj proudu s dobrým účínkem. Takové řešení však nebylo použito existují jen projekty. [5]

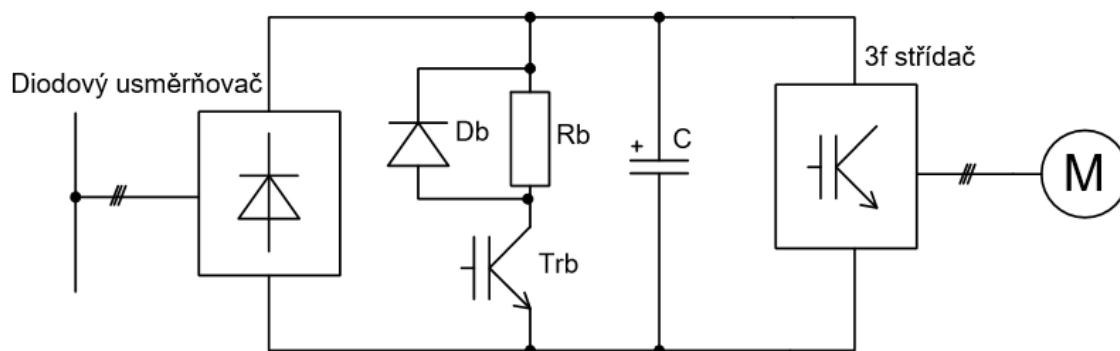


Obr. 3.2 Napájení proudového střídače z AC zdroje

Schéma převzato z [5]

### 3.2.2 Napájení napěťových střídačů

Napěťový meziobvod lze realizovat pomocí diodového usměrňovače a kondenzátoru C. Toto řešení je nejjednodušší. Další možností je použití řízených usměrňovačů.



Obr. 3.3 Napájení diodového střídače z AC zdroje

Při použití diodového usměrňovače není možná rekuperace. Je nutné použít pulzně spínaný brzdový odpor, kde se bude mařit brzdná energie, aby se kondenzátor nenabyl na příliš vysoké napětí. Usměrňovač a pulzně spínaný brzdový odpor můžeme nahradit napěťovým pulzním usměrňovačem. Pokud použijeme toto zapojení, je možná rekuperace brzdné energie. [3]

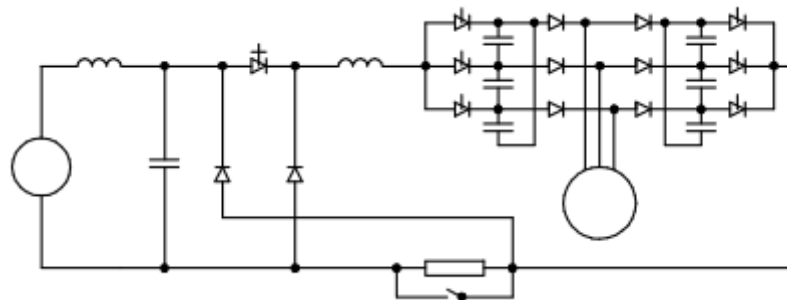


### 3.2.3 Napět'ové a proudové střídače

Záleží na charakteru stejnosměrného napájecího zdroje. Podle toho rozdělujeme střídače na proudové a napět'ové. V dnešní době se využívají hlavně napět'ové střídače. [1]

#### Proudový střídač

Proudový střídač je starší proti napět'ovému, a dnes se už téměř nepoužívá. Proudový střídač umožnil použití asynchronního motoru v trakci. Kdy byly nahrazovány stejnosměrné motory asynchronními s proudovým střídačem.

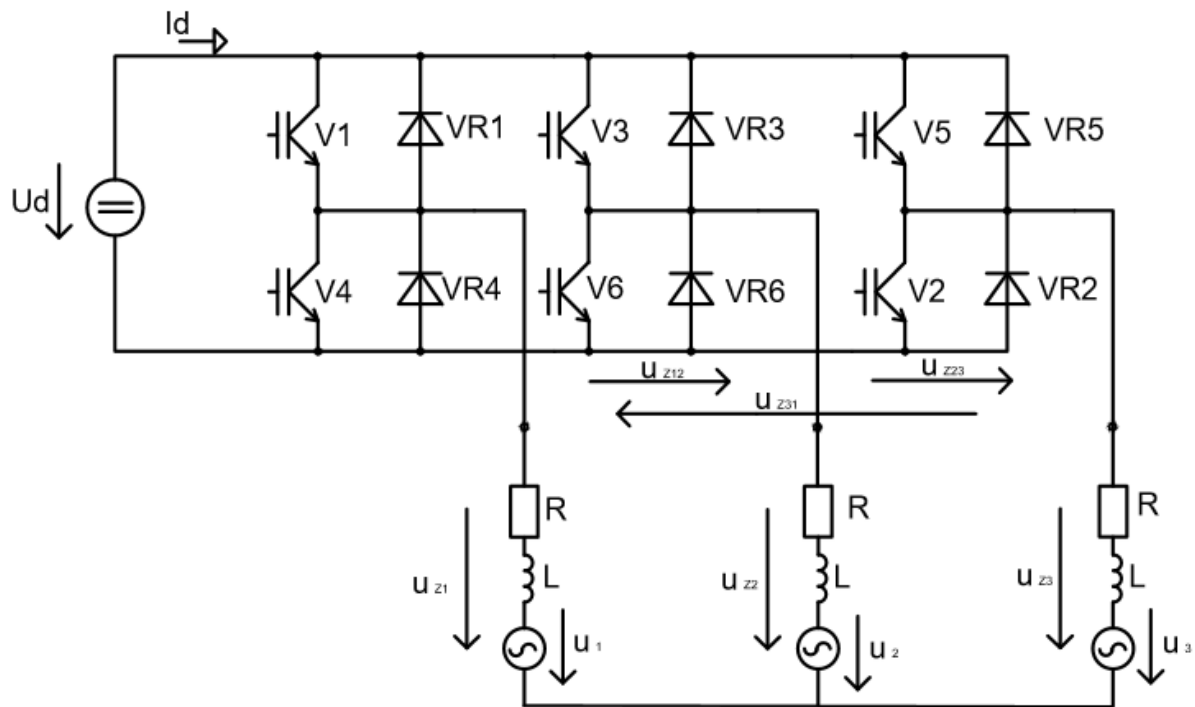


Obr. 3.4 Výkonový obvod pro asynchronní motor napájený ze stejnosměrného zdroje

Schéma převzato z [5]

Na obrázku je vidět použití proudového střídače s asynchronním motorem. Toto zapojení nám umožňuje odporové brzdění, nebo také možnost rekuperace. [5]

## Napět'ový střídač



Obr. 3.5 3f napět'ový střídač

V1 až V6 jsou vypínatelné součástky (IGBT tranzistory)

VR1 až VR6 jsou zpětné diody

Jako zdroj používáme stejnosměrný zdroj napětí  $U_d$ , ten je připojen na stejnosměrnou stranu střídače. Pokud budeme mít střední hodnotu stejnosměrného proudu  $I_d$ . Výkon  $P$  odebíraný zdrojem  $U_d$  a dodaný do zátěže je [1]

$$P = U_d * I_d \quad (3.2.3.1)$$

"Protože  $U_d$  je neproměnné, mění se s smyslem přenosu středního výkonu též smysl proudu"[1]

$P > 0$  potom  $I_d > 0$  a jedná se o střídačový chod

$P < 0$  potom  $I_d < 0$  a jedná se o usměrňovačový chod

Okamžitou hodnotu výkonu  $P$  dostaneme pomocí

$$p = U_d * i_d = \sum_{n=1}^m p_n \quad (3.2.3.2)$$

Okamžitá hodnota proudu ve stejnosměrném obvodu je  $i_d$  a  $p_n$  je okamžitá hodnota odebíraného výkonu  $n$ -tou fází  $m$ -fázové zátěže.

Je nutné aby stejnosměrná strana střídače umožnila průchod proudu v obou směrech. Průchod proudu  $i_d > 0$  je realizováno pomocí vypínatelných součástek V1 až V6. Průchod proudu  $i_d < 0$  je realizováno pomocí zpětných diod VR1 až VR6. Zapojení diod a vypínatelných součástek je antiparalelní. Zpětné diody nám umožňují usměrňovačový chod, a tím umožňují odběr jalového výkonu zátěží. [1]

Řízení výstupního napětí a kmitočtu je nutné pro použití v trakci.

Způsoby řízení napětí

-obdelníkové amplitudové

-obdelníkové šířkové

-šířkové pulzní

-šířkové pulzní modulované

-řízení v kaskádě [1]

V současnosti se využívá nejvíce šířkové pulzně modulované řízení. Můžeme se také setkat s šířkově pulzním řízením. Obdelníkové řízení se používá pro svoji jednoduchost i v současnosti. Pro dosažení maximální hodnoty napětí při šířkově pulzně modulovaném řízení se zpravidla přechází na obdelníkové řízení s maximální šířkou obdelníkové půl vlny. [1]

### Obdelníkové řízení

Napětí na vývodech střídače 1, 2, 3 lze určit pomocí sepnutých součástek. Jedná se o napětí k pomyslnému nulovému bodu stejnosměrného zdroje, tyto napětí jsou označovány jako  $u_{10}$ ,  $u_{20}$ ,  $u_{30}$  tzv. fázová napětí střídače, tyto napětí nejsou shodná s fázovými napětími zátěže. [1]

Tab. č. 1: Závislost fázových napětí střídače

Sepnuto	Fázová napětí
V1 nebo VR1	$u_{10} = U_d/2$
V4 nebo VR4	$u_{10} = -U_d/2$
V3 nebo VR3	$u_{20} = U_d/2$
V6 nebo VR6	$u_{20} = -U_d/2$
V5 nebo VR5	$u_{30} = U_d/2$
V2 nebo VR6	$u_{30} = -U_d/2$

pro sdružená napětí platí

$$u_{z12} = u_{10} - u_{20} \quad (3.2.3.3)$$

$$u_{z23} = u_{20} - u_{30} \quad (3.2.3.4)$$

$$u_{z31} = u_{30} - u_{10} \quad (3.2.3.5)$$

Zátěž může být zapojena do trojúhelníku D nebo do hvězdy Y. Pro zapojení D jsou sdružená napětí střídače a fázová napětí zátěže shodná. Pokud je zátěž zapojena do Y platí:

$$u_{z12} = u_{z1} - u_{z2} \quad (3.2.3.6)$$

$$u_{z23} = u_{z2} - u_{z3} \quad (3.2.3.7)$$

$$u_{z31} = u_{z3} - u_{z1} \quad (3.2.3.8)$$

Z těchto sdružených napětí nelze určit fázová napětí zátěže. Můžeme však použít rovnici:

$$u_{z1} + u_{z2} + u_{z3} = 0 \quad (3.2.3.9)$$

Tato rovnice platí pouze pro symetrickou zátěž. Z předchozích rovnic můžeme určit fázové napětí zátěže:

$$u_{z1} = \frac{1}{3} * (u_{z12} - u_{z31}) \quad (3.2.3.10)$$

$$u_{z2} = \frac{1}{3} * (u_{z23} - u_{z12}) \quad (3.2.3.11)$$

$$u_{z3} = \frac{1}{3} * (u_{z31} - u_{z23}) \quad (3.2.3.12)$$

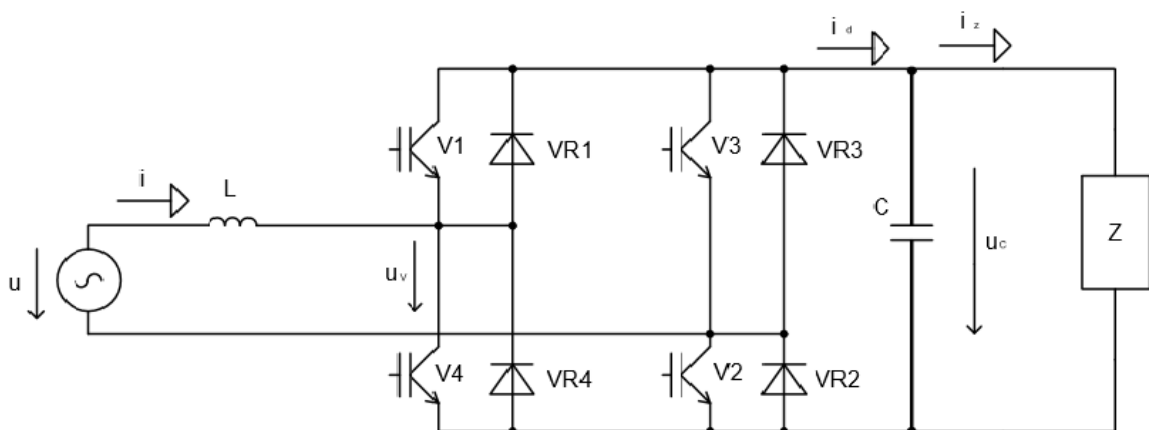
Tyto závislosti jsou platné nejen pro obdelníkové řízení. Úhel sepnutí  $\psi$ . Tento úhel vyjadřuje interval sepnutí vypínatelných součástek, tedy interval po jaký je na součástku vyslán zapínací impuls. Velikost  $\psi$  musí být stejná pro všechny součástky. Velikost  $\psi$  se může měnit. Střídač můžeme rozdělit na dvě části, a to katodovou část (V1, V3, V5) a anodovou část (V2, V4, V6). Aby se obvodem střídače uzavíral proud, musí být sepnuta alespoň jedna součástka z anodové a katodové části. Proto  $\psi$  musí být větší jak  $\pi/3$ . Pokud by byl úhel sepnutí  $\psi > \pi$  došlo by ke zkratu zdroje. To z důvodu překrývání  $\psi$  součástek jedné fáze. Aby ke zkratu stejnosměrného zdroje nedošlo, musí být mezi sepnutím součástek V1 a V4, V3 a V6, V5 a V2 vložen tzv. mrtvý čas. Mrtvý čas je časový interval, ten je vložen mezi vypnutí jedné součástky a zapnutí druhé součástky. Z toho nám vyplývá rozsah  $\psi$ , a to  $\pi/3 < \psi < \pi$ . [1]

## PWM řízení

Princip tohoto řízení je založen na porovnávání vysokofrekvenčního nosného signálu (pila) s nízkofrekvenčním modulačním signálem (řídící). Pokud je řídící signál větší než nosný je sepnut V1 nebo vede dioda VR1 a  $u_{10} = U_d/2$ . Pro obrácený případ je sepnut V4 nebo vede dioda VR4 a  $u_{10} = -U_d/2$ . Zbylé vývody střídače se chovají obdobně. Řídící napětí je fázově posunuto o  $120^\circ$ . Nevýhodou tohoto řízení je, že maximální napětí na výstupu střídače je  $0,353 U_d$ . Z důvodu zvýšení napětí střídače je často používána modulace se 3. harmonickou. Řídící signály mají složku o trojnásobném kmitočtu. Tím se zvýší napětí střídače na  $0,408 U_d$  [1] [3]

## Napět'ový pulzní usměrňovač

U tohoto typu usměrňovače je stejnosměrná strana spojená s kondenzátorem C. Ten je zdrojem napětí pro zátěž. Díky této vlastnosti je možné napět'ový pulzní usměrňovač použít s napět'ovým střídačem, ze střídače můžeme dále napájet např. asynchronní motor. Při použití napět'ového pulzního usměrňovače a pulzního měniče můžeme napájet i stejnosměrný motor. [1]



Obr. 3.6 1f pulzní usměrňovač

Na schématu je zapojení 1f napět'ového pulzního usměrňovače. Zapojení tohoto typu usměrňovače je téměř shodné se zapojením 1f napět'ového střídače. Při činnosti pulzního usměrňovače se střídají dva stavy. Vedení do zátěže a nulové vedení. Při stavu vedení do zátěže jsou sepnuty například vypínatelné součástky V1 a V2 nebo mohou vést zpětné diody VR1 a VR2. Stav nulového vedení, je sepnuta jedna vypínatelná součástka a současně vede jedna zpětná dioda například V3 a VR1. Při tomto stavu je proud  $i_d = 0$  a napájecí zdroj je zkratován. [1]

Řízení tohoto měniče může být dvouhodnotové nebo pomocí šířkově pulzní modulace (PWM). PWM pracuje na principu porovnávání pilového signálu se sinusovým řídicím signálem. Můžeme řídit úhel  $\varepsilon$  nebo poměrné zapnutí  $z$ . Na usměrněné napětí  $U_d$  je požadováno aby bylo udržováno na konstantní hodnotě pokud je na stejnosměrnou stranu pulzního usměrňovače připojen další měnič (pulzní měnič, střídač) [1]

Amplitudu 1. harmonické  $u_v$  lze určit

$$U_{vm(1)} = z * U_d \quad (3.2.3.13)$$

Pro střední hodnotu usměrněného proudu lze určit

$$I_d = \frac{z * I_{(1)m}}{2} * \cos \varepsilon \quad (3.2.3.14)$$

Z předpokladu rovnosti výkonů na střídavé a stejnosměrné straně lze určit

$$I_{(1)m} = \frac{2 * U_d * I_d}{U_m} \quad (3.2.3.15)$$

$z$  lze určit

$$z = \frac{U_{vm(1)}}{U_d} \quad (3.2.3.16)$$

## 4 Simulace

K vytvoření simulačního modelu měniče jsem využil Simulink a rozšiřující knihovnu Plecs.

### Matlab

Matlab vytvořila společnost Mathworks. Matlab je programové prostředí, které má vlastní programovací jazyk. Zabývá se vědeckotechnickými výpočty, modelováním a simulacemi. Zvládá také pracovat s maticemi, vykreslování 2D a 3D funkcí a umožňuje i vytváření aplikací. Další částí matlabu jsou knihovny funkcí nebo také toolboxy, pomocí těchto knihoven můžeme rozšířit funkce matlabu. [8]

### Simulink

Simulink je grafické programovací prostředí pro modelování, simulaci a analýzu systémů. Využívá matlab a jeho funkce. Model se tvoří ve vlastním modelovacím prostředí, a to pomocí bloků. Tyto bloky jsou součástí různých knihoven simulinku. Knihovny můžeme dále rozšiřovat.[8]

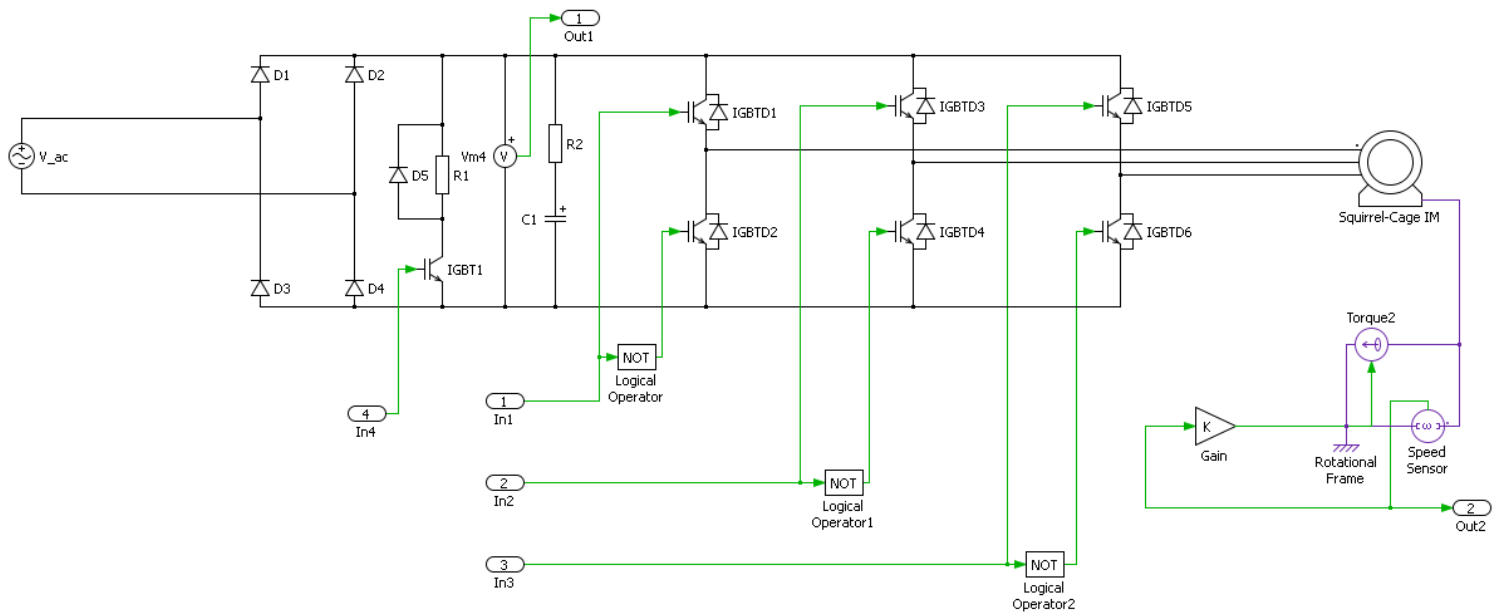
### Plecs

Plecs vyvinutý společností Plexim. Plecs je nástroj (knihovna) pro simulaci v prostředí simulink. Umožňuje simulace elektrických obvodů pro výkonovou elektroniku, a také pro elektrické sítě. [9]



## 4.1 Výkonová část

Pro svůj model trakčního měniče jsem si vybral spojení 1f diodového usměrňovače, 3f napěťového střídače a pulzního měniče odporu. Pomocí tohoto výkonového obvodu napájím asynchronní motor.



Obr. 4.1 Výkonový obvod

Tab. č. 2: Parametry výkonového obvodu

Napětí zdroje	3780 V
Frekvence zdroje	50 Hz
Kapacita kondenzátoru	18 mF
Parazitní odpor kondenzátoru	0,02 $\Omega$

Tab. č. 3: Parametry asynchronního motoru

Jmenovitý výkon	1,1 MW
Frekvence	100 Hz
Jmenovité napětí	1870 V
Počet pól párů	2
Maximální otáčky	4000 ot/min
Moment	3600 Nm

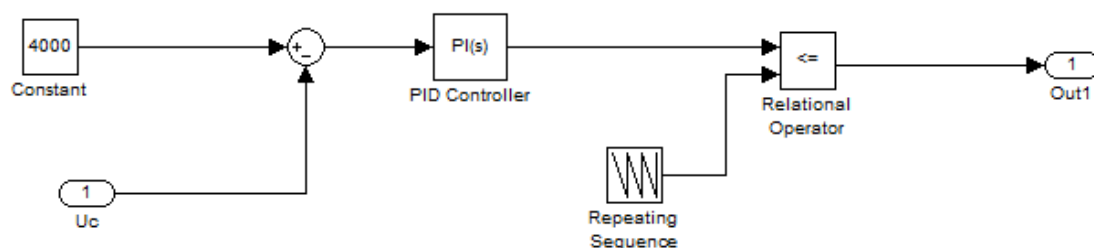
## 4.2 Řízení

Pro asynchronní motor jsem použil skalární řízení s čidlem otáček. U tohoto typu řízení můžeme zadávat rotorový kmitočet  $f_r$  ( $f_r = f_s - f_m$ ). V ustáleném stavu je rotorový kmitočet úměrný momentu stroje. [12]

Pro Asynchronní motor se snažíme zajistit aby pracoval s konstantním magnetickým tokem, a tím bude motor pracovat s maximálním momentem. Toho dosáhneme tím, že zajistíme konstantní poměr napájecího napětí a kmitočtu. To lze docílit pomocí napěťového střídače. Pro řízení napěťového střídače jsem zvolil pulzně šířkovou modulaci PWM.

Pulzně spínaný brzdňý odpor jsem použil aby mohl být pohon používán v brzděném režimu. Při brzdění se motor pomocí řízení převede do generátorického režimu. Střídač je v usměrňáčovém chodu, obrací se smysl proudu kondenzátorem, a ten se nabíjí. Použitý typ usměrňovače neumožňuje rekuperaci této energie zpět do sítě. Tato energie se maří na odporu aby nedošlo ke zničení kondenzátoru.

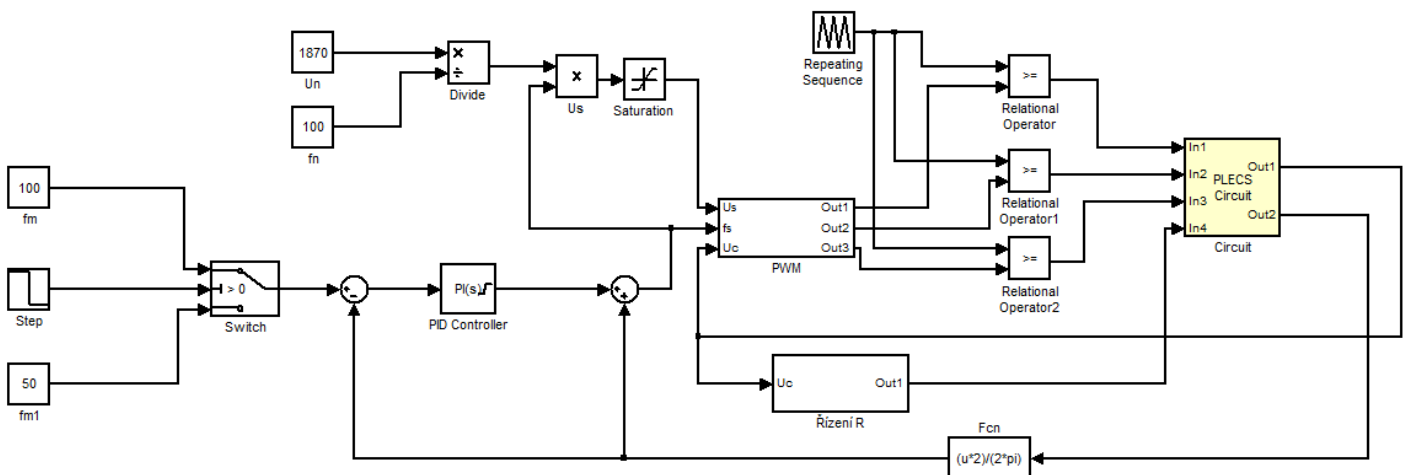
Pro tento měnič jsem zvolil řízení s konstantním kmitočtem spínání. Tento typ řízení pracuje se změnou  $z$  ( $z = T_1/T$ ) s konstantním kmitočtem  $f = 1/T$ . Blok řízení se skládá z pilového signálu, který se porovnává s řídicím napětím to odpovídá hodnotě napětí při které dochází ke spínání odporu.



Obr. 4.2 Blok řízení odporu

## Skalární řízení s čidlem otáček

Vstupní veličina je frekvence  $f_m$ , ta odpovídá požadované frekvenci, od té odečteme reálnou frekvenci, kterou získáme převodem úhlové rychlosti získané z čidla otáček. Dostáváme regulační odchylku pro PI regulátor. Výstup PI regulátoru odpovídá rotorové frekvenci  $f_r$ , ta je omezena na 2,4 Hz. Rotorová frekvence se při napájení asynchronního motoru ze zdroje napětí omezuje na hodnotu nižší než je kritická hodnota. Kritická rotorová frekvence pro použitý motor je 2,85 Hz. Při vyšší rotorové frekvenci roste proud a klesá moment. Součtem rotorové a reálné frekvence získáme hodnotu frekvence řídicího napětí  $f_s$ . Z požadavku konstantního poměru frekvence a napětí dopočítáme velikost amplitudy řídicího napětí  $U_s$ . Amplitudu řídicího napětí násobíme hodnotou  $1 / (U_c/2)$ . Dostaneme vhodnou velikost amplitudy řídicího napětí  $U_{rm}$ .



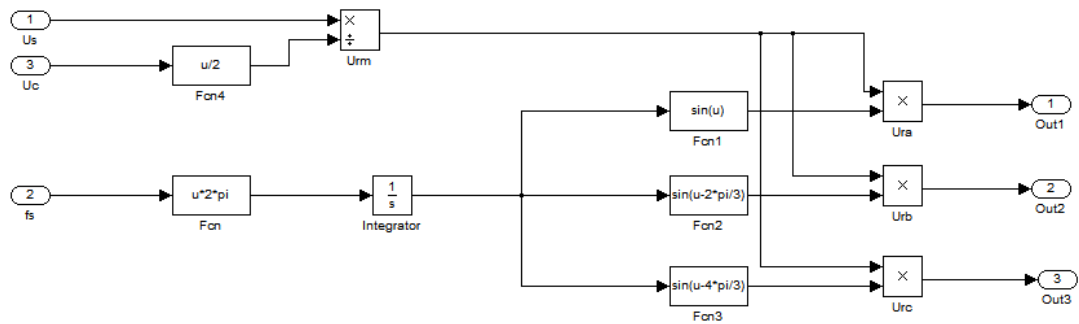
Obr. 4.3 Blokové schéma řízení

Řídicí signály pro PWM

$$U_{ra} = U_{rm} * \sin \varepsilon \quad (4.2.1)$$

$$U_{rb} = U_{rm} * \sin \left( \varepsilon - 2 * \frac{\pi}{3} \right) \quad (4.2.2)$$

$$U_{rc} = U_{rm} * \sin \left( \varepsilon - 4 * \frac{\pi}{3} \right) \quad (4.2.3)$$

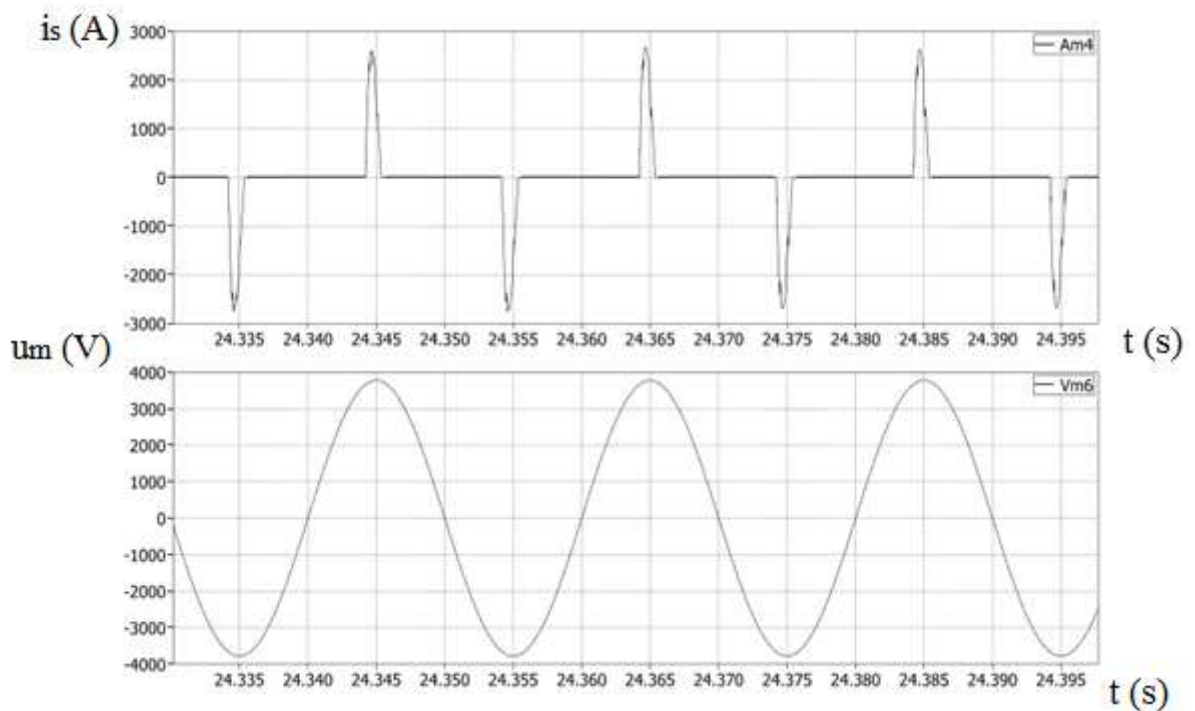


Obr. 4.4 Řídící signály

Tyto řídicí signály se porovnávají se souměrným pilovým signálem. Podle výsledků se spínají jednotlivé tranzistory střídače. Například pokud je signál  $U_{ra} >$  pilový signál je sepnut Tr 1 v opačném případě je sepnut Tr 2.

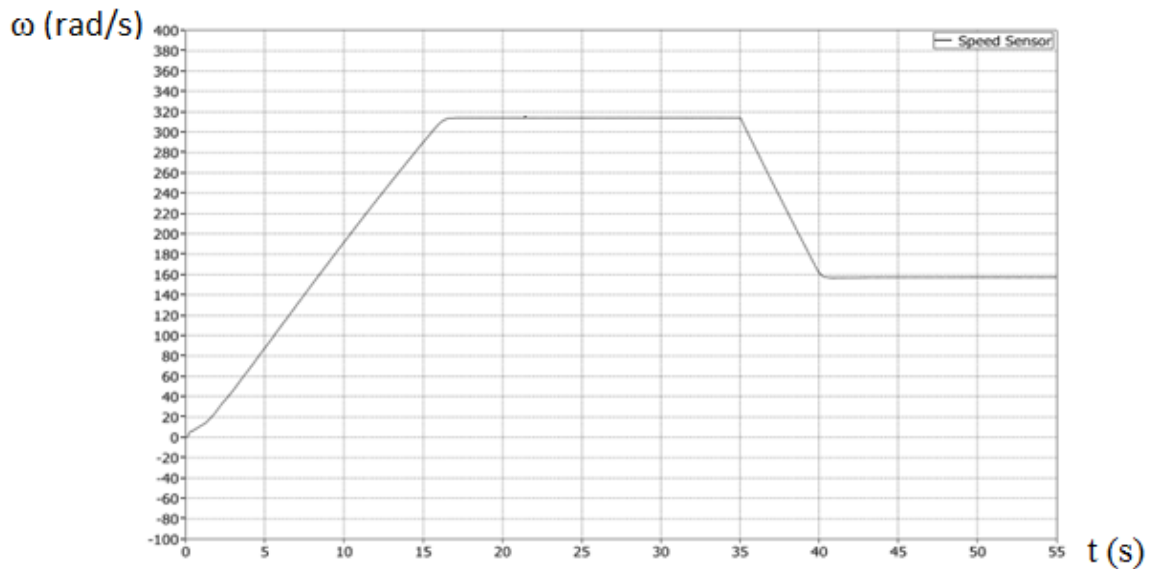
### 4.3 Výsledky simulace

V této části jsem simuloval použití vybraných měničů v trakci. Pro tento případ jsem použil měniče, které jsou popsány v minulé části, i s příslušným řízením. Parametry asynchronního motoru jsou také uvedeny v předchozí části.



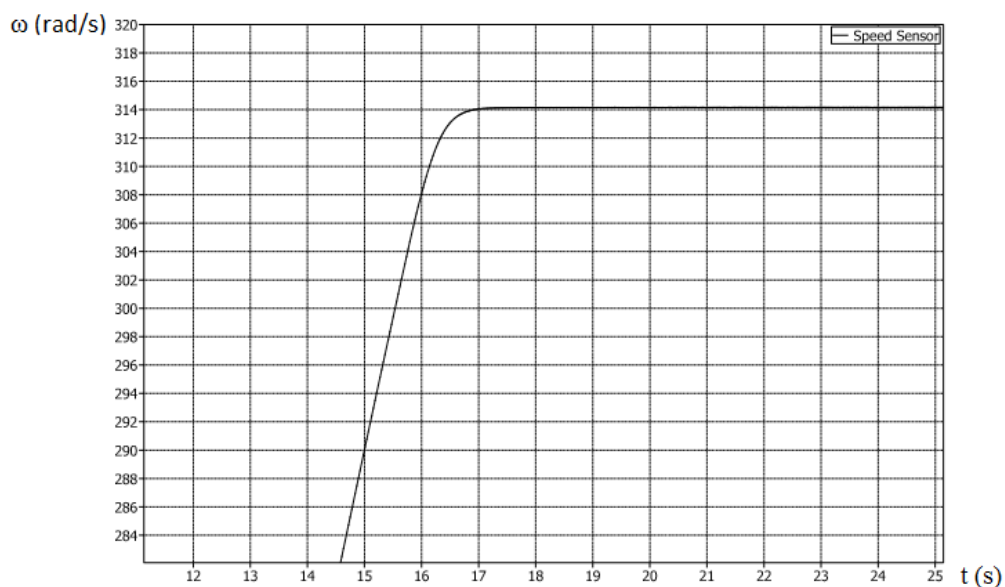
Obr. 4.5 Proud odebíraný ze sítě a napětí sítě

V horní části je průběh odebíraného proudu ze sítě . Průběh napětí sítě je ve spodní části.  
Použití neřízeného můstkového usměrňovače nám způsobuje vznik přerušovaného proudu.

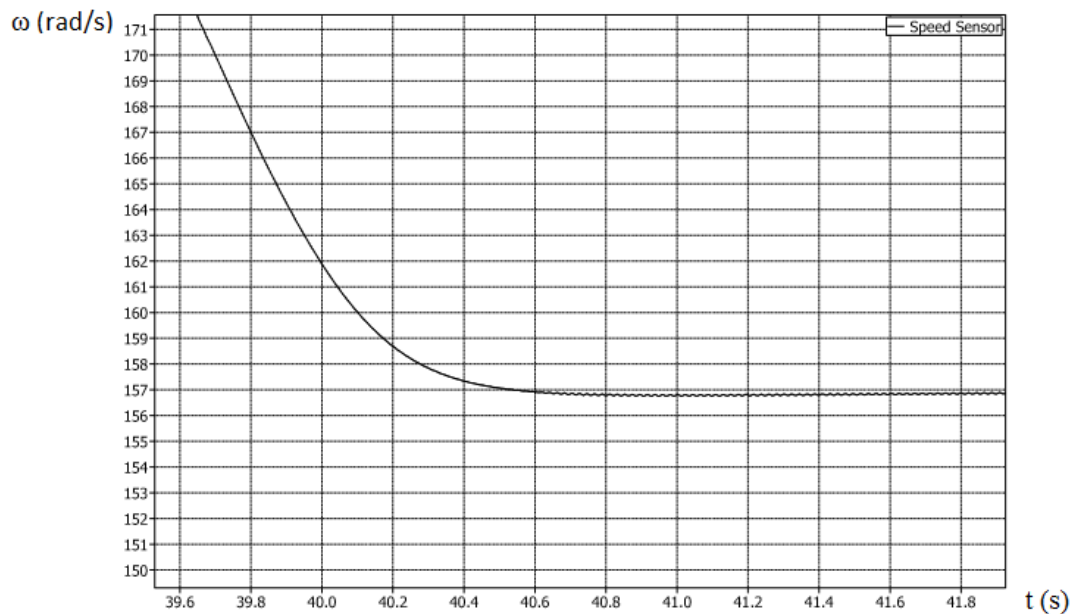


Obr. 4.6 Průběh úhlové rychlosti rotoru

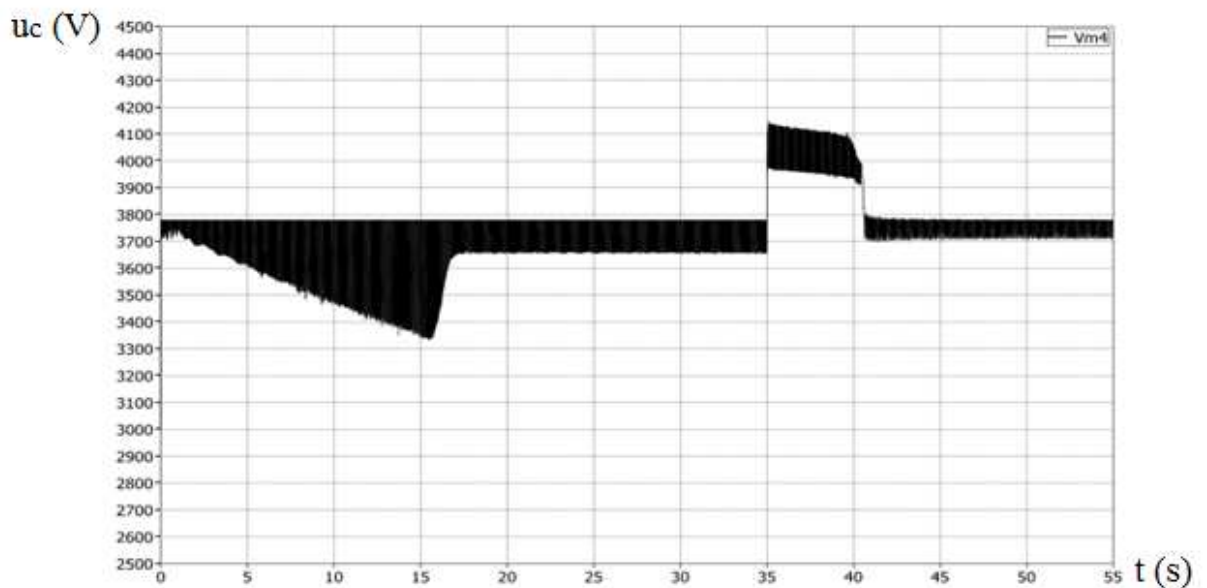
Na Obr. 4.6 můžeme vidět průběh úhlové rychlosti rotoru. V časovém intervalu od  $t = 0$  až  $t = 17$  s se plynule zvyšuje úhlová rychlost rotoru. V čase  $t = 17$  s dosáhne maximální rychlosti. V čase  $t = 35$  s je požadavek na snížení úhlové rychlosti na polovinu. Od této doby je rychlost plynule snižována. Zpomalování je dosaženo použitím generátorické brzdy. V čase  $t = 40$  s se průběh rychlosti ustálí na požadované hodnotě, ta odpovídá poloviční úhlové rychlosti  $\omega$ .



Obr. 4.7 Průběh úhlové rychlosti rotoru přechod z rozběhu na maximální rychlost

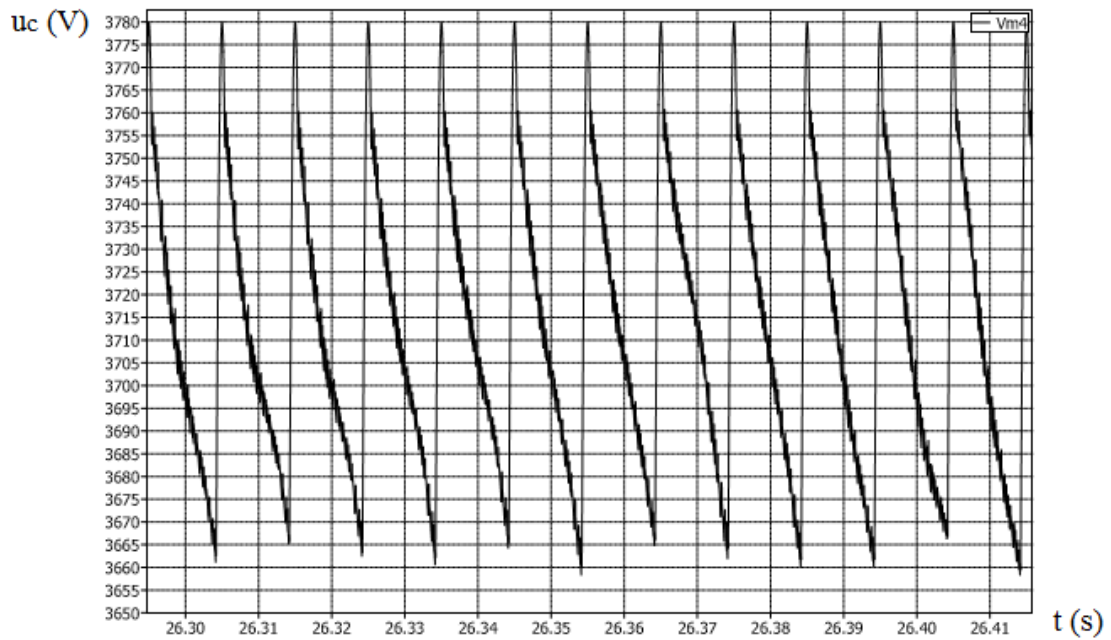


Obr. 4.8 Průběh úhlové rychlosti rotoru přechod z brzdění na poloviční rychlost

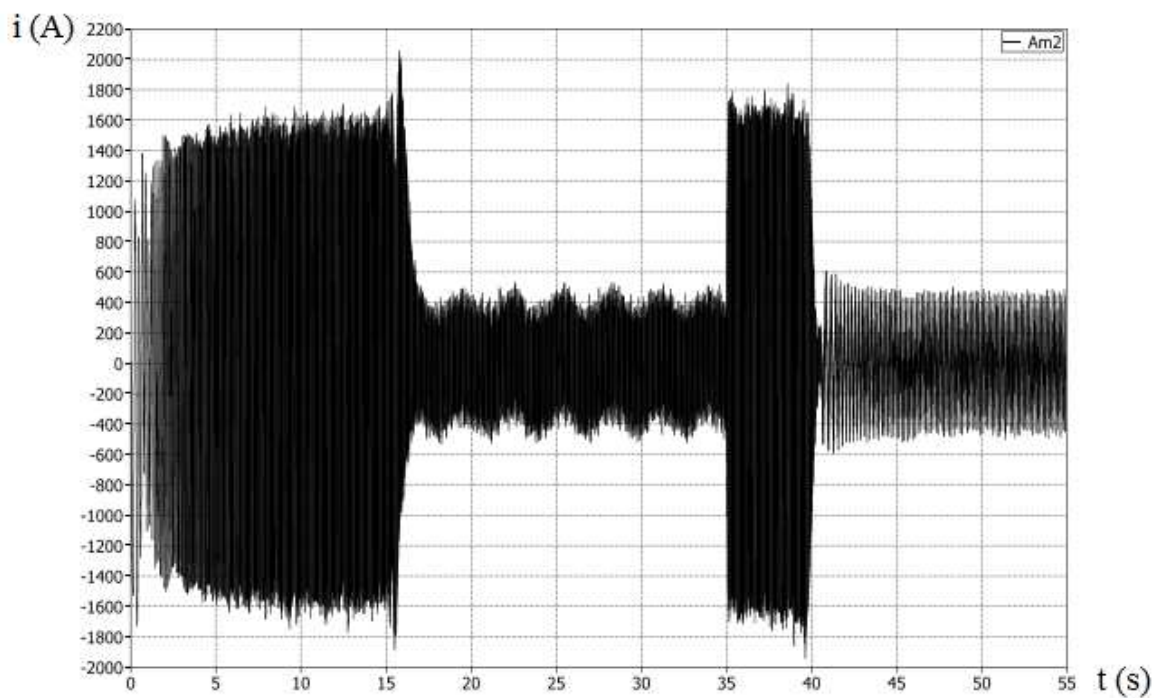


Obr. 4.9 Napětí stejnosměrného meziobvodu

Na Obr. 4.9 je průběh napětí na stejnosměrném meziobvodu (kondenzátoru). Na průběhu můžeme vidět že se nám zvětšuje zvlnění napětí v časovém intervalu, který odpovídá rozběhu motoru. To je způsobeno zátěží, která se zvyšuje s rostoucí rychlostí. V ustáleném stavu se zvlnění ustálí na hodnotě 3,2%  $U_c$ . V čase  $t = 35$  s se napětí zvýší, a to z důvodu, že se z motoru stává generátor. V tomto intervalu se začíná mařit tato energie na odporu  $R$  a napětí se zvýší o 10%  $U_c$  a ustálí se. Od doby  $t = 40$  s je zvlnění napětí 2%  $U_c$ .

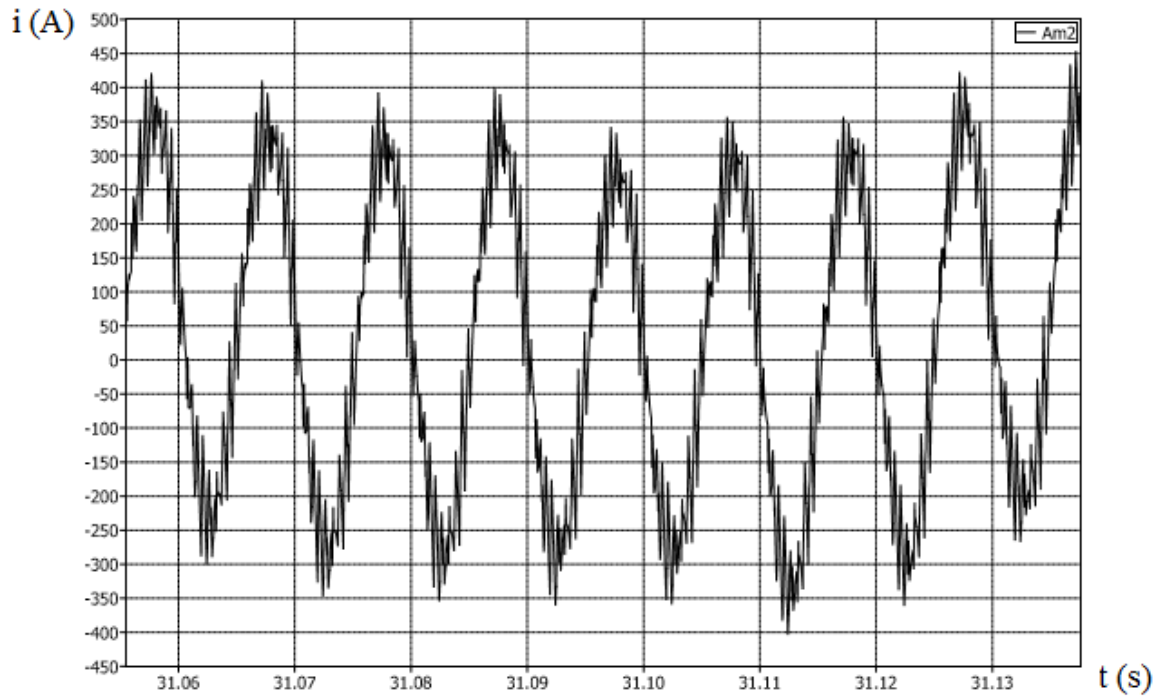


Obr. 4.10 Napětí stejnosměrného meziobvodu v ustáleném stavu

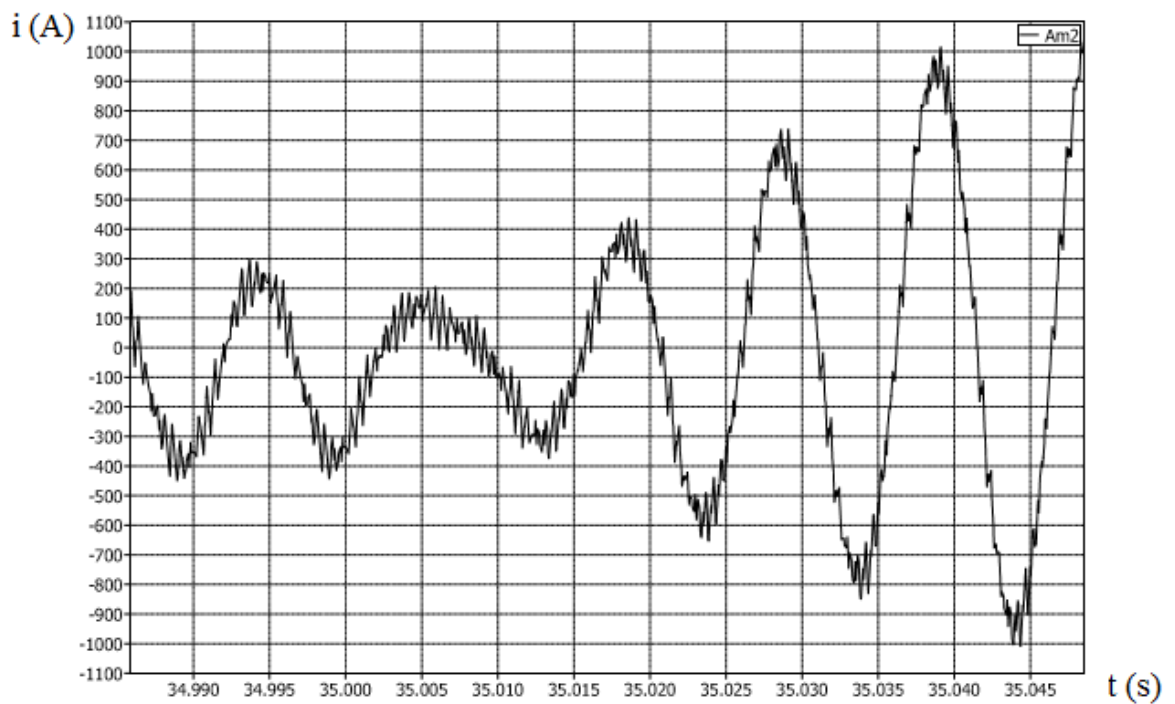


Obr. 4.11 Fázový proud zátěže

Na Obr. 4.11 můžeme vidět průběh proudu jedné fáze zátěže střídače. Při rozběhu je proud několikanásobně větší než jmenovitý proud motoru. Proto musí být trakční motor konstruován na krátkodobé přetížení. Při dosažení maximální rychlosti v čase  $t = 17$  s je odebrán jmenovitý proud 400 A. V čase  $t = 40$  s se hodnota proudu ustálí.



Obr. 4.12 Fázový proud zátěže ustálený stav při maximální rychlosti



Obr. 4.13 Fázový proud zátěže přechod z motorického režimu na generátorický

V čase  $t = 35$  s dochází ke generátorickému brzdění. Na Obr. 4.13 můžeme vidět změnu smyslu proudu.



## 5 Závěr

V rešeršní části jsem se zabýval měniči, které se používají v současných pohonech. Nejprve jsem krátce zmínil trakční soustavy, které se dnes provozují. V práci jsem se zaměřil zvláště na stejnosměrné a střídavé motory. Pro každý z těchto dvou typů motorů jsem uvedl používané měniče v závislosti na typu sítě, ze které jsou napájeny. U každého z měničů jsem uvedl princip činnosti.

V praktické části jsem provedl simulaci použití vybraných měničů v trakci. Trakční motor jsem zvolil asynchronní motor s kotvou na krátko. Abych simuloval použití v trakci zátěž je závislá na otáčkách, aby se simuloval i odpor prostředí při zvyšování nebo snižování rychlosti. Pro řízení tohoto typu motoru jsem zvolil 3f napěťový střídač ve spojení s kondenzátorem, ten slouží jako stejnosměrný meziobvod a 1f můstkový diodový usměrňovač. Napěťový střídač jsem zvolil z důvodu častého použití v praxi, 1f můstkový diodový usměrňovač pro nižší cenu a jednoduchost. Díky použití tohoto typu usměrňovače jsem musel použít pulzně spínaný brzdový odpor z důvodu neschopnosti rekuperace energie do sítě. Na tomto odporu se maří brzděné energie. Jako řízení jsem zvolil skalární řízení s čidlem otáček. Střídač je řízen pulzně šířkovou modulací PWM. Z výsledků simulace můžeme vidět, že během rozjezdu na maximální rychlost roste zvlnění napětí na kondenzátoru. To je způsobeno střídavým dodáváním a odčerpáváním energie. Velikost kondenzátoru jsem zvolil, tak aby maximální zvlnění nepřekročilo 10%  $U_c$ . Zvlnění by mělo být co nejmenší aby bylo co nejmenší zvlnění momentu motoru. Po dosažení jmenovitých otáček motoru je zvlnění 3,2%  $U_c$ . V čase  $t = 35$  s je požadavek na snížení rychlosti. K zpomalení dochází pomocí generátorické brzdy. To znamená záporný skluz, motor se chová jako generátor. Dochází ke změně směru proudu a střídač pracuje jako usměrňovač, kondenzátor se v této době nabíjí. Z tohoto důvodu je použit brzdový odpor, na kterém se brzdí energie maří. Regulátor řízení brzděného odporu jsem nastavil, tak aby se napětí stejnosměrného meziobvodu v době brzdění zvýšilo maximálně o 10%  $U_c$ . Po dosažení požadované rychlosti je výkon odebrán ze stejnosměrné strany a napětí na kondenzátoru se ustálí na požadované hodnotě se zvlněním 2%  $U_c$ .

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-485-9.
- [2] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce III*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-771-1.
- [3] ZEMAN, K. *Elektrické pohony přednášky*. Plzeň: Západočeská Univerzita, 2016.
- [4] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce I*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-633-9.
- [5] DANZER, Jiří a Jiří ŠAŠEK. *Elektrická trakce IV*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2007. ISBN 978-80-7043-586-1.
- [6] VOŽENÍLEK, Ladislav. *Kurs elektrotechniky*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1988. 367 s.
- [7] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-695-9.
- [8] PISKAČ, Luděk. *Elektrické pohony: principy a funkce*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7082-970-2.
- [9] Matlab. *Wikipedia* [online]. [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/MATLAB>
- [10] Plecs. *Wikipedia* [online]. [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/PLECS>
- [11] NOVÁK, Jaroslav. Regulace synchronního motoru pro lehkou kolejovou trakci. *ELEKTRO časopis pro elektrotechniku* [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/regulace-synchronniho-motoru-pro-lehkou-kolejovou-trakci--11963>
- [12] ZEMAN, Karel, Zdeněk PEROUTKA a Martin JANDA. *Automatická regulace pohonů s asynchronními motory*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 9788070433508.