

UNIVERZITA PARDUBICE  
Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh a realizace laboratorního přípravku  
s frekvenčním měničem Siemens Micromaster  
Ondřej Vlček

Bakalářská práce

2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej Vlček**  
Osobní číslo: **D14266**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**  
Název tématu: **Návrh a realizace laboratorního přípravku s frekvenčním měničem Siemens Micromaster**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

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

1. Seznamte se s frekvenčním měničem Siemens Micromaster 440
2. Navrhněte mechanické a elektrické provedení laboratorního přípravku s tímto frekvenčním měničem
3. Ve spolupráci s dílnami TSL navržený přípravek zrealizujte
4. Vyrobený přípravek oživte, měnič nastavte pro zvolený asynchronní motor z laboratoří KEEZ

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**Firemní literatura fy. Siemens**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Petr Sýkora**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací  
techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce:

**21. prosince 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**2. června 2017**

L.S.

doc. Ing. Libor Svadlenka, Ph.D.  
děkan

Ing. Dušan Čermák, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 8. března 2017

## **Prohlášení autora**

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato bakalářská práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 17. 5. 2017

Ondřej Vlček

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Petru Sýkorovi, za jeho čas, rady a názory vždy, když jsem potřeboval, za poskytnutí materiálu, nezbytného pro praktickou realizaci a za pomoc během měření na vyrobeném přípravku. Děkuji Výukovému a výzkumnému centru v dopravě, za svaření konstrukce a prostory pro měření na hotovém přípravku. Dále děkuji celé rodině za podporu během studia, protože byla nezbytná pro jeho průběh.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací přípravku pro laboratorní měření. Základem přípravku je frekvenční měnič SIEMENS Micromaster 440 a asynchronní motor. Práce je rozdělaná do šesti kapitol. Začíná krátkým teoretickým rozborem asynchronních motorů. Druhá kapitola je věnovává frekvenčním měničům, za kterou následují možné režimy řízení asynchronních motorů s frekvenčním měničem. Zbytek práce je věnován přímo zapojenému frekvenčnímu měniči, návrhu přípravku po mechanické a elektrické stránce a měření, při kterém je přípravek vyzkoušen.

## **Klíčová slova**

frekvenční měnič, asynchronní motor, frekvenční řízení, základní nastavení měniče

## **Title**

Design and realization of laboratory device with frequency inverter SIEMENS Micromaster

## **Annotation**

This bachelor thesis deals with the proposal and realization of a device for laboratory measurements. The basis of the device is the frequency inverter SIEMENS Micromaster 440 and an asynchronous motor. The thesis is divided into six chapters. It begins with a brief theoretical analysis of asynchronous motors. The second chapter deals with frequency inverters, followed by possible modes of a frequency converter by controlling asynchronous motors with a frequency converter. The rest of the bachelor thesis is dedicated to the directly connected frequency converter, the mechanical and electrical design of the device, and the measurement in which the device is tested.

## **Keywords**

Frequency inverter, asynchronous motor, frequency control, basic inverter setting

## Obsah

Úvod.....	10
1 Asynchronní motory .....	11
1.1 Základní vlastnosti .....	11
1.1.1 Princip funkce a konstrukce asynchronních motorů .....	11
1.1.2 Náhradní schéma .....	13
1.1.3 Mechanické vlastnosti .....	14
1.2 Rozběh pohonů s asynchronními motory.....	15
1.2.1 Frekvenční rozběh .....	15
1.2.2 Další možnosti rozběhu .....	16
1.3 Brzdění pohonů s asynchronními motory .....	16
1.4 Řízení rychlosti u asynchronních motorů .....	17
1.4.1 Změna počtu pól párů.....	17
1.4.2 Frekvenční řízení .....	17
1.4.3 Další možnosti řízení.....	18
2 Frekvenční měniče.....	19
2.1 Čtyři kvadranty řízení .....	19
2.2 Dělení frekvenčních měničů .....	19
2.3 Přímý měnič frekvence .....	19
2.4 Princip a konstrukce nepřímého měniče frekvence .....	20
2.4.1 Frekvenční měniče s napěťovým meziobvodem.....	20
2.4.2 Frekvenční měniče s proudovým meziobvodem.....	21
2.5 IGBT tranzistory .....	22
2.6 Usměrňovače.....	22
2.6.1 Spínané usměrňovače .....	23
2.7 Střídače.....	23
2.7.1 Napěťové střídače.....	23
2.7.2 Proudové střídače .....	24
2.8 Regulace napětí pomocí PWM.....	25
2.8.1 Další možné způsoby řízení napěťového střídače .....	26
2.9 Brzdění a rekuperace.....	27

2.9.1	Činnost brzdného spínače.....	28
2.10	Příslušenství potlačující vliv na síť .....	29
3	Způsoby řízení motoru .....	31
3.1	Skalární .....	31
3.2	Vektorové.....	33
3.2.1	Zpětná otáčková vazba .....	33
3.2.2	Snímání otáček .....	34
3.3	Přímé řízení momentu .....	34
3.4	Porovnání dynamiky .....	35
4	Měniče řady SIEMENS MICROMASTER 440.....	36
4.1	Technické parametry .....	36
4.2	Ochrana motoru a měniče .....	37
4.2.1	Teplotní snímač .....	37
4.3	Ovládání měniče.....	37
4.3.1	Krokování.....	39
4.4	Způsoby řízení motoru .....	39
4.5	Charakteristika zátěže .....	41
5	Návrh, konstrukce a nastavení přípravku .....	42
5.1	Návrh krabičky.....	42
5.2	Návrh zapojení .....	42
5.2.1	Silová část.....	42
5.2.2	Ovládací část .....	43
5.3	Fotky přípravku.....	46
5.4	Nastavení frekvenčního měniče .....	47
5.4.1	Popis některých parametrů měniče.....	47
5.4.2	Rychlé uvedení do provozu .....	49
5.4.3	Nastavení vstupů a výstupů.....	52
5.4.4	Brzdění .....	52
5.4.5	Tovární nastavení .....	53
6	Měření.....	54
6.1	Příprava pracoviště.....	54



6.2	Měření osciloskopem .....	56
6.3	Změřené hodnoty v grafech .....	57
6.3.1	$M_z = \text{konst.} = 0 \text{ Nm}$ .....	57
6.3.2	$f = \text{konst.}$ .....	60
6.3.3	$f = \text{konst.} = 25 \text{ Hz}$ .....	60
6.3.4	$f = \text{konst.} = 50 \text{ Hz}$ .....	61
6.3.5	$f = \text{konst.} = 75 \text{ Hz}$ .....	62
6.4	Závěr měření .....	63
	Závěr .....	64
	Použitá literatura .....	65
	Seznam obrázků .....	66
	Seznam tabulek .....	68
	Seznam grafů.....	69
	Seznam příloh .....	70
	Přílohy.....	71

## Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá asynchronními motory a nejpoužívanější metodou jejich řízení, a to frekvenčními měniči. Tato kombinace je tolik oblíbená z několika důvodů. Měnit frekvenci lze plynule, proto lze nastavit přesně požadované otáčky motoru. Asynchronní motor je konstrukčně jednoduchý, je indukční, proto neobsahuje mechanické prvky, jako je komutátor. Absence komutátoru zajišťuje, že indukční motory jsou menší než stejnosměrné motory se stejnými otáčkami a výkonem. Třífázová soustava nabízí velké výkony s relativně malou spotřebou mědi. Jediná část, která se při točení motoru opotřebovává, jsou ložiska, proto nepotřebuje téměř žádnou údržbu. Díky těmto vlastnostem je levný na pořízení i na údržbu.

Jejich nevýhodou je zatěžování sítě jalovou složkou, protože jejich účinník se při dobrých provozních podmínkách pohybuje okolo 0,8 a je závislý na zatížení, při odlehčování motoru se zhoršuje. Proto jej musíme kompenzovat kondenzátory. V minulosti byly problémy s regulací, ale s rozšířením polovodičů a klesáním jejich ceny byly tyto problémy odstraněny. O starších metodách regulace je zmínka pouze okrajově. Dnes jsou frekvenční měniče poměrně levné a dobře dostupné. Jejich obrovskou výhodou je jejich univerzálnost, která je dána možnostmi nastavení měniče. Při kombinaci frekvenčního měniče a asynchronního motoru získáme pohon, který lze nastavit pro velice specifické aplikace, které by jinak vyžadovaly velice drahé řešení. Rozšíření způsobilo, že se na trhu objevily měniče mnoha výrobců a cena ještě více klesla.

V bakalářské práci se výhradně věnujeme třífázovému asynchronnímu motoru s klecovou kotvou. Důvodem je zaměření hlavně na kombinaci motoru s frekvenčním měničem, kde nemá smysl kupovat dražší kroužkový motor. Hlavním cílem této práce je navrhnout a zkonstruovat přípravek s frekvenčním měničem, na který bude připojen asynchronní motor, proto je první kapitola věnována právě jím. Následují dvě kapitoly o frekvenčních měničích a řízení motorů. Tato část je teoretická, a proto je pojata obecně s širokým nadhledem, jejich cílem je seznámit čtenáře s problematikou. Zbytek práce se již věnuje měniči Micromaster, který je srdcem přípravku, jeho základními parametry, vlastnostmi a řídicími možnostmi, vlastním návrhem přípravku a měřením. V druhé polovině práce je vše podrobně popsáno.

Výsledkem práce je tedy laboratorní přípravek, na kterém bude probíhat výuka studentů v následujících letech. Při laboratorním měření si budou moci vyzkoušet ovládní a parametrizování měniče a následně změřit vstupní a výstupní veličiny. Smyslem přípravku je naučit studenty práci s frekvenčními měniči, protože v praxi se často používají a stále se používat budou, proto je důležité, aby byli s touto problematikou dobře seznámeni.

# 1 Asynchronní motory

## 1.1 Základní vlastnosti

Rychlost otáčení asynchronního motoru je dána frekvencí napájecího napětí statoru, počtem pólových párů  $p_p$  a skluzem. Synchronní otáčky  $n_s$  jsou takové, když se rotor otáčí stejnou rychlostí jako magnetické pole statoru. Tohoto stavu dosáhneme, jen v případě, že asynchronní motor budeme pohánět cizím strojem, který pokryje vlastní ztráty motoru. V tomto okamžiku bude skluz nulový. Při zatěžování motoru skluz roste, otáčky rotoru klesají.

Synchronní otáčky motoru:

$$n_s = \frac{f}{p_p} * 60 \quad (1)$$

Skluz vypočítáme:

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (2)$$

Otáčky rotoru při určitém skluzu:

$$n_m = \frac{f * (1 - s)}{P_p} * 60 \quad (3)$$

Kde  $n_s$  jsou synchronní otáčky

$p_p$  je počet pólpárů

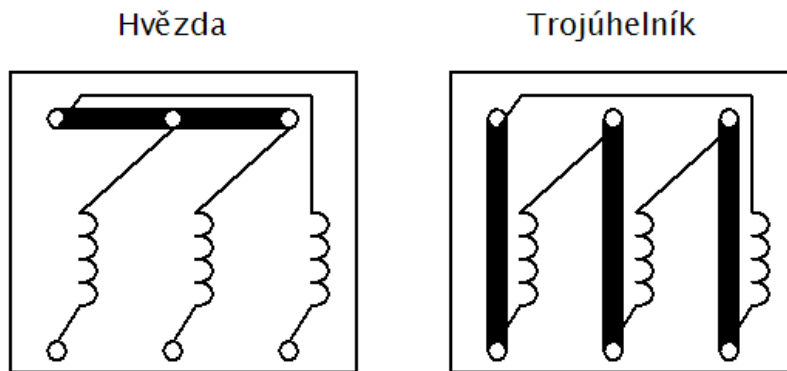
$f$  je frekvence napájecího napětí

$s$  je skluz rotoru

$n_m$  jsou mechanické otáčky rotoru

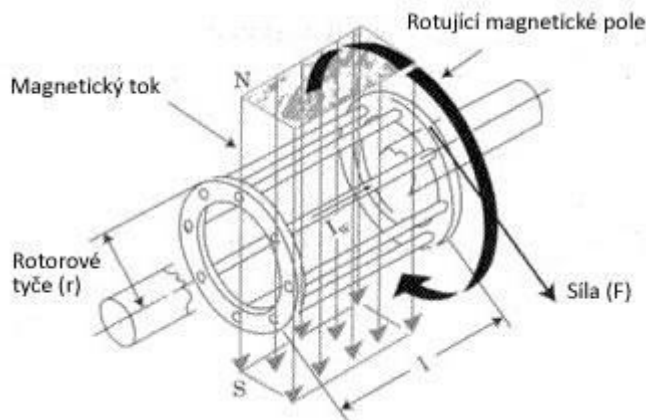
### 1.1.1 Princip funkce a konstrukce asynchronních motorů

Asynchronní motory jsou nejčastěji konstruovány jako třífázové, to znamená, že na statoru mají tři vinutí. Vinutí můžeme zapojit do hvězdy nebo trojúhelníka (Obr. 1). Při použití stykačů je možné změnit zapojení i za chodu motoru. Toho lze využít např. při rozběhu.



Obr. 1 – Zapojení svorkovnice třífázového asynchronního motoru

Vinutí statoru si můžeme představit jako tři cívky umístěné na kružnici vzájemně otočené o  $120^\circ$ . K napájení je zapotřebí tři fáze, také posunuté o  $120^\circ$ . Tímto způsobem je zajištěno točivé magnetické pole. Ve středu kružnice je umístěn rotor, který může být klecový, nebo vinutý. Vlivem elektro-magnetické indukce se v rotoru, přes vzduchovou mezeru, začne indukovat napětí. Rotor, v závislosti na konstrukci, má malý odpor, a proto v něm začne téci proud, ten vyvolá magnetické pole rotoru. Působením těchto dvou magnetických polí vznikne síla  $F$ . Zprvu rychlejší magnetické pole statoru s sebou táhne magnetické pole rotoru a rotor se začíná otáčet. Odtud označení indukční motor.



Obr. 2 – Princip asynchronního motoru [online]. [cit. 2017-04-29]

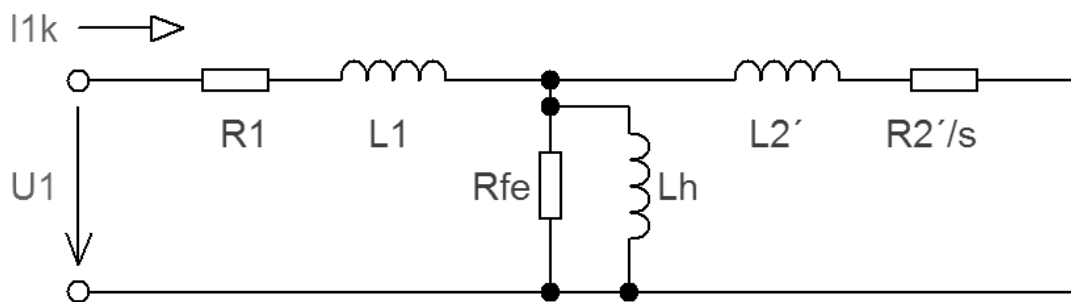
Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/shared/upload/editor/Asynchron%206.jpg>

Jednofázové asynchronní motory také existují. Jedna fáze nám vytvoří pouze magnetické pole pulzující, nikoli otáčející. „Pulzující pole  $\Phi_1$  fáze statoru můžeme podle Leblancova teoremu rozložit na dvě točivá pole, která se točí proti sobě a jejichž amplituda se rovná polovině amplitudy pulsujícího pole. Proto na statoru jednofázového asynchronního motoru najdeme dvě třífázová vinutí s protiběžnými točivými poli. Oba točivé momenty působí proti sobě a jejich rozdíl je roven výslednému momentu jednofázového motoru.“ [1, s. 168]

Pro pohony s frekvenčními měniči se jednofázové asynchronní motory nepoužívají, proto se jím dále nebudeme věnovat.

### 1.1.2 Náhradní schéma

Náhradní schéma asynchronního motoru je totožné s náhradním schématem transformátoru. Na stator motoru můžeme koukat jako na primární vinutí a na rotor jako na sekundární vinutí. Náhradní schéma je nakresleno na Obr. 3. Hodnoty jednotlivých parametrů jsou závislé na konkrétní konstrukci a výkonu motoru.



Obr. 3 – Náhradní schéma asynchronního motoru

$R_1$  je odpor vinutí statoru

$R_2'/s$  je přepočtený odpor vinutí rotoru závislý na skluzu

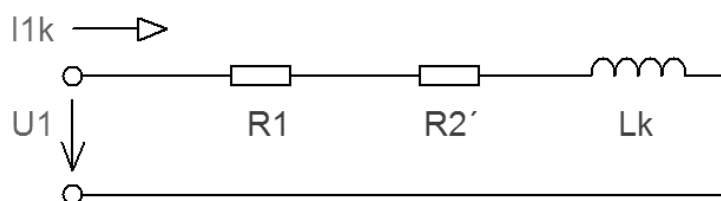
$L_1$  rozptylová indukčnost statorového vinutí

$L_2'$  přepočtená rozptylová indukčnost rotorového vinutí

$R_{fe}$  odpor reprezentující ztráty v železe

$L_h$  reaktance hlavní indukčnosti

Indukované napětí v rotoru je největší, když je rotor v klidu, protože rozdíl rychlosti rotoru a magnetického pole statoru je největší. Stojící asynchronní motor je přibližně totéž jako transformátor s nakrátko propojeným vinutím na sekundární straně. To je důvod vysokého příkonu v době, když motor stojí. Maximální indukované napětí na sekundární straně = maximální zkratový proud = maximální příkon na primární straně. Výpočet proudu ve stavu nakrátko je v rovnici (4) - může být až desetkrát větší, než proud jmenovitý.



Obr. 4 – Stav nakrátko

Výpočet proudu nakrátko:

$$I_{1K} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + X_K^2}} = (5 \text{ až } 10) I_n \quad (4)$$

Kde  $I_n$  je jmenovitý proud

$U_1$  je napětí na statorovém vinutí

$X_K$  je reaktance nakrátko

### 1.1.3 Mechanické vlastnosti

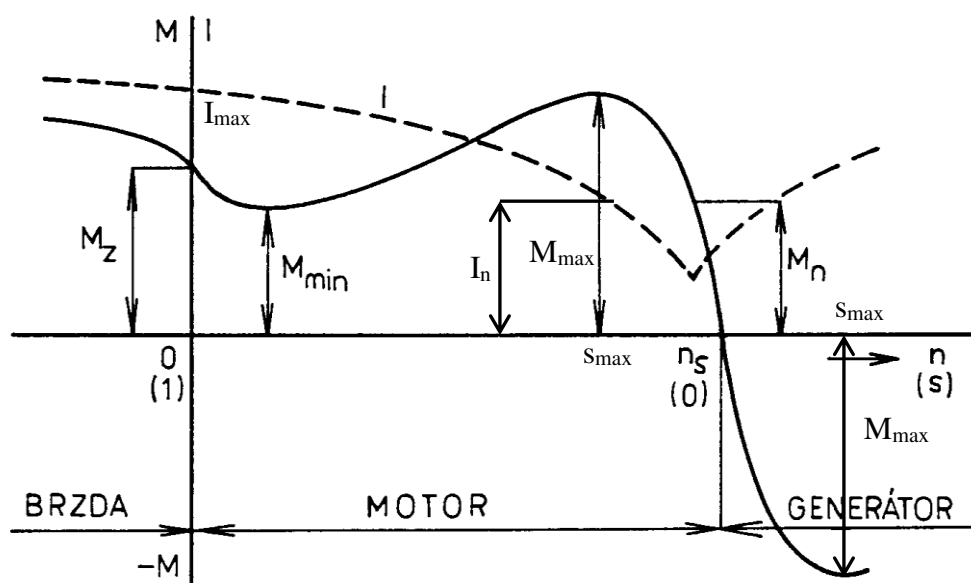
Momentová charakteristika je základní charakteristikou, zobrazuje závislost točivého momentu motoru na otáčkách případně skluzu. Je zobrazena na Obr. 5. Skluz vypočítáme dle vztahu (2), je to poměr otáček, který vyjadřuje, jak moc zaostává rychlost otáčení rotoru za rychlostí magnetického pole statoru. V motorickém režimu je skluz v rozmezí 0 až 1. Pokud je skluz záporný, motor pracuje jako generátor a pokud je větší než 1, tak pracuje v režimu brzdy.

Momentová charakteristika lze přibližně vypočítat pomocí tzv. zjednodušeného Klosova vztahu (5).

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{max}} + \frac{s_{max}}{s}} \quad (5)$$

$M_{max}$  je maximální možný moment, který můžeme z motoru dostat, při větší zátěži dojde k zastavení motoru. V tomto bodě leží maximální skluz  $s_{max}$ . Toto místo nazýváme bod zvratu. Oblast generátoru má svůj vlastní bod  $M_{max}$  při skluzu  $s_{max}$ .

$M_n$  je jmenovitý moment motoru, to je moment, při kterém může motor trvale pracovat, aniž by se přehříval, musí být ovšem splněny ostatní jmenovité hodnoty, jako je proud a otáčky. Jmenovitý moment na motorovém štítku většinou nenalezneme, pouze jmenovitý výkon. Pokud ho chceme znát, musíme ho dopočítat jako podíl výkonu a úhlové rychlosti.



Obr. 5 – Momentová charakteristika asynchronního motoru [online].  
 [cit. 2017-04-29] Dostupné z: [http://www.lhotkanet.cz/pub/skola/cvut-fel/old/14zse/Asynchroni%20motor\\_soubory/asynchr\\_soubory/Image15.gif](http://www.lhotkanet.cz/pub/skola/cvut-fel/old/14zse/Asynchroni%20motor_soubory/asynchr_soubory/Image15.gif) (upraveno autorem)

Jmenovitý moment je v jedné třetině až jedné polovině momentové charakteristiky, podle konstrukce konkrétního motoru. Umístěním tohoto bodu na momentové charakteristice je dána momentová přetížitelnost. Ta je dána vztahem:

$$p_m = \frac{M_{max}}{M_n} = 2 \text{ až } 3 \quad (6)$$

Pro moment asynchronního motoru platí:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{3U_1^2 p_p \frac{R'_2}{s}}{\omega_1 \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_K^2} \quad (7)$$

Ze vztahu (7) tedy vyplývá, že moment asynchronního motoru je úměrný kvadrátu statorového napájecího napětí  $U_1$ . Při větším napětí, než na které je motor konstruován, dojde k přesycení magnetického obvodu a k větším proudům, hrozí spálení motoru. Pokud napětí snížíme, zvedneme skluz a proud také vzroste. Opět hrozí přehřátí motoru.

## 1.2 Rozběh pohonů s asynchronními motory

### 1.2.1 Frekvenční rozběh

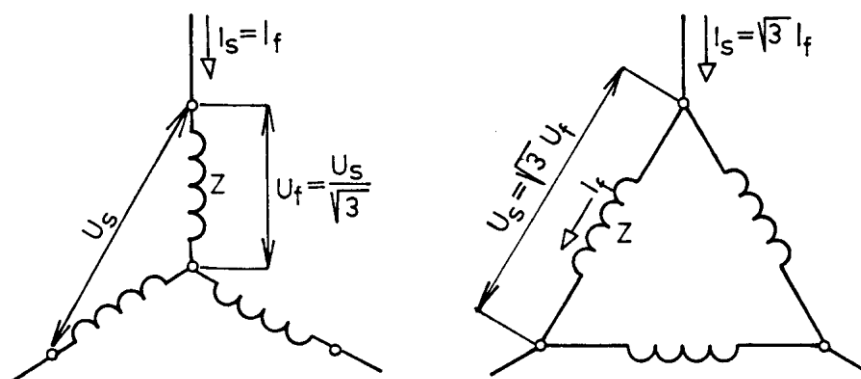
Frekvenční měnič je schopen plynule zvyšovat frekvenci napájeného napětí motoru od nuly, proto je možné motor postupně rozběhnout do jmenovitých otáček. V nízkých otáčkách

může dojít ke snížení záběrného momentu, to však lze kompenzovat. Více v kapitole věnované frekvenčnímu řízení.

### 1.2.2 Další možnosti rozběhu

Nejjednodušší možný rozběh je připojení motoru přímo na síť. V okamžiku připojení vinutím teče motorem zkratový proud. Motor je značně tepelně namáhán a může dojít vybavení jištění. Vlivem vysokého proudu dochází k poklesu svorkového napětí vlivem impedance přívodních vodičů a tím dojde i ke snížení záběrného momentu.

Pro snížení záběrného proudu lze použít přepínání vinutí do **hvězdy/trojúhelníku**. Motor se rozbíhá zapojen do hvězdy. Tím omezíme záběrný proud na třetinu, bohužel na třetinu snížíme i moment.



Obr. 6 – Napěťové a proudové poměry při spouštění asynchronního motoru [online]. [cit. 2017-04-29] Dostupné z: [http://www.lhotkanet.cz/pub/skola/cvut-fel/old/14zse/Asynchroni%20motor\\_soubory/asynchr\\_soubory/Image14.gif](http://www.lhotkanet.cz/pub/skola/cvut-fel/old/14zse/Asynchroni%20motor_soubory/asynchr_soubory/Image14.gif)

**Rozběh se sníženým napětím**, nejčastěji s použitím softstartéru. Ten obsahuje alespoň dvě dvojice antiparalelně zapojených tyristorů, které jsou spínány řídicím obvodem softstartéru. Tím snižujeme efektivní hodnotu napětí na motoru. Z Ohmova zákona je zřejmé, čím nižší napětí, tím nižší proud. Při snižování napětí snižujeme moment motoru, proto tento způsob je vhodný jen pro lehčí starty.

Další možnosti rozběhu lze použít jen pro kroužkové asynchronní motory s vinutým rotorem.

### 1.3 Brzdění pohonů s asynchronními motory

Při použití klecového rotoru a nutnosti zastavit máme čtyři možnosti. Asynchronní motor je buzen z napájecí sítě, a proto při odpojení od napájení sítě nemůže bez zvláštních opatření pracovat jako generátor. Motor můžeme nechat volně doběhnout, pokud nám nevádí delší doběh. Pokud potřebujeme brzdit, možnosti jsou tři.



**Protiproudé brzdění** „je takové, při kterém změním smysl otáčení statorového magnetického pole. Pracoval-li motor v motorickém režimu při jmenovitém zatížení, bude se po reverzaci jeho skluz blížit hodnotě 2. Tomu bude odpovídat i statorový proud, který bude dokonce o něco větší, než je záběrný proud.“ [2, s. 143-144] Motor musíme v nulových otáčkách odpojit od sítě, jinak by se začal otáčet druhým směrem – nutnost použití snímače nulových otáček. Vlivem velkého tepelného a mechanického namáhání lze takto brzdit pouze u malých motorů a ne příliš často.

**Brzdění stejnosměrným proudem** – při tomto způsobu brzdění se na statorové vinutí připojí zdroj stejnosměrného napětí. Je možno použít kterékoliv ze sérioparalelních spojení jednotlivých fází pro zapojení do hvězdy nebo do trojúhelníku. Stejnosměrný proud vytvoří ve stroji stojící magnetické pole. Do otáčejícího se vinutí na rotoru se tak indukuje napětí, které je zdrojem rotorových proudů a tím vznikne brzdny moment  $M_{Bss}$ . [2, s. 143] Jako zdroj stejnosměrného napětí lze použít přímo frekvenční měnič, kterým motor poháníme.

**Generátorické brzdění** – lze použít jen ve spojení s měničem frekvence. Motor musí být na momentové charakteristice v oblasti generátoru, to znamená, že otáčky motoru musí být nadsynchronní a skluz záporný. Snížením napájecí frekvence snížíme synchronní otáčky a motor začne pracovat jako asynchronní generátor, proto musíme použít frekvenční měnič. Z motoru získáváme činný výkon, jalový výkon pro magnetizaci je do asynchronního motoru dodáván. Tzn. zatěžování sítě jalovou složkou a proto horší účinnost, který je třeba kompenzovat.

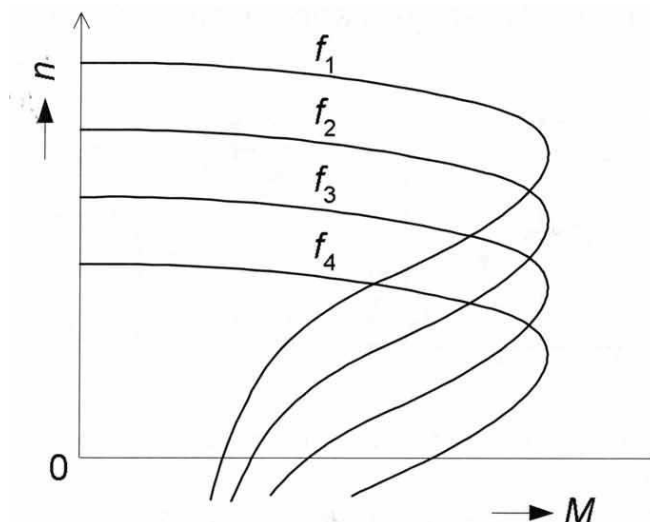
## 1.4 Řízení rychlosti u asynchronních motorů

### 1.4.1 Změna počtu pól párů

Jak vyplývá ze vztahu (1), u asynchronních motorů máme pouze omezené možnosti řízení otáček. Pokud tomu přizpůsobíme konstrukci motoru, můžeme za chodu měnit počet pólových dvojic a tím v několika stupních měnit rychlost otáčení motoru. Je to však složité řešení, které mělo smysl v době, kdy nebyly dostupné polovodiče. Dnes potkáme maximálně motory dvourychlostní pro speciální aplikace.

### 1.4.2 Frekvenční řízení

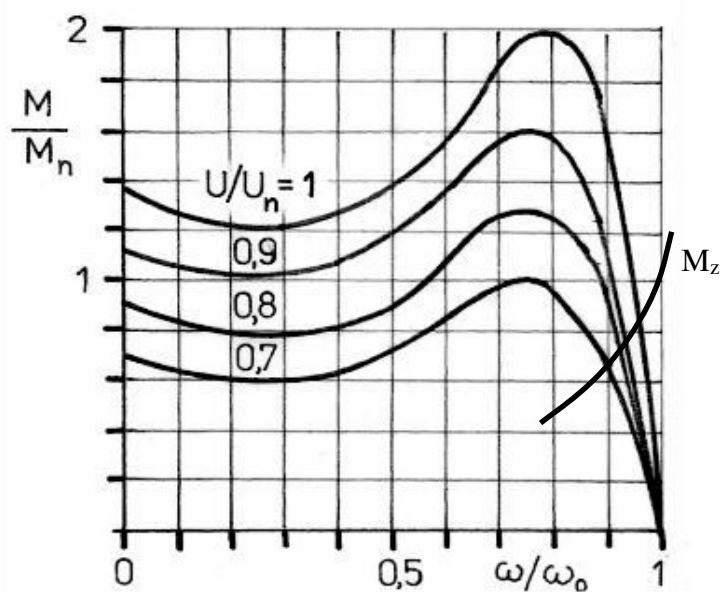
Všechny asynchronní motory lze řídit frekvenčně. Menší napájecí frekvence znamená menší rychlost točivého magnetického pole, a proto menší otáčky. Změnou frekvence dochází k posouvání momentové charakteristiky, tak jak zobrazuje Obr. 7, pro který platí  $f_1 > f_2 > f_3 > f_4$ . Velkou výhodou je, že se snižující se frekvencí neklesá maximální moment při vhodném režimu řízení. Tato problematika je blíže popsána v kapitole věnující se frekvenčním měničům.



Obr. 7 – Momentová charakteristika při frekvenčním řízení [online].  
[cit. 2017-04-30] [http://elektrika.cz/obr/08\\_rizenirychlosti\\_01v.jpg](http://elektrika.cz/obr/08_rizenirychlosti_01v.jpg)

### 1.4.3 Další možnosti řízení

Poslední možnost řízení u motorů s klecovým rotorem je změna skluzu. Tento způsob řízení vychází z myšlenky, že moment motoru je závislý na kvadrátu napětí. Snížením napájecího napětí se zvedne skluz, a tím pádem dojde i ke snížení otáček. Dojde k posunu pracovního bodu na momentové charakteristice tak, jak je znázorněno na Obr. 8. Nevýhodou je malý rozsah regulace a použitelnost jen u zařízení, kde zatěžovací moment  $M_z$  roste kvadraticky s otáčkami (jako třeba u ventilátoru).



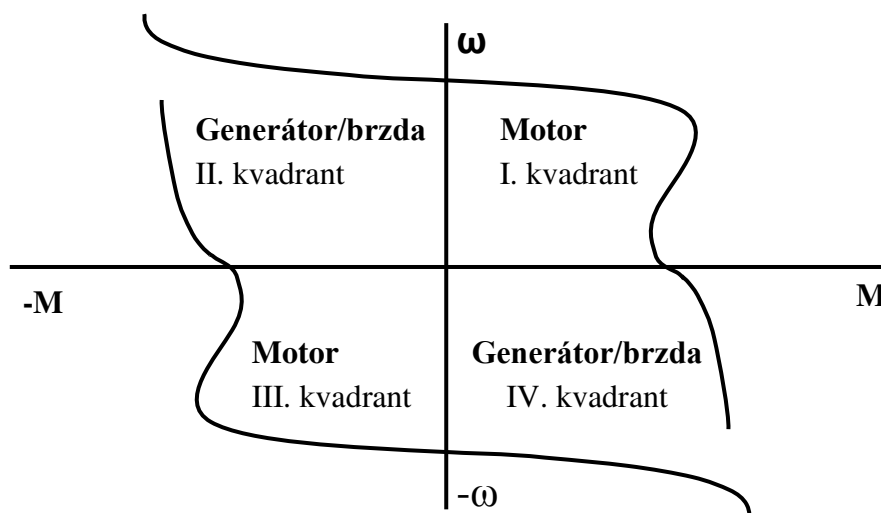
Obr. 8 – Mechanická charakteristika při sníženém napětí. [online].  
[cit. 2017-05-05] Dostupné z: [http://homen.vsb.cz/~hav278/Mechatronicke\\_systemy/Studijni\\_opory/Motory\\_AM.pdf](http://homen.vsb.cz/~hav278/Mechatronicke_systemy/Studijni_opory/Motory_AM.pdf) [s. 10] (upraveno autorem)

## 2 Frekvenční měniče

### 2.1 Čtyři kvadranty řízení

Pokud máme pohon, který umí pracovat pouze v motorickém režimu bez možnosti brzdit, jako jsou třífázové stolní pily a brusky, kde asynchronní motor pomocí spínače připojujeme přímo na síť, můžeme o takovém pohonu mluvit jako o jednokvadrantovém. Pohony, jejichž pracovní bod se může nacházet ve dvou sousedních kvadrantech, nazýváme dvoukvadrantové pohony. Pokud nám pohon dovoluje měnit jak smysl momentu, tak i směr otáčení, potom se jeho pracovní bod může nalézat v kterémkoliv kvadrantu a takový pohon nazýváme čtyřkvadrantový pohon. [2, s. 6]

Při použití frekvenčního měniče vždy získáme pohon čtyřkvadrantový. To je vidět na Obr. 9, kde jsou zobrazeny momentové charakteristiky asynchronního motoru pro oba směry otáčení.



Obr. 9 – Provoz ve čtyřech kvadrantech

### 2.2 Dělení frekvenčních měničů

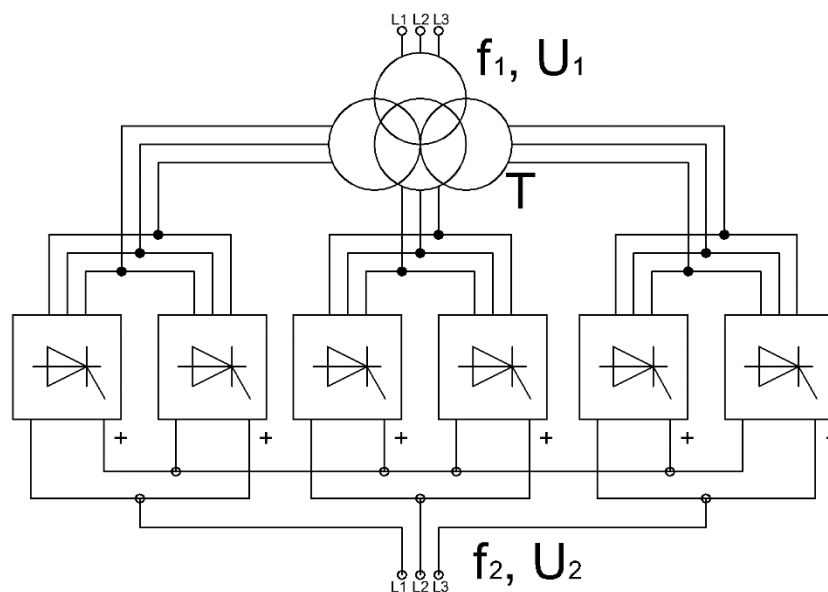
Frekvenční měniče se vyrábí v mnoha provedeních. Lze je rozdělit na přímé a nepřímé měniče kmitočtu. Nepřímé měniče se pak dělí podle použitého meziobvodu. Buď je proudový, nebo napěťový.

### 2.3 Přímý měnič frekvence

„Přímý měnič frekvence je měnič výkonové elektroniky, který mění vstupní střídavé napětí o konstantní efektivní hodnotě  $U_1$  a konstantní frekvenci  $f_1$  na výstupní střídavé napětí o proměnné efektivní hodnotě  $U_2$  a proměnné frekvenci  $f_2$  přímo bez stejnosměrného

meziobvodu. V technické praxi je pro něj používán také název cyklokonvertor.“ [2, s. 157] Jeho základní myšlenkou je měnit střední hodnotu výstupního napětí pomocí změny řídicího úhlu  $\alpha$ .

Většinou se skládá se ze šesti třífázových, antiparalelně zapojených, nereverzačních, řízených usměrňovačů. Proto v třífázovém zapojení vyžaduje minimálně 36 tyristorů. „Jeho výstupní frekvence může být maximálně asi 40% napájecí frekvence. Proto se pro napájení asynchronních motorů prakticky nepoužívá.“ [2, s. 157] Pouze u pomaloběžných, především synchronních motorů, tam kde by bylo nutné v nepřímém měniči použít paralelního nebo sériového řazení tranzistorů, tedy pro měniče větších výkonů. [3, s. 160]



Obr. 10 – Přímý měnič kmitočtu

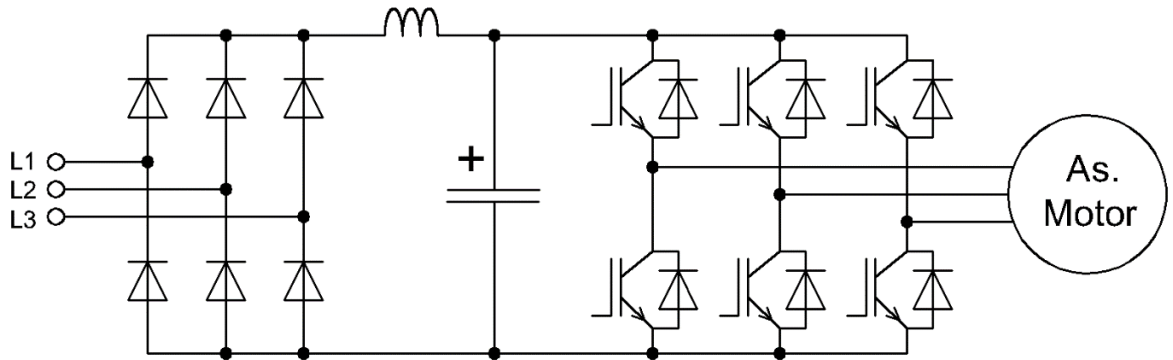
## 2.4 Princip a konstrukce nepřímého měniče frekvence

Nepřímé měniče frekvence vždy začínají usměrňovačem. Následuje napěťový nebo proudový meziobvod. U proudového meziobvodu je jako akumulátor energie použita cívka a u napěťového kondenzátor. Za meziobvodem je střídač. Na jeho výstupy je připojen motor. Vše je řízeno, regulováno a kontrolováno řídicí elektronikou. Pro pohony s asynchronními motory se častěji používají měniče s napěťovým meziobvodem.

### 2.4.1 Frekvenční měniče s napěťovým meziobvodem

Vstupní napětí je usměrněno usměrňovačem. Ten je můstkový, nejčastěji třífázový diodový. Usměrněné napětí je pomocí kondenzátoru s velkou kapacitou udržováno na stabilní úrovni. Mezi usměrňovačem a kondenzátorem je u některých výrobců tlumivka, která potlačuje střídavou složku, protože napětí je zvlněné, a omezuje proudové nárazy při přechodných jevech

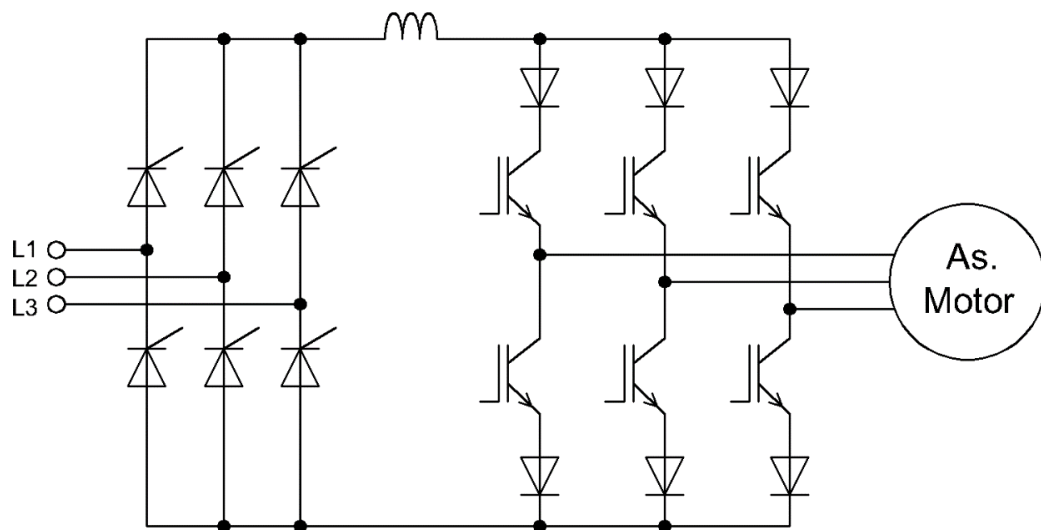
[4, s. 3]. Na stejnosměrný obvod s tlumivkou můžeme dívat jako na LC článek. Tlumivka je velká, těžká a celý měnič prodražuje, a protože není nezbytně nutná, většina výrobců ji nepoužívá. Vhodným spínáním IGBT tranzistorů střídače vytváříme průběh výstupního napětí, jehož střední hodnota se mění v čase.



Obr. 11 – Schéma nepřímého měniče s napětiovým meziobvodem

#### 2.4.2 Frekvenční měniče s proudovým meziobvodem

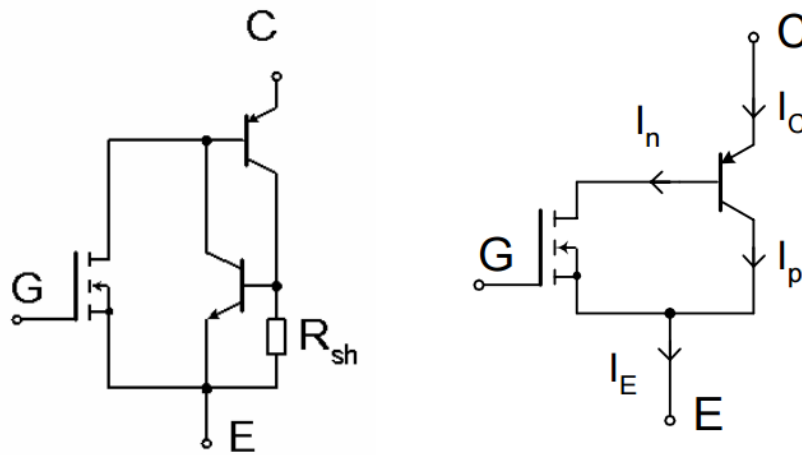
Usměrňovač musí být řízený, protože jeho řízením se udržuje ve stejnosměrném meziobvodu požadovaný proud  $I_d$ . Ve stejnosměrném meziobvodu je zařazena tlumivka  $L$ , která zajišťuje impedanční oddělení usměrňovače od střídače a proudový charakter meziobvodu. „Velkou výhodou tohoto typu měniče je skutečnost, že pro změnu směru toku energie postačí změnit polaritu napětí ve stejnosměrném meziobvodu bez doplnění o další silové části. Převedením střídače do usměrňovačového režimu a vstupního usměrňovače do invertorového režimu se změní polarita napětí při zachování směru proudu ve stejnosměrném meziobvodu a tím i směr toku energie.“ [3, s. 166] Použití především pro větší výkony.



Obr. 12 – Nepřímý měnič s proudovým meziobvodem a řízeným usměrňovačem

## 2.5 IGBT tranzistory

Tento typ tranzistoru vznikne integrovanou kombinací bipolárního výkonového tranzistoru a vstupního tranzistoru typu MOS FET. Označuje se IGBT (Insulated gate bipolar transistor). IGBT tranzistory tak spojují výhodu vstupu s prakticky nekonečným odporem a malým úbytkem napětí v sepnutém stavu. [3, s. 21] Jejich dynamické vlastnosti jsou také dobré. Mají menší ztráty, méně se zahřívají, a proto je možné jejich použití pro spínání velkých výkonů. Na Obr. 13 je znázorněno vlevo základní schéma IGBT (pro stacionární stav) a vpravo zjednodušené. „Pro sepnutí stačí přivést náboj na řídicí elektrodu G. Ve struktuře na rozdíl od tyristoru za běžných provozních podmínek nevzniká kladná zpětná vazba, přerušením proudu pod izolovaným hradlem se zavře i tranzistor PNP.“ [5, s. 88]



Obr. 13 – Základní náhradní schéma IGBT [online]. [cit. 2017-04-29]  
Dostupné z: [http://hrzina.wz.cz/vyuka/X13KVE/prednes/prednes\\_06.pdf](http://hrzina.wz.cz/vyuka/X13KVE/prednes/prednes_06.pdf)

## 2.6 Usměrňovače

Usměrňovač je zařízení sloužící k přeměně střídavých napětí a proudů na stejnosměrná napětí a proudy, proto je nezbytnou součástí nepřímých měničů kmitočtu. Používají se třífázové šestipulzní nebo jednofázové dvojpulzní v můstkovém zapojení. Uzlová zapojení se nepoužívají, protože potřebují síťový transformátor, který je velký, těžký a drahý.

Jednofázové měniče lze použít jen pro menší výkony (do 5,5 kW). Je zřejmé, že jejich stejnosměrný obvod bude mít menší napětí a větší zvlnění. Rozdíl ukazuje vztah (8) a (9).

Pro jednofázový usměrňovač platí:

$$U_{DC} = \sqrt{2} * 230 = 325 V \quad (8)$$

$$U_{AV} = 230 V$$

Pro třífázový usměrňovač platí:

$$U_{DC} = \sqrt{3} * \sqrt{2} * 230 = 563 \text{ V} \quad (9)$$

$$U_{AV} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_s \cong 1,35 U_s = 540 \text{ V}$$

Kde  $U_{AV}$  je střední hodnota výstupního napětí

$U_{DC}$  je maximální napětí stejnosměrného obvodu

Usměrňovače jsou buď s vlastní, nebo sít'ovou komutací, které mohou být řízené nebo neřízené v závislosti na tom, jaká součástka je použita jako usměrňovací prvek.

- Neřízené – obsahuje pouze diody
- Fázově řízené – tyristorové
- Pulzní (spínané) – tranzistorové nebo vypínatelné tyristory

Usměrňovače diodové umožňují pouze tok energie ze sítě do stejnosměrného obvodu. Otevírají se vždy, když je amplituda vstupního napětí větší než hodnota napětí usměrněného.

Zajímavější je použití tyristorů, u nichž můžeme pomocí změny řídicího úhlu  $\alpha$  měnit střední hodnotu výstupního napětí, to je nezbytnost pro nepřímé měniče frekvence s proudovým meziobvodem. Pokud budeme řídicí úhel zvyšovat ( $\alpha > \pi/2$ ), dostaneme usměrňovač do invertorového režimu. Proud tyristorem může téct pouze jedním směrem, ale změní se znaménko napětí a tím pádem i výkonu. Energie je pomocí usměrňovače vracena zpět do sítě.

### 2.6.1 Spínané usměrňovače

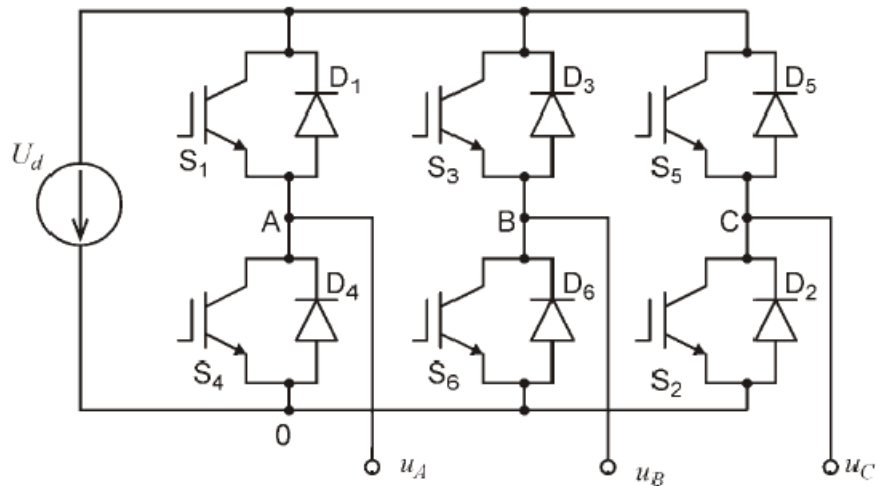
Oba zmíněné typy usměrňovačů mají nevýhodu v tom, že jejich odběr ze sítě není rovnoměrný, zatěžují síť pouze v propustném stavu pouze v okolí amplitudy napětí. To lze eliminovat použitím pulzního usměrňovače, jehož odběr je téměř sinusový. Používají se prvky s vlastní komutací, které musí být schopny samy přerušit proud ve větvi, jako jsou tranzistory a vypínatelné tyristory (GTO tyristor). Díky možnosti zapínat a vypínat podle potřeby usměrňovač zatěžuje síť sinusově, zůstává možnost rekuperace a navíc můžeme řídit i vstupní účinník.

## 2.7 Střídače

### 2.7.1 Napět'ové střídače

Obecně obvody se stejnosměrnou vstupní stranou a střídavou výstupní. Podle úhlu řízení mohou přenášet energii oběma směry. Mohou tedy pracovat jako střídače i jako

usměrňovače. Jedná se tedy o stejný obvod jako v předchozím odstavci – spínaný usměrňovač. Liší se pouze v řízení. Jeho schéma je na Obr. 14. Podle stejnosměrného meziobvodu jsou střídače napěťové a proudové. Můžeme je rozdělit podle počtu fází, pro frekvenční měnič si vystačíme pouze s třífázovou variantou.



Obr. 14 – Třífázový můstkový napěťový střídač, zdroj: [5]

U frekvenčních měničů je *Střídač* tvořen šesti IGBT tranzistory a je spínán nejčastěji pomocí pulzně šířkové modulace (PWM), tím mění výstupní efektivní hodnotu napětí tak, aby měla sinusový průběh. Nevýhodou je vznik harmonických složek proudu, které nekonají žádnou práci, pouze motor ohřívají asi o 7% -15% a způsobují nerovnoměrnost momentu. Ke každému tranzistoru je antiparalelně připojena „zpětná“ dioda, protože obvykle nejsou konstruovány jako závěrně blokující. Dioda zároveň slouží jako nulová a potlačuje indukční charakter zátěže. Obvykle ji tranzistory mají zabudovanou přímo v pouzdře.

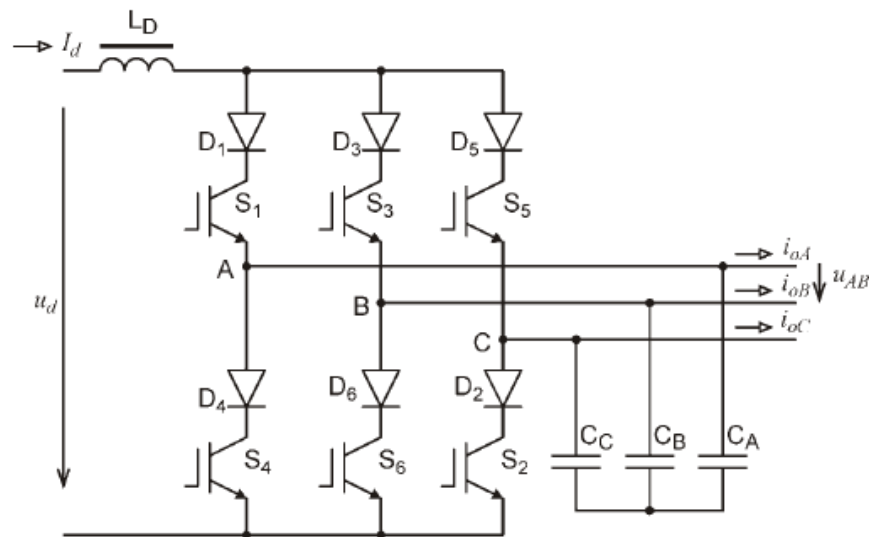
Průběh výstupního napětí má u napěťového střídače charakter rychle po sobě následujících napěťových pulzů, nebo při obdélníkovém řízení má charakter stupňovitého průběhu. [3, s. 149] Obsah harmonických velmi závisí na řízení, s rostoucí spínací frekvencí je složení harmonických příznivější. Napěťové střídače jsou vhodné spíše pro zátěž s indukčním charakterem.

### 2.7.2 Proudové střídače

Napájení je ze zdroje stejnosměrného proudu – proudového meziobvodu. Jsou vhodné pro velké výkony, zátěž musí mít kapacitní charakter. „Střídač je zdrojem proudu, který má průběh blízký obdélníku při odporové zátěži, ale při induktivní zátěži je úměrný derivaci proudu. Na hranách obdélníkového proudu je tato derivace vysoká, způsobuje přepětí velikosti několikanásobku maximální hodnoty základní harmonické.“ [3, s. 150] Proto je indukční zátěž



problematická, častější je použití proudových střídačů pro synchronní motory s vinutým rotorem, kde si charakter zátěže můžeme nastavit podle velikosti budícího proudu rotoru. Stejně jako napěťové, obsahují šest tranzistorů a šest diod, ale jsou zapojeny do série. Jeho schéma je na Obr. 15. Každá větev můstku je určena pro vedení proudu v jednom směru a blokování napětí obou polarit, zatímco u napěťového každou větví můstku teče proud v obou směrech a blokuje pouze napětí jedné polarity. [3, s. 156] Tento rozdíl je způsoben zapojením diody.



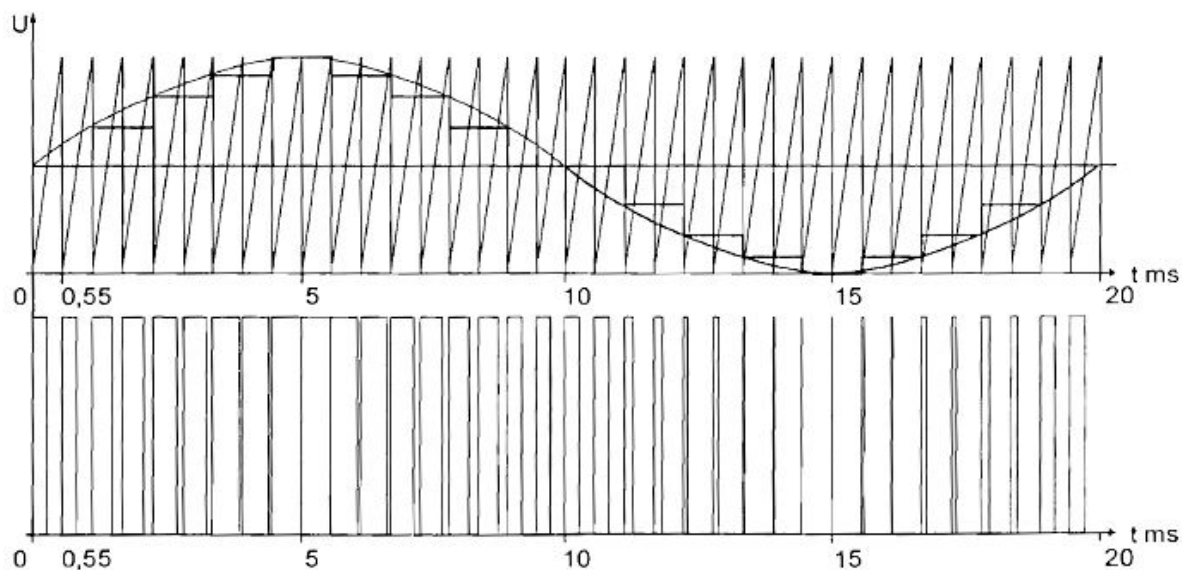
Obr. 15 – Třífázový proudový střídač, zdroj: [5]

## 2.8 Regulace napětí pomocí PWM

Na obrázku Obr. 16 je znázorněno vytvoření signálu PWM. (pulse width modulation) Tato metoda spočívá v porovnávání dvou napětí. První je proměnné napětí sinusového tvaru, které má frekvenci odpovídající zadané, požadované hodnotě výstupní frekvence. Tato frekvence je generována generátorem.

U frekvenčních měničů je sinusový průběh napětí vytvářen v mikrořadiči. Hodnoty jsou uloženy v tabulkové paměti (EPROM) po jednotlivých krocích. Na Obr. 16 je těchto kroků 18.

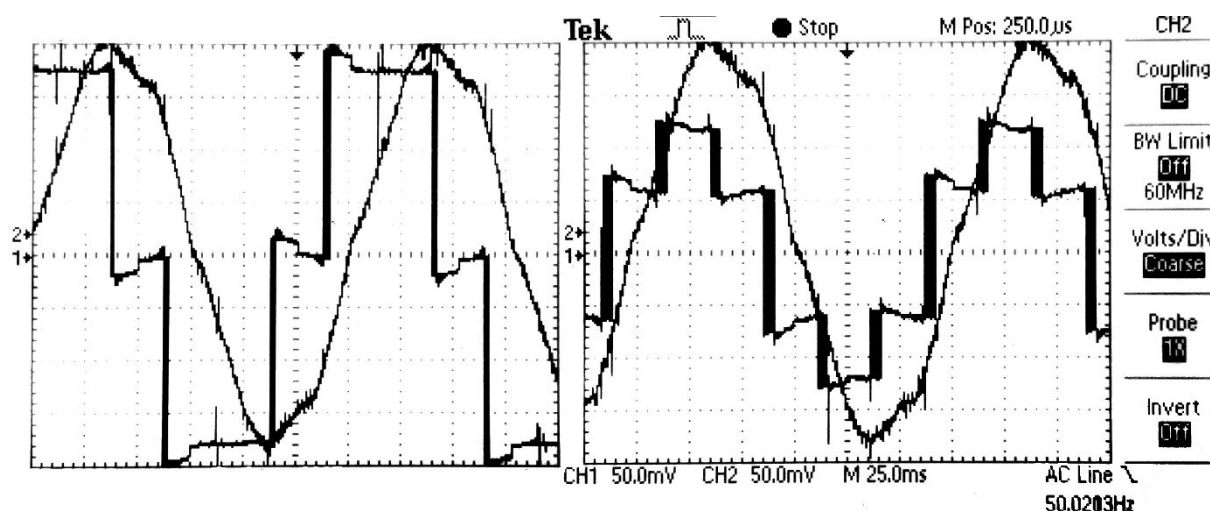
Druhé napětí je pilovité, jeho frekvence je daná spínací frekvencí. Při porovnání obou signálů je pomocí komparátoru vytvářen vždy kladný výstupní signál, pokud je pilovité napětí menší než sinusové napětí. Tímto pulsním signálem je vybuzen výkonový tranzistor. K sepnutí a rozepnutí dochází mnohokrát za periodu. Výstupní napětí má tvar obdélníků s různou šířkou. Signály se vytváří pro každou fázi zvlášť. Celý tento proces probíhá digitální cestou.



Obr. 16 – Sinusová PWM s frekvencí 50 Hz a spínací frekvencí 1,8 kHz [cit. 2017-05-02]. Zdroj: firemní literatura firmy SEW eurodrive

### 2.8.1 Další možné způsoby řízení napět'ového střídače

U frekvenčních měničů se výhradně používá PWM řízení, ovšem metod řízení střídačů je několik. **Amplitudové řízení (obdélíkové)** – amplituda výstupního napětí je přímo úměrná vstupnímu stejnosměrnému napětí. Proto výstupní napětí s neřízeným usměrňovačem je skokové. „Je-li napájecím zdrojem stejnosměrného napětí například řízený usměrňovač, můžeme ho použít k řízení amplitudy výstupního napětí.“ [3, s. 140] Složitá regulace efektivní hodnoty je důvodem proč je regulace PWM nejpoužívanější, k usměrňování vstupního napětí stačí diodový usměrňovač. Průběh výstupního napětí a proudu pro indukční zátěž při obdélíkovém řízení je na Obr. 17. Vlevo na obrázku je napětí fázové a vpravo je napětí sdružené.



Obr. 17 – Výstupní napětí a proud pro obdélíkové řízení střídače, zdroj: vlastní měření v předmětu Výkonová elektronika

Průběhy jsou měřeny osciloskopem. Převod napěťové sondy je 10mV/1V. Převod proudové sondy je 100mV/1A.

## 2.9 Brzdění a rekuperace

Při potřebě urychlit doběh provozujeme motor v režimu generátoru. Z poháněného soustrojí se díky jeho setrvačnosti stalo soustrojí poháněcí. Tato kinetická energie je přes motor indukována v podobě elektrické energie do statorového vinutí motoru. Odtud teče do stejnosměrného obvodu frekvenčního měniče. Za předpokladu, že je použit nejlevnější a proto nejpoužívanější můstkový diodový usměrňovač, energie se tu hromadí.

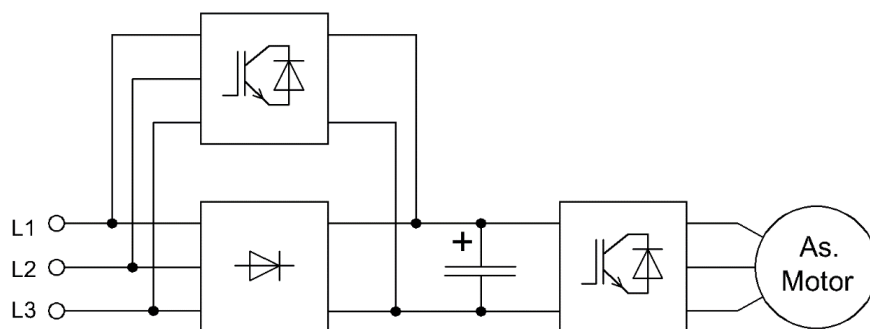
$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad (10)$$

Kde E je energie kondenzátoru  
C je kapacita kondenzátoru  
U je napětí na které je nabyt

Ze vztahu (10) vyplývá, že začne růst napětí meziobvodu, protože kapacita se nemění. Mezi kladným a záporným pólem meziobvodu je umístěn malý vybíjecí rezistor. Ten zde je pouze kvůli bezpečnosti pracovníků, kteří s měniči manipulují. Nebezpečné napětí na kondenzátorech by jinak mohlo vydržet i několik týdnů. Rezistor zajistí, aby se kondenzátor měniče vybil do pěti minut po odpojení od zdroje elektrického napětí. Během brzdění můžeme tento rezistor zanedbat.

Pokud je energie moc, došlo by k překročení maximálního tolerovaného napětí stejnosměrného obvodu. Existují dva způsoby, jak udržet napětí, pod maximální hranicí. Elektrickou energii můžeme proměnit v teplo na odporníku nebo ji můžeme rekuperovat. Rekuperací myslíme proces, při kterém elektrickou energii vracíme zpět do napájecí sítě. Tzn., že dojde k obrácení toku energie. Pokud tedy stoupne napětí meziobvodu na určitou hodnotu, bude stejnosměrné napětí meziobvodu pomocí měniče v synchronní amplitudě i fázi navraceno zpět do sítě.

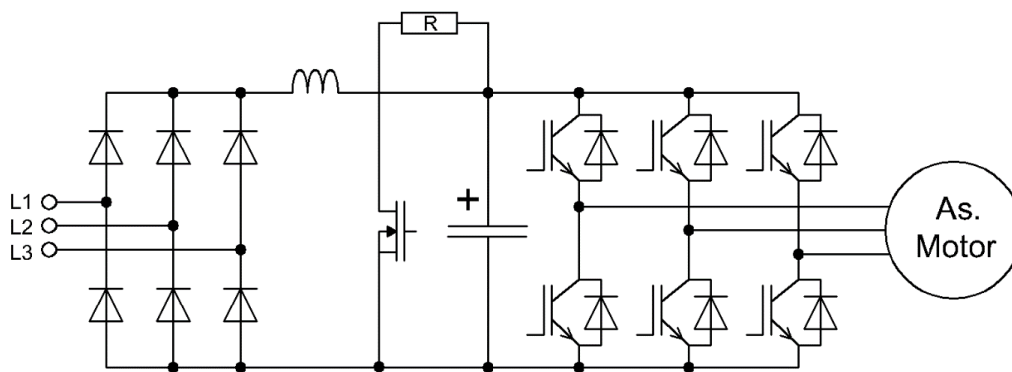
Z kapitoly 2.6 je jasné, že pro rekuperaci v měniči musí být použit řízený usměrňovač, pokud je usměrňovač neřízený, je možnost připojit rekuperační modul antiparalelně k diodovému usměrňovači, tak jak je blokově nakresleno na Obr. 18.



Obr. 18 – Připojení rekuperačního modulu

### 2.9.1 Činnost brzdného spínače

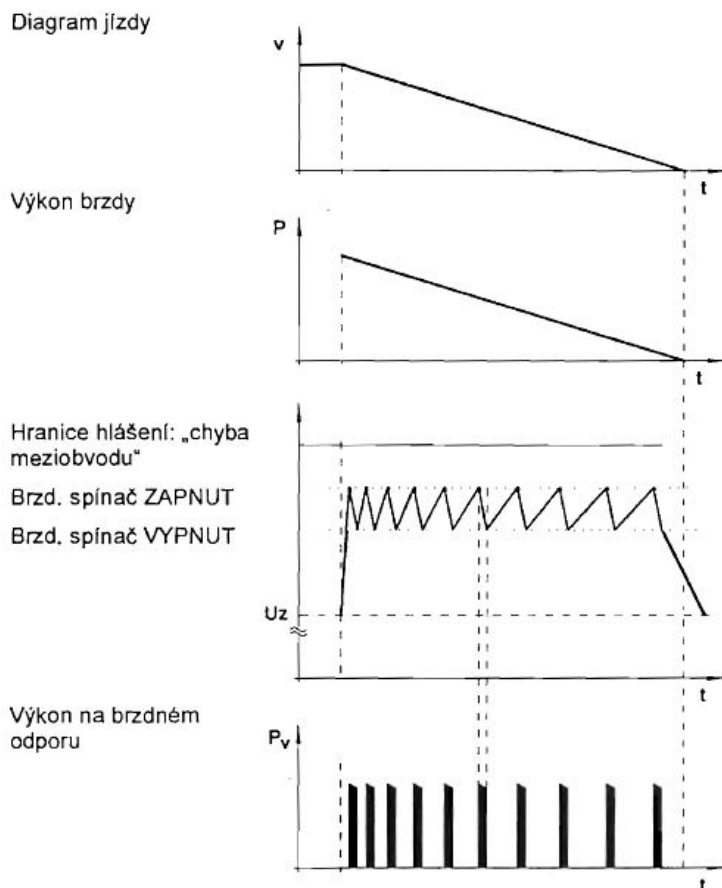
Většina měničů má integrovaný tranzistor, který spíná v závislosti na velikosti napětí ve stejnosměrném meziobvodu měniče. Tranzistor je řízen procesorem měniče a je možné ho úplně vypnout. Přes výstupní svorku je k tranzistoru připojen odporník. Druhý vodič odporníku je trvale připojen k plusu/mínusu v závislosti na konstrukci měniče, podle toho která polarita je spínána.



Obr. 19 – Nepřímý frekvenční měnič s připojeným odporníkem

Na Obr. 20 je zobrazen průběh brzdění za určitý čas. Rychlost motoru a poháněného soustrojí klesá lineárně. Stejně tak brzdný výkon, protože výkon je závislý na rychlosti, jak dokazuje vztah (11). Napětí meziobvodu může vzrůst až o několik set voltů, než dojde k sepnutí tranzistoru. Při poklesu napětí pod požadovanou úroveň je vybíjení přerušeno. U moderních měničů lze tyto parametry nastavit podle potřeby. Na odporník je tedy impulzně přivedeno plné napětí ss obvodu, protože je přeměněno v teplo, dimenzujeme ho na střední hodnotu. Pokud měnič spínací prvek neobsahuje, je možné použít externí, který bude spínán logickým výstupem měniče. Častěji se však používá samostatná brzdná jednotka, která je připojena na meziobvod a spíná brzdný odporník podle aktuální hodnoty napětí stejnosměrného meziobvodu.

$$P = \omega * M \quad (11)$$



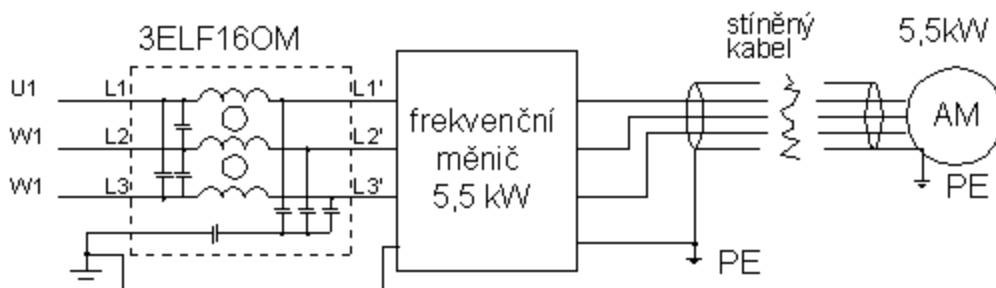
Obr. 20 – Způsob činnosti brzděného spínače [cit. 2017-05-02].  
Zdroj: firemní literatura firmy SEW eurodrive (upraveno autorem)

## 2.10 Příslušenství potlačující vliv na síť

Měniče obsahují polovodičové spínací prvky, proto je zřejmé, že ovlivňují své okolí. Jejich konstrukce musí být přizpůsobena, aby vyhovovala vzájemné elektromagnetické kompatibilitě. Musí splňovat normu pro vyzařované rušení a rušení po vodičích a zároveň musí být dostatečně odolné, aby je případné rušení z jiného zdroje neovlivnilo. Následující příslušenství v tom pomáhá.

*Síťové tlumivky* – hlavním úkolem tlumivek je omezení vysokých proudových špiček vznikajících při komutaci vstupních diod usměrňovače ve frekvenčním měniči, proto se občas nazývá **komutační tlumivkou**. „Tlumivky zároveň zvyšují ochranu měniče proti přepětí. Impedance tlumivek tvoří spolu s ostatními impedancemi dělič napětí pro přepětí.“ [7, s. 49]

*Síťový filtr* – Rychlé spínání tranzistorů frekvenčního měniče je zdrojem elektromagnetického rušení, které se šíří po rozvodné síti. Síťové filtry tlumí rušení v oblasti od 150 kHz do 30MHz. Principiálně jde o dolní propust. Používání filtrů vyžaduje zákon o elektromagnetické komptabilitě. [6]



Obr. 21 – Schéma síťového filtru 3ELF160M a jeho zapojení, zdroj:[6]

*Výstupní filtr* – vytváření sinusového napětí pomocí PWM má negativní následky jako je zvýšení hlučnosti motoru, vznik kapacitního statického náboje a špiček přepětí na kabelu a vyzařování vysokofrekvenčního rušení. Všechny tyto nežádoucí účinky lze silně redukovat použitím výstupních filtrů, které pulzy napětí střídače vyhladí. „Vlivem kapacitního statického náboje na kabelu je maximální délka vedení omezena, při použití výstupního filtru nejsme tímto omezeni, protože výstupní napětí je nízkofrekvenční.“ [7, s. 49]

*Výstupní tlumivka* – jedná se o toroidní jádro, kterým jsou protaženy motorové kabely, doporučená hodnota je pět závitů. Slouží k utlumení asymetrického toku rušivých proudů a částečnému zaoblení hran signálu. Při správném zapojení vhodné výstupní tlumivky v kombinaci s výstupním filtrem dokonce není nutné použití stíněného kabelu, který je běžně nezbytností.

### 3 Způsoby řízení motoru

#### 3.1 Skalární

Nejznámější způsob plynulé regulace otáček asynchronního motoru pomocí frekvenčního měniče je tzv. proces  $U/f$ , zvaný též **regulace poměru napětí a frekvence**. Jde o nejjednodušší způsob řízení, jehož základem je vztah (13). Tímto způsobem řízení je zajištěn konstantní magnetický tok, aby motor nebyl ani pod-ani přemagnetizován. Odvození je v následujícím vztahu. (12)

Napětí statorového vinutí:

$$\hat{U}_1 = R_1 * i_1 + j\omega_1 \hat{\Psi}_1 \quad (12)$$

Kde  $R_1 * i_1$  je úbytek napětí na odporu statoru

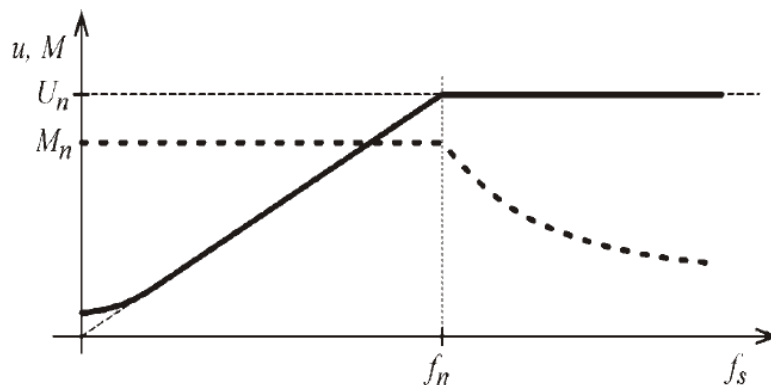
$\omega_1$  je úhlová rychlost otáčení magn. pole statoru

$\Psi$  je spřažený magnetický tok

Za úhlovou rychlost můžeme dosadit,  $2\pi$  je konstanta, úhlová rychlost závisí pouze na frekvenci. Magnetický tok chceme konstantní, takže při zanedbání odporu statorového vinutí, můžeme napsat:

$$\frac{U}{f} = \text{konstanta} \quad (13)$$

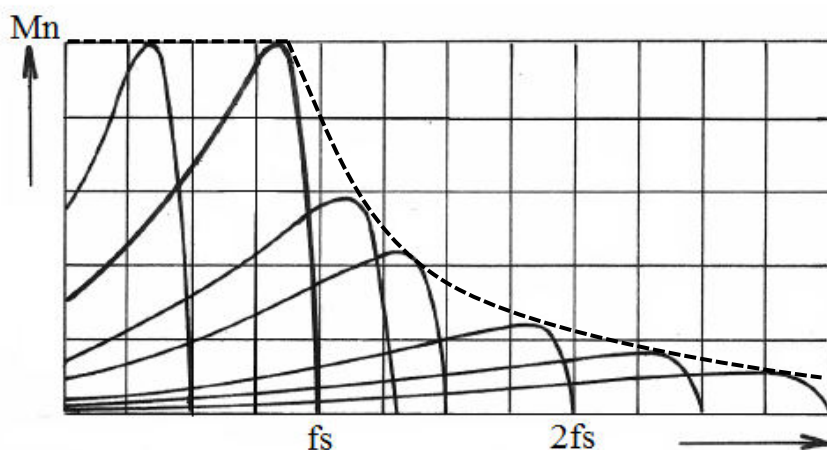
V takovém případě bude závislost napětí na frekvenci přímková a motoru zajistíme maximální moment v širokém spektru otáček. Snížený maximální moment je nepříjemností při malých otáčkách motoru. Důvodem je úbytek napětí na odporu statorového vinutí, které se se snižující frekvencí projevuje čím dál výrazněji a už ho nelze zanedbat.



Obr. 22 – Řízení otáček pomocí  $U/f$  charakteristiky, zdroj:[5]

V oblasti nízkých otáček úbytek napětí kompenzujeme zvýšeným napětím, tím zvýšíme i proud, takže motor je více tepelně namáhán a to je zdrojem problému. Většina asynchronních motorů má závislé chlazení, tzn. chladicí ventilátor je připevněn na rotoru a při nízkých otáčkách je průtok vzduchu malý a je snížen chladicí účinek. Pokud není zajištěno otáčkově nezávislé chlazení, nesmíme motor při nízkých otáčkách dlouho provozovat, jinak může dojít k jeho spálení. Nejlepším řešením je teplotní čidlo ve vinutí a při překročení nastavené teploty se motor odstaví nebo dojde ke snížení výkonu. Řízení  $U/f$  není vhodné pro frekvence nižší jak 5 Hz. „Skalární řízení frekvenčních měničů vychází z rovnic pro ustálený stav asynchronního stroje. Model motoru nerespektuje elektromagnetické jevy uvnitř stroje a z tohoto důvodu neumožňuje řízení okamžité hodnoty momentu, což má za následek zhoršenou dynamiku regulace rychlosti.“ [9]

Pokud se pohybujeme po křivce  $U/f$  pro 50 Hz, při dosažení  $f_n$ , tedy jmenovité frekvence motoru, dosáhneme i jmenovitého napětí. Frekvenci můžeme ještě navýšit, ale napětí již dosáhlo stropu, proto při vyšších otáčkách vztah (13) přestává platit a zvyšujeme pouze frekvenci při jmenovitém napětí. Pokud bychom měli k dispozici větší napětí, tak při jmenovitém zatížení motoru bychom z motoru odebírali větší výkon, než na který je dimenzován. S rostoucí frekvencí při konstantním napětí magnetický tok slábne. Účinek je stejný jako když odbuzujeme stejnosměrný motor s cizím buzením, s rostoucími otáčkami hyperbolicky klesá maximální moment motoru. Při odbuzení se pohybujeme v oblasti konstantního výkonu, protože ten se nemění. Průběh napětí a momentu je na Obr. 22. a na Obr. 23 je průběh momentové charakteristiky.



Obr. 23 – Vliv odbuzování na momentovou charakteristiku



Skalární řízení má výhodu, že nepotřebuje otáčkové čidlo. Jedná se o řízení v otevřené smyčce bez zpětné vazby, řízení není výpočetně náročné. Nevýhodou je, že jsou otáčky závislé na zatížení motoru, hlavně při nižších frekvencích. U některých měničů to lze částečně kompenzovat, s rostoucím skluzem se automaticky zvedá napájecí frekvence a tím se zmenšuje závislost otáček na zatížení. Toto nazýváme kompenzační skluz. Vzhledem k tomu, že neznáme skutečnou polohu a rychlost rotoru, v tomto režimu nemůžeme optimálně řídit moment motoru.

## 3.2 Vektorové

U skalárního řízení nastavujeme pouze efektivní hodnotu proudu a napětí a tím i magnetický tok. Moment asynchronního motoru závisí nejen na magnetickém toku a na proudu, ale také na úhlu mezi nimi. Pomocí **vektorového řízení** řídíme jejich vzájemnou fázi. „Největší moment asynchronního motoru je tehdy, jestliže proud je posunut o  $90^\circ$ , vzhledem k magnetickému toku.“ [4, s. 7] „Na asynchronní pohon s vektorovým řízením pak lze pohlížet jako na stejnosměrný pohon s cizím buzením, kde lze řídit nezávisle tok motorem a jeho moment.“ [9] Celkový proud tekoucí motorem lze tedy rozdělit na tyto dvě složky.

K vektorovému řízení je zapotřebí spousta výpočtů, proto je nutné použití mikropočítače, který výpočty provede. Výhodou vektorového řízení je dobrá dynamika motoru a vysoký moment i při nulových otáčkách.

### 3.2.1 Zpětná otáčková vazba

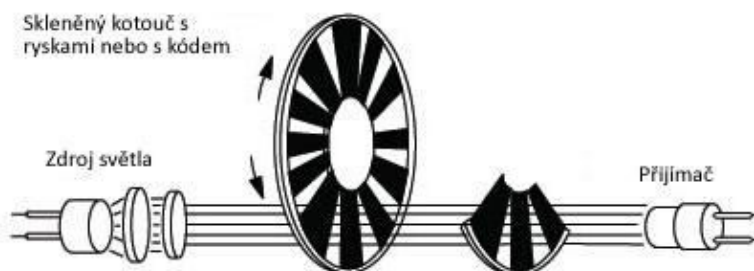
Prakticky rozlišujeme, jestli jde o vektorové řízení se zpětnou vazbou, nebo bez zpětné vazby, tedy jestli je na motoru umístěn snímač otáček a polohy rotoru.

**Vektorový režim bez zpětné vazby** – u tohoto režimu se používá matematického modelu motoru založeného na nastavených jmenovitých parametrech motoru a měřených veličinách, pomocí kterých se vypočítá, jak daleko za rotorem se nachází točivé magnetické pole statoru. Tento model motoru umožňuje dobré řízení momentu, ale jde jen výpočet/odhad, proto je zde větší nepřesnost. Regulace je vhodná pro aplikace, kde nepotřebujete plný točivý moment až na nulové otáčky. [10]

**Vektorový režim se zpětnou vazbou** - Zde máme zpětnou vazbu od rotoru pomocí snímače, což znamená, že známe přesnou polohu a rychlost rotoru vůči statoru a není třeba ji dopočítávat, porovnává se skutečná hodnota otáček s nastavenou požadovanou hodnotou. V tomto režimu máme plnou kontrolu nad točivým momentem až do nulové rychlosti. Používá se pro aplikace, kde byl dříve stejnosměrný motor a kde máme vysoké nároky na točivý moment a přesnost otáček (jako jsou papírenské stroje, tiskařské lisy, válcovací stroje). [10]

### 3.2.2 Snímání otáček

Pro snímání otáček asynchronních motorů se výhradně používají tzv. **inkrementální rotační enkodéry** (IRC). Dělí se na inkrementální a absolutní, rotační a lineární. Na rozdíl od indukčních snímačů a tachodynamů, enkodér snímá současně rychlost, směr a pozici. Informace je digitální a to také zvyšuje jejich oblibu. Enkodéry jsou řešeny jako optické snímače s vlastním zdrojem světla, kterým prosvěcují disk s nějakým kódem nebo rýhami. Při otáčení světlo dopadá na fotocitlivý přijímač přerušovaně. Použitím několika řad nad sebou můžeme mít snímač až se statisícem pulzů na jednu otáčku.



Obr. 24 – Princip enkodéru [online]. [cit. 2017-04-29] Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/encodery>

Pokud je snímač inkrementální, je potřeba jednoho synchronizačního pulzu jednou za otáčku. Z toho vyplývá, že po zapnutí systému není možné polohu zjistit až do první otáčky. Absolutní snímače jsou podstatně složitější a dražší, proto se moc nepoužívají. Musí mít pro každou polohu pouze jednu kombinaci kódu. Inkrementálnímu stačí jejich posloupnost, podle té lze určit směr otáčení.

### 3.3 Přímé řízení momentu

Měníči se zadá požadovaný moment, ten provede výpočet odhadu točivého momentu motoru a magnetického toku na základě měření napětí a proudu v motoru. Velikost spočítaných veličin je pak porovnána s jejich referenčními hodnotami. Pokud se odhadovaný tok nebo točivý moment odchylují od povolené tolerance, začnou se spínat a vypínat tranzistory takovým způsobem, aby se magnetický tok a moment vrátil do jejich tolerance, tak rychle, jak je to možné. [10] Výhodou jsou nízké ztráty, protože tranzistory střídače jsou spínány podle potřeby udržení točivého momentu. Tím pádem spínací frekvence není konstantní, musíme se řídit průměrnou spínací frekvencí. Měníč je schopný udržet zvlnění proudu a momentu na velmi malých hodnotách, ovšem jsou velké nároky na rychlost výpočtu.

### 3.4 Porovnání dynamiky

Při prudké změně momentu zatížení dojde k přechodnému jevu, než se na hřídeli motoru objeví konstantní moment. Vyrovnání momentu zátěže má určitou strmost, která nikdy nebude nekonečně velká, a vždy budeme mít nějaký překmit. Na následujícím obrázku (Obr. 25) jsou porovnány tři způsoby řízení, přímé řízení momentu nelze porovnat, jeho moment je konstantní. Jak vyplývá z předchozích odstavců, nejhorší dynamiku má skalární řízení a nejlepší vektorové se zpětnou otáčkovou vazbou.



Obr. 25 – Reakce systému na skokovou změnu zatížení

## 4 Měníče řady SIEMENS MICROMASTER 440

V této kapitole bude podrobně popsán frekvenční měnič MICROMASTER 440 od firmy SIEMENS, který je použit ve vyrobeném přípravku, jeho kompletní blokové schéma je uvedeno v příloze. (Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.)

### 4.1 Technické parametry

Tab. 1 – Parametry měniče

Model	6SE6440-2UD21-5AA1
Vstupní parametry	
Počet fází	3 AC
Napájecí napětí	380 ... 480 V $\pm 10\%$
Napájecí frekvence	47 ... 63 Hz
Jmenovitý proud	5,9 A
Výstupní parametry	
Jmenovitý výkon	1,5 kW
Jmenovitý proud	4,1 A
Spínací frekvence	4 kHz
Výstupní frekvence	0 ... 650 Hz
Počet vstupů a výstupů	
Digitální vstupy	6
Reléové výstupy	3
Analogový vstupy	2
Analogový výstupy	2
Teplotní čidlo PTC/KTY	1
Ostatní parametry	
Účinnost	0,96
Účíník	0,95
Pracovní teplota	-10 ... 50 °C
Stupeň krytí	IP20

- Měníč je konstrukční velikosti A, rozměry jsou v příloze. (Příloha )
- Neobsahuje vestavěný filtr.
- Možnost ovládání přes panel, sériovou linku z PC nebo komunikační sběrnici PROFIBUS/DEVICE NET
- Obsahuje tři sady parametrů, pro rychlou změnu nastavení.
- Přepínač pro síť provoz na síti 50/60 Hz

## 4.2 Ochrana motoru a měniče

- Komplexní ochrana motoru i měniče před přetížením
- Ochrana proti předpětí i podpětí
- Ochrana proti zemnímu i mezifázovému zkratu
- Ochrana proti překročení teploty měniče
- Tepelná ochrana  $I^2t$  motoru – výpočet pomocí teplotního integrálu
- Ochrana motoru pomocí čidla teploty ve vinutí motoru [8]

Lze říct, že motor i měnič jsou dobře chráněny před poruchovými stavy, ale vždy je lepší, když není potřeba zásah některé z ochran.

### 4.2.1 Teplotní snímač

Použití teplotního snímače je volitelné, pokud bude motor provozován při jmenovitých parametrech a teplotou okolí do 40 °C, lze říct, že je nadbytečný. Při nižších otáčkách by měl být moment motoru redukován. Snímač teploty je v továrním nastavení vypnutý. Je vhodné použít při provozu, kde bude horší odvod ztrátového tepla. (nízké otáčky, velká teplota okolí, časté přetěžování, velká nadmořská výška.) Můžeme volit mezi třemi variantami.

*Bimetalový kontakt* – připojíme ho do obvodu externí poruchy přes oddělovací relé na některý z digitálních vstupů, jehož parametr nastavíme na 29 – externí porucha. Při přehřátí bimetalu dojde k rozpojení obvodu, odpadne kontakt cívky, přes který byl připojen digitální vstup. Dojde k zastavení a hlášení poruchy.

PTC termistor – pozistor s kladnou teplotní charakteristikou. Při překročení nastavené teploty měnič zahlásí výstražné hlášení A0511 a poté poruchu, pokud teplota stále poroste (překročení zatížení motoru).

Lineární snímač KTY84-130 – lineární snímač teploty, nejvhodnější varianta. Chování měniče je podobné jako při použití PTC termistoru.

## 4.3 Ovládání měniče

Frekvenční měnič je vybaven komfortním ovládacím panelem AOP (Advanced Operator Panel), který je nakreslen na Obr. 26. Pomocí tohoto panelu lze měnit parametry měniče. Obsahuje celkem osm tlačítek a display, na kterém jsou zvolené informace. Existují ještě další dvě varianty panelu, první varianta obsahuje displej pouze s jedním řádkem a druhá obsahuje pouze dvě indikační diody, kombinací jejich svícení a blikání je vysílán stav měniče.

Pomocí tohoto indikačního panelu nelze měnič nastavit. Nastavené parametry jsou uloženy v měniči, proto můžeme pomocí základního panelu měnič nastavit, a poté panel vyměnit za indikační.



Obr. 26 – komfortní ovládací panel AOP

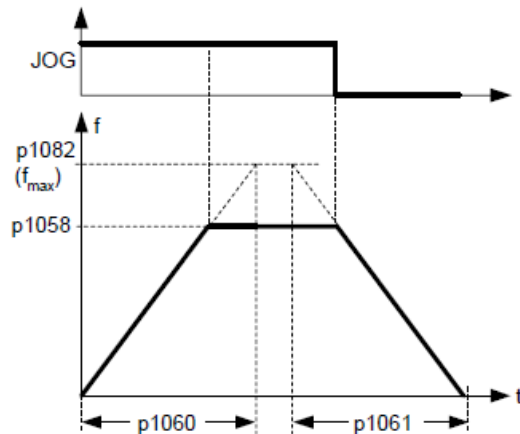
Tab. 2 – Význam ovládacích tlačítek

Tlačítko	Popis funkce
1	Slouží k zapnutí motoru, funkce je v továrním nastavení zablokována.
0	Slouží k vypnutí motoru, při jednom stisknutí motor doběhne po doběhové rampě, funkce je v továrním nastavení zablokována. Při dvojitém stisku dojde k vypnutí tranzistorů a volnému doběhu.
Dvojitá šipka	Reverzace motoru – tlačítko pro změnu směru otáčení, funkce je v továrním nastavení zablokována.
jog	Krokování – bude-li stisknuto při stojícím motoru, začne se rozbíhat v závislosti na nastavených parametrech. Stisknutí za chodu nemá žádný vliv.
Fn	Slouží k nulování poruchy a k přepínání parametru zobrazené na displeji.
P	Slouží k přepínání mezi parametrem a číselnou hodnotou parametru.
šipky	Slouží k zvětšování, zmenšování čísel parametrů a jejich hodnot. Zadávání výstupní frekvence je v továrním nastavení zablokováno, pro odblokování se musí zadat P1000 = 1

K odblokování ovládacího panelu pomocí tlačítek start, stop a reverzace je potřeba nastavit P700 = 1 (ovládání pomocí panelu). Při stojícím motoru je na displeji standardně zobrazena aktuální hodnota - 0 Hz a chvilkovým problikáváním žádané hodnoty, při P0006 = 2 a při použití analogového vstupu jako zdroje žádaného kmitočtu.

### 4.3.1 Krokování

Při stisknutí a držení tlačítka jog se motor rozběhne vpravo nebo vlevo v nastaveném čase na nastavenou frekvenci, po puštění tlačítka se motor zastaví. Továrně je frekvence pro oba směry nastavena na 5 Hz a čas 10 s. Čas se vztahuje k maximální frekvenci pohonu. Význam parametrů je zřejmý z Obr. 27.



Obr. 27 – Krokování motoru, zdroj: [12]

## 4.4 Způsoby řízení motoru

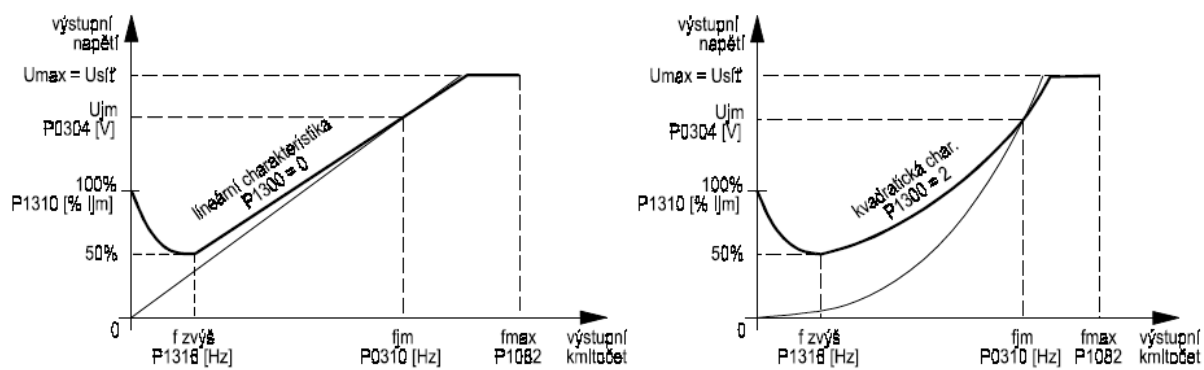
Podle hodnoty parametru P1300 je možné nastavit pohon v různých režimech činnosti:

P1300 = 0 **Lineární charakteristika  $U/f = \text{konst.}$**  Jedná se o skalární řízení popsané v oddílu: 3.1. Použitý způsob řízení je nutné nastavit v případě dvou a více motorů připojených paralelně k jednomu měnič nebo pohonu se synchronním motorem.

V případě, že pohon je tvořen asynchronním motorem, kompenzaci momentu v oblasti nízkých otáček nastavujeme zvýšením počátečního napětí motoru parametrem P1310, popř. P1311 a P1312.

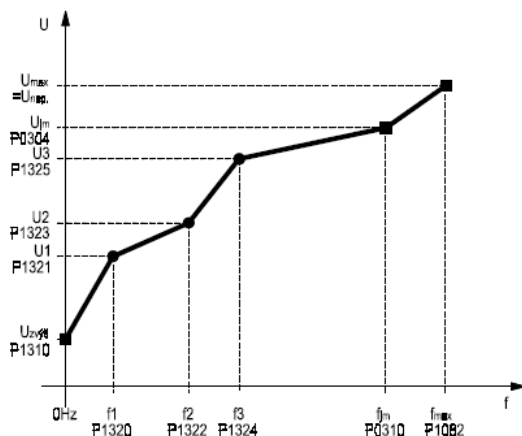
P1300 = 1 **FCC řízení** (řízení s aktivní regulací omezení proudu). Vylepšená varianta skalárního řízení. Pokud zátěž pohonu je příliš velká, dochází k omezování špičkového proudu motoru tak, aby se zamezilo výpadkům pohonu v důsledku proudového přetížení.

P1300 = 2 **Kvadratická charakteristika  $U/f^2 = \text{konst.}$**  Tento způsob řízení je vhodný v případě pohonu s kvadratickou zatěžovací charakteristikou, jako jsou ventilátory a odstředivá čerpadla. Při nižších otáčkách, kdy je zatížení menší, dochází k odbuzení motoru a tím zlepšení jeho účinnosti a stabilnějšího chodu. V továrním nastavení P1310 = 50 %.



Obr. 28 – Lineární a kvadratická charakteristika, zdroj: [8]

**P1300 = 3 Vícebodová U/f charakteristika.** Charakteristiku U/f je možné definovat třemi nezávislými body.



Obr. 29 – Vícebodová charakteristika, zdroj: [8]

**P1300 = 5 U/f charakteristika pro textilní aplikace.** Speciální způsob řízení, který slouží k synchronizaci více pohonů, není korigován skluz motoru a jsou přecházeny rezonanční pásma.

**P1300 = 19 U/f charakteristika s nezávislým nastavením napětí.** Napětí motoru je zadáváno parametrem P1330 nezávisle na výstupním kmitočtu.

**P1300 = 20 Vektorové řízení bez zpětné vazby - SLVC.** Pohon má vysoký moment od velmi nízkých otáček. Otáčky pohonu jsou automaticky vyrovnávány při změně zatížení.

**P1300 = 21 Vektorové řízení se zpětnou otáčkovou vazbou - VC.** Optimální způsob řízení asynchronního motoru. Pohon má jmenovitý moment i při nulových otáčkách. Otáčky pohonu jsou nezávislé na zatížení pohonu. Na motoru musí být umístěn inkrementální snímač rychlosti otáčení.

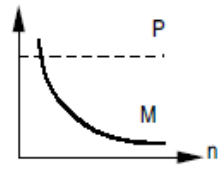
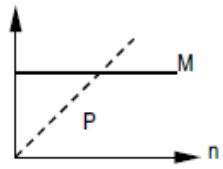
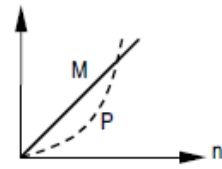
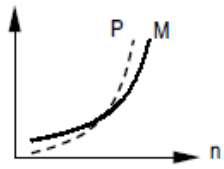


P1300 = 22 **Momentové řízení bez zpětné otáčkové vazby.** Přímé řízení momentu motoru. V aplikacích kde je vyžadován konstantní moment motoru, měnič nastaví vhodně otáčky tak, aby moment motoru odpovídal požadované hodnotě.

P1300 = 23 **Momentové řízení se zpětnou otáčkovou vazbou.** Od předchozího se liší umístěním inkrementálního snímače rychlosti otáčení. Pohon má jmenovitý moment i při nulových otáčkách. [8, s. 39]

#### 4.5 Charakteristika zátěže

Parametrem P0205 lze nastavit, o jaký typ zátěže se jedná. Nastavením tohoto parametru pro kvadratickou zátěž se odemknou některé možnosti nastavení, které jsou pro konstantní zatěžovací moment uzamčeny, např. kvadratická U/f charakteristika. Příklady různých zatěžovacích charakteristik jsou na Obr. 30.

zatěžovací moment	$M \sim \frac{1}{n}$	$M = \text{konst.}$	$M \sim n$	$M \sim n^2$
výkon	$P = \text{konst.}$	$P \sim n$	$P \sim n^2$	$P \sim n^3$
charakteristika				
příklad aplikace	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ navijedka / odvijedka</li> <li>◆ čelní soustruh</li> <li>◆ rotační nůžky</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ zdvihací zařízení</li> <li>◆ pásový dopravník</li> <li>◆ manipulátor</li> <li>◆ mlýn</li> <li>◆ pístový kompresor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ hydraulický lis</li> <li>◆ brzda s vířivými proudy</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ odstředivé čerpadlo</li> <li>◆ ventilátor</li> <li>◆ odstředivka</li> </ul>

Obr. 30 – Charakteristiky zátěže, zdroj: [8]

## **5 Návrh, konstrukce a nastavení přípravku**

Tato kapitola se zabývá vlastním návrhem konstrukce, zapojení a samotnou realizací. Kompletní výkresová dokumentace všech dílů je v příloze.

### **5.1 Návrh krabičky**

Samotná konstrukce, ve které je frekvenční měnič umístěn je svařena z hliníkových L profilů o tloušťce 3mm. Tato konstrukce se již v minulosti osvědčila, například při realizaci výukového přípravku se softstartéry. [13] Materiálem je hliník díky své nízké váze a odolnosti proti korozi. Tloušťka materiálu je zvolena s ohledem na dobrou svařitelnost. Svaření muselo proběhnout v ochranné atmosféře. Broušení svárů a celého svařence proběhlo pomocí ruční excentrické brusky, aby povrch dobře vypadal.

Velikost krabičky byla zvolena na hloubku měniče ve formátu A4, všechny potřebné komponenty se vešly, ale po několika překresleních potisku se tato velikost ukázala jako zbytečně malá. Výrobce říká, že pro zajištění dostatečné cirkulace vzduchu je potřeba ponechat nad i pod měničem 100mm. Tento rozměr nad měničem nebyl dodržen, ale protože je vršek krabičky bez krytu, dostatečné proudění vzduchu je zajištěno.

Krytem je opatřena pouze přední a zadní strana, která je vyrobena ze dvou plechů, které jsou galvanicky pozinkované. Vzhledem k tomu, že plechy mají pouze 1mm a byly uštěřeny nůžkami, nejsou dokonale rovné. Proto je k jejich uchycení použito celkem 13 šroubů se závitem M4. Broušení hran plechů proběhlo až při jejich montáži lamelovým kotoučem. Tím je zaručena jejich přesnost.

Pro tyto dva panely je vytištěn potisk, na kterém je popis komponent a schéma jejich zapojení, včetně schématu samotného měniče a jeho parametrů. Veškeré komponenty, včetně měniče, jsou přimontovány přímo na panelech. Na přední desce jsou ovládací, indikační a měřicí prvky a na zadním panelu jsou pouze zdířky pro silové vodiče. Pro hmatník sloužící k nastavení výstupní frekvence je nakreslena kružnice s čárkami po třiceti stupních, každý dílek stupnice tedy představuje 10% z maximální frekvence.

### **5.2 Návrh zapojení**

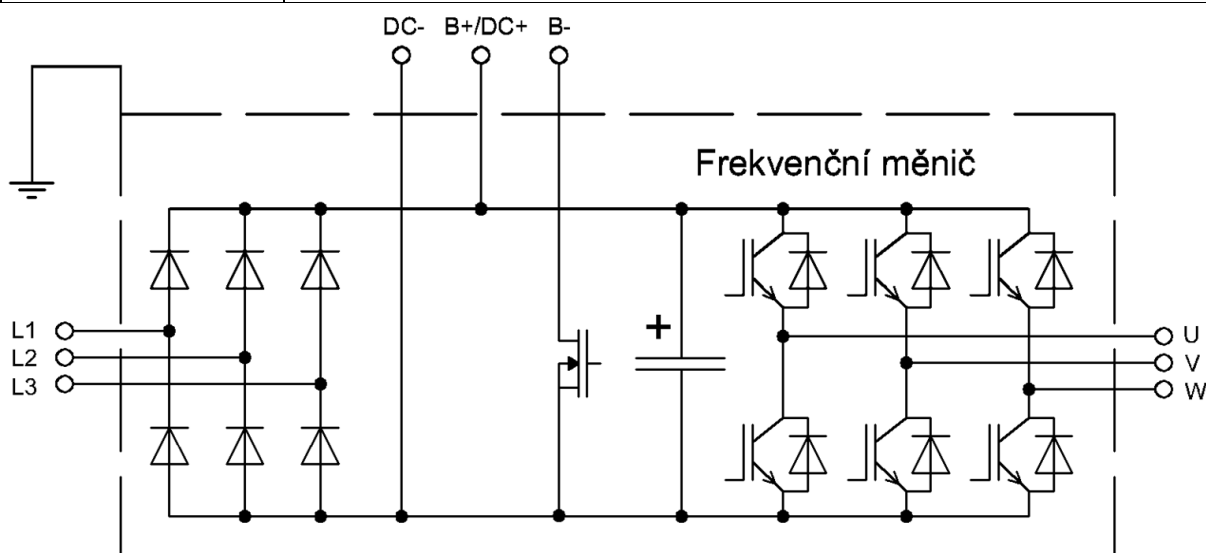
#### **5.2.1 Silová část**

Jde o zapojení dané výrobcem, které nenabízí žádné jiné možnosti. Přívod je bez jištění a bez síťového filtru, protože bude určen k provozu na oddělené školní síti v laboratoři. Uzeměn je měnič i okolní konstrukce. Do zadního panelu je vyveden i stejnosměrný meziobvod i výstup

na odporník, který je spínán k zápornému potenciálu. Kladnou svorku mají společnou. Současně můžeme brzdit i měřit napětí meziobvodu. Kompletní schéma zapojení je na Obr. 31. Během práce s přípravkem je umožněno spojitě měřit napětí stejnosměrného meziobvodu. Zapojení odporníku je volitelné, pro systém s malou setrvačností a dostatečně dlouhou doběhovou rampou je nadbytečný. Rozmístění svorek je takové, aby mezi nimi byly maximální rozestupy s ohledem na celkovou velikost přípravku.

Tab. 3 – Popis silových vodičů

Označení	Funkce svorky
L1, L2, L3	Přívod třífázového síťového napětí
U, V, W	Třífázový výstup na motor
DC-	Záporný potenciál meziobvodu
B+/DC+	Kladný potenciál meziobvodu
B-	Spínaný výstup na odporník



Obr. 31 – Zapojení silových vodičů

### 5.2.2 Ovládací část

Ovládání měniče je zapojeno na jeho svorkovnici, schéma zapojení je na Obr. 32, pořadím a rozmístěním svorek odpovídá skutečnosti. Dva přepínače v robustním provedení slouží ke spouštění a reverzaci motoru. Žádaná hodnota výstupní frekvence je zadávána pomocí potenciometru, který určuje napěťovou úroveň na vstupu číslo 3. Napětí se pohybuje v rozmezí 0 – 10 V a odpovídá rozsahu nastavené frekvence. Na přepínači vedle svorkovnice je možnost nastavit, zda výstup bude analogový, vstup napěťový nebo proudový,

Dále je na předním panelu umístěno tlačítko, které slouží k vymazání poruchy, má jeden spínací kontakt bez aretace v koncové poloze. Měnič reaguje pouze na náběžnou hranu signálu, proto držení tlačítka nebude mít vliv na nové poruchové hlášení.

Oba analogové výstupy měniče jsou vyvedeny, pro účely měření. Oba výstupy mají pouze proudový výstup 0 - 20 mA. Podmínkou je, že odpor ampérmetru nesmí být větší než 500  $\Omega$ , maximální napětí výstupu je totiž 10 V. Pokud chceme napět'ový výstup, je nutné proudový výstup zatížit odporem této hodnoty. Na tyto dva výstupy lze nastavit téměř všechny parametry typu r.

Tab. 4 – Některá možná nastavení analogových výstupů měniče, zdroj: [8]

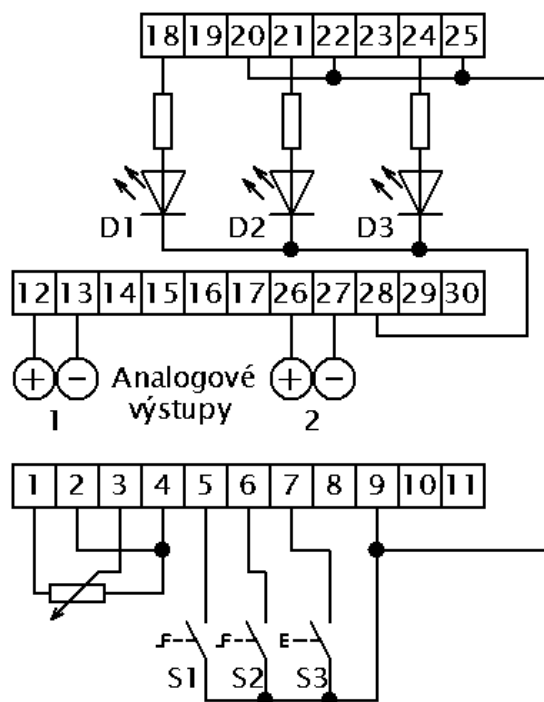
P0771 [2] =	Význam hodnoty
21	Výstupní kmitočet
22	Otáčky rotoru, vypočítané, není přihlédnuto ke skluzu
25	Výstupní napětí
26	Napětí stejnosměrného meziobvodu
27	Celkový výstupní proud
29	Budící proud motoru (pouze vektorové řízení)
30	Činný proud motoru (pouze vektorové řízení)
32	Aktuální hodnota výstupního výkonu
35	Teplota vinutí motoru – z čidla KTY84, nebo vypočtená
38	Aktuální účinník motoru
62	Žádaná hodnota kmitočtu

Veličiny na analogovém výstupu se vztahují k referenčním hodnotám uložených v parametrech P2000 až P2003. Jedná se o referenční kmitočet, napětí, proud a moment v tomto pořadí.

Přímo pod měničem jsou tři indikační LED diody. Červená pro signalizaci poruchy a dvě zelené pro signalizaci připravenosti měniče a chodu motoru. K nim byly zvoleny vhodné rezistory, aby vydržely trvalé napětí 24 V, jsou totiž připojeny na pomocný izolovaný zdroj měniče. Vždy by měla svítit maximálně jedna. Zdroj je dimenzován na 100 mA, proto se nemusíme obávat jeho přetěžování. Diody jsou připojeny na relé, protože měnič nedisponuje logickými výstupy. Relé musí být naprogramována tak, aby reagovala na změnu sledovaného stavu.

Tab. 5 – Popis zapojených ovládacích svorek

Číslo svorky	Hodnota/poznámka	Funkce
1	+10 V	Referenční napětí
2	0 V	
3, 4	0 – 10 V	Analogový vstup 1 – zadávání požadovaných otáček
5	24 V	Digitální vstup 1 – spuštění motoru
6	24 V	Digitální vstup 2 – reverzace motoru
7	24 V	Digitální vstup 3 – potvrzení poruchy
9	+24 V	Pomocné napájecí napětí – izolovaný zdroj
12, 13	0 – 20 mA	Analogový výstup 1
18		Programovatelné relé 1 - porucha
21		Programovatelné relé 2 - připraven
25		Programovatelné relé 3 – chod motoru
20, 22, 25		Programovatelné relé – společné napájení diod
26, 27	0 – 20 mA	Analogový výstup 2
28	0 V	Pomocné napájecí napětí – izolovaný zdroj



Obr. 32 – Zapojení ovládání měniče

### 5.3 Fotky přípravku



Obr. 33 – Pohled zepředu



Obr. 34 – Pohled zezadu



Obr. 35 – Zapojování vodičů

## 5.4 Nastavení frekvenčního měniče

Frekvenční měniče řady Micromaster 440 obsahují přibližně 425 nastavitelných parametrů, je tedy zřejmé, že nelze popsat všechny, ale jen ty nejdůležitější. Seznam veškerých nastavitelných parametrů, rozsahu hodnot a hodnoty v továrním nastavení nalezneme v manuálu [8] na straně 303 – 319. Nastavitelné parametry jsou značeny písmenem P. Pracovní parametry, které mají pouze informační úroveň, jsou značeny písmenem r. Význam poruchových a výstražných hlášení také nalezneme v manuálu [8] na straně 281 – 290.

### 5.4.1 Popis některých parametrů měniče

Většina použitých parametrů při nastavování je uvedena na místě použití, kde je i popsána a zde ji nenajdeme z důvodu zbytečné duplicity.

Parametr	Význam	Hodnota
r0000	Zobrazení veličiny nastavené parametrem P0005	-
r0002	Provozní stav měniče	-
P0003	Přístupová práva – čím větší hodnota, tím větší oprávnění	0 - 4
P0004	Filtr parametrů – zvýšení přehlednosti při nastavování	0 - 22
P0005	Veličina zobrazovaná na displeji – lze zobrazit všechny parametry typu r	2 - 4000
P0006	Způsob zobrazení, viz [8, s. 54]	0 - 4

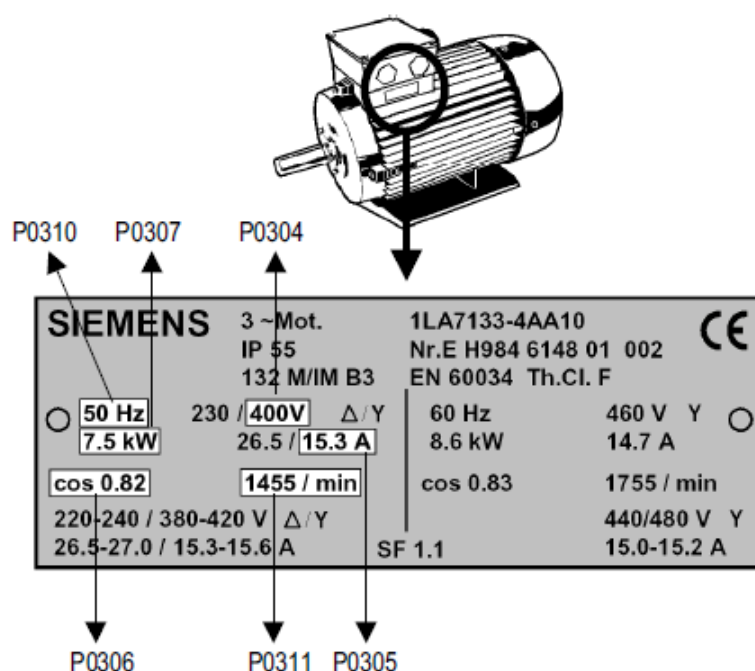
P0014	Způsob ukládání parametru – do paměti RAM (po odpojení napájení je vymazána) nebo EEPROM, při použití panelu se vždy ukládají do EEPROM	0 a 1
P290	Chování měniče při přetížení 2 = snížení spínacího a výstupního kmitočtu	0 - 3
P0295	Prodleva vypnutí ventilátoru měniče	0 – 3600 s
P0300 – r0396 se týkají motoru, jsou popsány v následujícím oddílu.		
P0400	Snímač otáček 0 = bez snímače	0 - 2
P0601	Teplotní snímač motoru 0 = motor nemá teplotní snímač, teplota je počítána	0 - 2
P1101	Pásmo rezonančního kmitočtu	0 – 10 Hz
P1120	Doba rozběhu motoru do maximální frekvence	0 – 650 s
P1121	Doba doběhu motoru z maximální frekvence do nuly	0 – 650 s
P1230	Zdroj povelu stejnosměrného brzdění	0 - 4000
P1232	Proud stejnosměrného brzdění	0 – 250 %
P1237	Max. zatížení brzděného odporu	0 - 5
P1240	Regulátor ss meziobvodu – aktivní/neaktivní	0 - 3
r1242	Spínací úroveň max. napětí ss meziobvodu	-
P1311	Zvýšení napájecího napětí motoru při rozběhu	0 – 100 %
P1800	Spínací kmitočet tranzistorů	2 – 16 kHz
P1910	Tímto parametrem se zapíná měření parametrů motoru 0 = vypnuto 1 = zapnuto měření všech parametrů	0 - 20

Zdroj: [8]



## 5.4.2 Rychlé uvedení do provozu

Při každém novém zapojení přípravku je potřeba zkontrolovat a nastavit štitkové údaje motoru. Měníč je od výroby nastaven na použití se standardními čtyřpólovými motory od firmy SIEMENS, stejného jmenovitého výkonu, jako je frekvenční měnič. V případě použití motorů jiných výrobců je třeba nastavit parametry P0300 až P0311. Význam některých z nich i s jejich zápisem na štítku je zobrazen na Obr. 36. Přístup k těmto parametrům je možný po nastavení P0004 = 4 a P0010 = 1. [8, s. 36]



Obr. 36 – Nejdůležitější štitkové parametry motoru, zdroj: [8]

### Podrobný postup rychlého nastavení:

Hodnoty parametrů jsou upraveny pro náš přípravek, nejsou popsány všechny možnosti nastavení parametrů, ale pouze ty, které připadají v úvahu.

P0003 = 3	Uživatelská přístupová práva
P0004 = 4	Filtr parametrů
P0010 = 1	Parametr uvádění do provozu 1 = rychlé uvedení do provozu
P0100 = 0	Provoz – 0 = Evropa 50 Hz Při nastavení 0 nebo 1 je rozhodující poloha přepínače pod panelem

P0205 = 0	<p>Charakteristika zátěže</p> <p>0 = lineární zatěžovací moment</p> <p>1 = kvadratický zatěžovací moment</p>
P0300 = 1	<p>Typ pohonu</p> <p>1 = asynchronní</p> <p>2 = synchronní (povoleny jsou pouze U/f režimy řízení.)</p>
P0304 = 380	Jmenovité napětí motoru [V]
P0305 = 3,6	Jmenovitý proud motoru [A]
P0307 = 1,5	Jmenovitý výkon motoru [kW]
P0308 = 0,82	Jmenovitý účinník ( $\cos\varphi$ )
P0309 = 0	Jmenovitá účinnost motoru. Je-li nastaveno na 0, hodnota je automaticky dopočítána, aniž by bylo nutné zasahovat.
P0310 = 50	Jmenovitý kmitočet motoru [Hz]
P0311 = 1410	Jmenovité otáčky motoru [ot/min]
P0320 = 0	Magnetizační proud motoru [%] vzhledem k parametru P0305 – jmenovitému proudu.
P0335 = 0	<p>Chlazení motoru</p> <p>0 = vlastní chlazení (ventilátor je umístěn na hřídeli motoru)</p> <p>1 = vynucené chlazení (samostatně napájený ventilátor)</p>
P0640 = 150	<p>Maximální přetížení motoru [%] vzhledem k parametru P0305</p> <p>Definuje meze maximálního proudu jako [%] ze jmenovitého proudu. Hodnota je nastavena na základě parametru P0205. Pro konstantní moment 150 % a pro kvadratický 110 %</p>
P0700 = 2	<p>Výběr způsobu ovládní</p> <p>1 = tlačítka na panelu</p> <p>2 = vstupní svorky</p>

P1000 = 2	Výběr zdroje žádané hodnoty kmitočtu 1 = tlačítka na panelu 2 = analogový vstup 12 = analogový vstup hlavní, tlačítka na panelu – úprava hodnoty
P1080 = 0	Minimální kmitočet [Hz] na kterém může motor pracovat, bez ohledu na žádanou hodnotu, platí pro oba směry
P1082 = 50	Maximální kmitočet [Hz] na kterém může motor pracovat, bez ohledu na žádanou hodnotu, platí pro oba směry
P1120 = 10	Doba rozběhu motoru [s] z nuly na maximální kmitočet, při nastavení příliš krátkého času dojde k chybě – překročení proudu
P1121 = 10	Doba doběhu motoru [s] z maximálního kmitočtu na nulu, při nastavení příliš krátkého času dojde k chybě – překročení proudu nebo přepětí meziobvodu
P1135 = 5	Doba doběhu motoru po povelu VYP3 [s] – rychlé zastavení motoru
P1300 = 0	Režimy řízení motoru, možné nastavení je uvedeno v oddílu: 4.4
P1500 = 0	Výběr zdroje žádané hodnoty momentu 0 = bez hlavní hodnoty 2 = analogový vstup
P1910 = 0	Identifikace parametrů motoru – slouží k automatickému nastavení
P1960 = 0	Optimalizace regulátoru otáček – pouze pro vektorové řízení s uzavřenou smyčkou (P1300 = 20 nebo 21), aktivní při nastavení P1960 = 1 0 = neaktivní
P 3900 = 1	Ukončení uvedení měniče do provozu 0 = ukončení bez výpočtu nastavení motoru 1 = výpočet nastavení motoru a vymazáním všech parametrů, které nejsou součástí tohoto rychlého nastavení 3 = pouze výpočet nastavení motoru

[8, s. 36-38]

Po nastavení spustit pohon a zkontrolovat, zda se rozbíhá plynule, pokud ne, je třeba zvýšit počáteční hodnotu napětí, pokud je rozběh vizuálně v pořádku, je třeba kontrolovat velikost počátečního proudu.

### 5.4.3 Nastavení vstupů a výstupů

Kromě rychlého nastavení je potřeba nastavit chování vstupů a výstupů měniče. Nastavení analogových výstupů je popsáno v odstavci: 5.2.2. Tedy nastavením parametru P0771[0] a P0771[1]. Například na hodnoty 25 a 27, na výstupní napětí a proud. Přitom je důležité znát referenční hodnoty, těmi jsou parametry P2001 a P2002. Proud je automaticky nastaven na dvojnásobek jmenovité hodnoty motoru. Pokud je veličina na analogovém výstupu shodná s referenční hodnotou, ampérmetr bude ukazovat 20 mA. P2000 je referenční kmitočet, který je shodný s maximální žádanou frekvencí analogovým vstupem.

Stavové relé – reaguje změnou stavu na nastavenou událost, měnič obsahuje celkem tři tyto relé. Jedno pouze se spínacím kontaktem a dvě s přepínacím. Vzhledem k tomu, že jsme nevymysleli jiné využití, signalizují tyto tři stavy: porucha, chod motoru a připraven k provozu.

Tab. 6 – Nastavení stavových relé [8, s. 95]

Parametr	Funkce	Označení a umístění relé
P0731 = 52.3	Porucha	RL1 18/19/20
P0732 = 52.0	Připraven k provozu	RL2 21/22
P0733 = 52.2	Chod motoru	RL3 23/24/25

Digitální vstupy – měnič jich obsahuje celkem 6, první tři používáme v továrním nastavení pro start motoru, reverzaci chodu a nulování poruchy. Pro další tři nemáme žádné vhodné využití, proto zůstávají nezapojeny. Další možná nastavení jsou: krokování, rychlé zastavení, externí porucha a pevné nastavení frekvence, které nelze kombinovat s analogovým vstupem.

### 5.4.4 Brzdění

Brzdit lze stejnosměrně, generátoricky a kombinovaně. První dvě metody jsou popsány v kapitole: 2.9, nastavujeme je parametry P1230 – P1236. Při kombinovaném brzdění se tyto dvě metody střídají, část energie, kterou jsme získali v generátorickém režimu použijeme k brzdění stejnosměrným proudem. Motor se bude více zahřívát, ale napětí meziobvodu nebude tak vysoké. Měnič obsahuje na vstupu neřízený diodový usměrňovač, proto rekuperace není možná. Pro nastavení brzdění do odporníku stačí změnit parametr:

P1237 = ...	0 = brzdňý odporník není připojen
	1 = zatížení 5 %
	2 = zatížení 10 %
	3 = zatížení 25 %
	4 = zatížení 50 %
	5 = zatížení 100 %

Hodnota parametrů vyjadřuje maximální střední střihu zatížení odporníku. Parametr slouží jako ochrana před přetížením odporníku. Brzdňý tranzistor spíná s konstantní frekvencí 2 kHz. Při dosažení více jak 95% z nastavené hodnoty na dobu delší než 12 s dojde k hlášení poruchy. Výrobce doporučuje odporník o velikosti 380 Ω.

#### 5.4.5 Tovární nastavení

Pokud při nastavování měniče udělá uživatel chybu, kterou nemůže identifikovat, nebo už byl měnič v minulosti nastaven a uživatel nezná parametry, které byly změněny, je tu možnost návratu k továrnímu nastavení, tím dojde k přepsání všech nastavených parametrů na tovární z nepřepisovatelné paměti.

##### Postup návratu k továrnímu nastavení:

P0003 = 1	Uživatelská přístupová práva 3 = standardní
P0004 = 0	Filtr parametrů 1 = všechny parametry
P0010 = 30	Parametr uvádění do provozu 30 = tovární nastavení
P0970 = 1	Návrat k továrnímu nastavení parametrů 1 = přepsání parametrů továrním nastavením
buSY	Přibližně na 10 s dojde k vypsání nápisu buSY, během kterých dojde ke změně nastavení, poté ukončení nabídky nastavení.

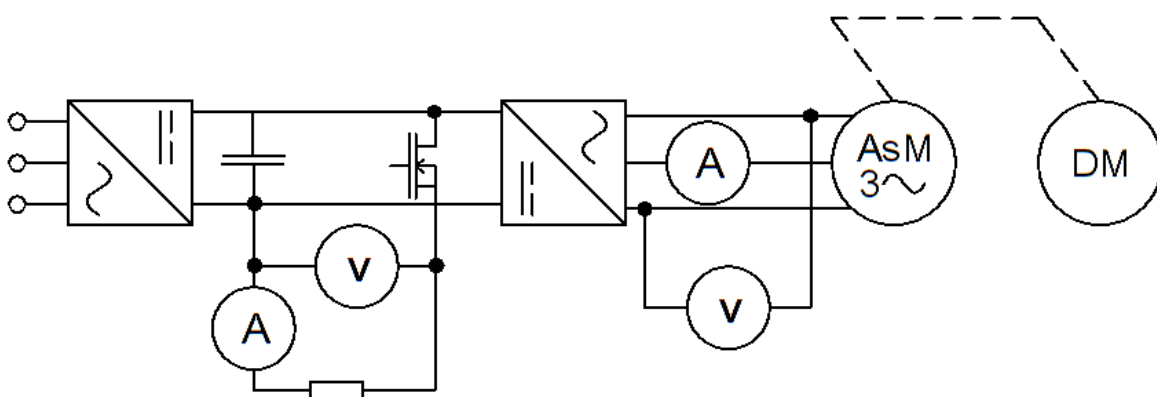
[8, s. 44]

## 6 Měření

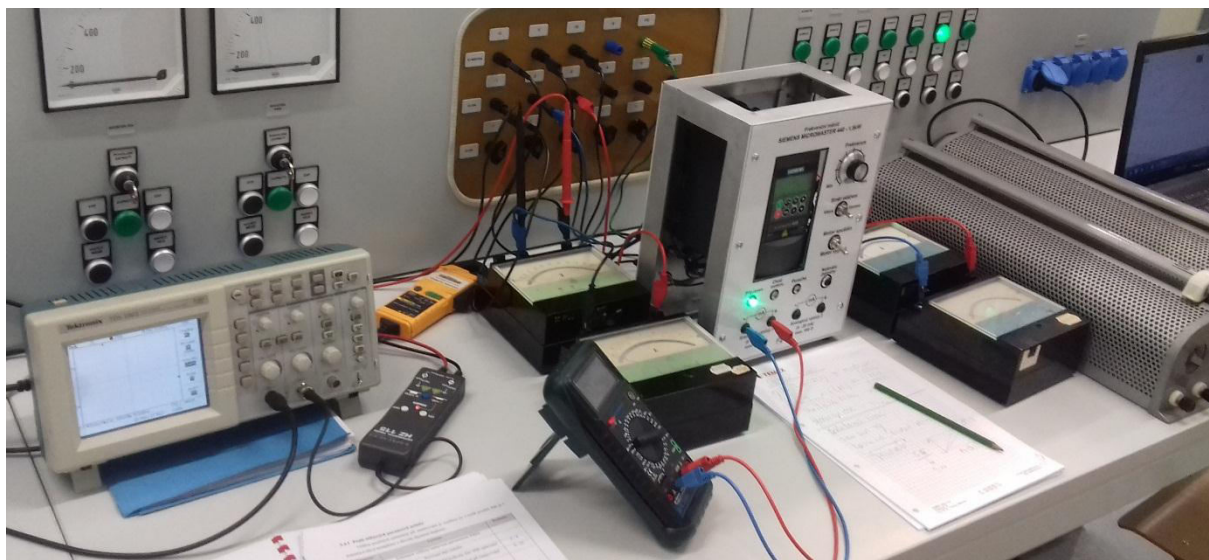
V této kapitole se věnujeme praktickému měření na vyrobeném přípravku.

### 6.1 Příprava pracoviště

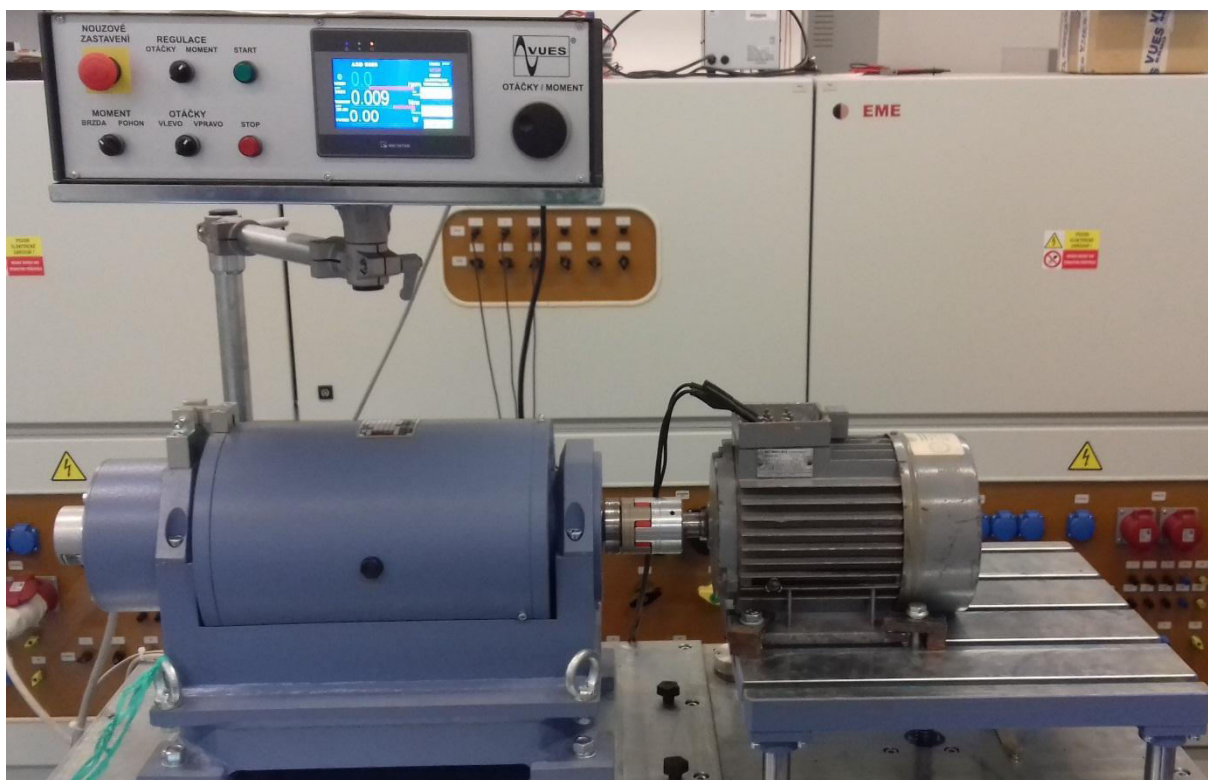
Zapojení pracoviště reprezentuje následující schéma. Na odporník jsou připojeny magneoelektrické měřicí přístroje reagující na střední hodnotu veličiny. Na motoru jsou elektromagnetické přístroje, které měří efektivní hodnotu, jsou tedy vhodné i na střídavé průběhy. Většinu změřených hodnot jsme odečítali přímo z panelu měniče a analogové přístroje sloužily jako kontrolní.



Obr. 37 – Schéma zapojení pracoviště



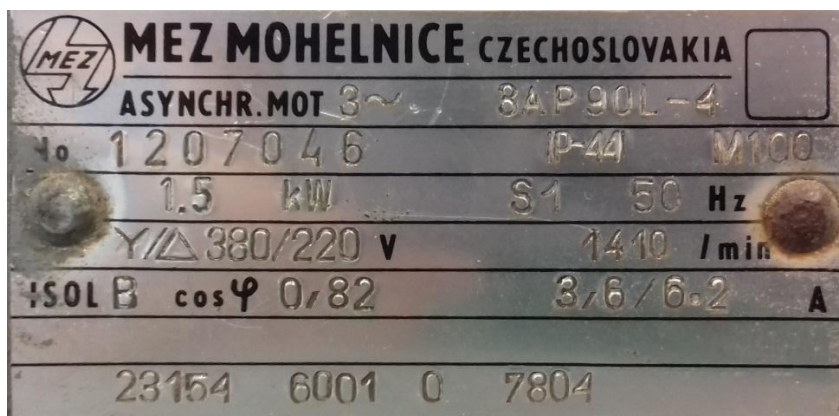
Obr. 38 – Zapojené pracoviště



Obr. 39 – Měřené soustrojí

### Použité přístroje

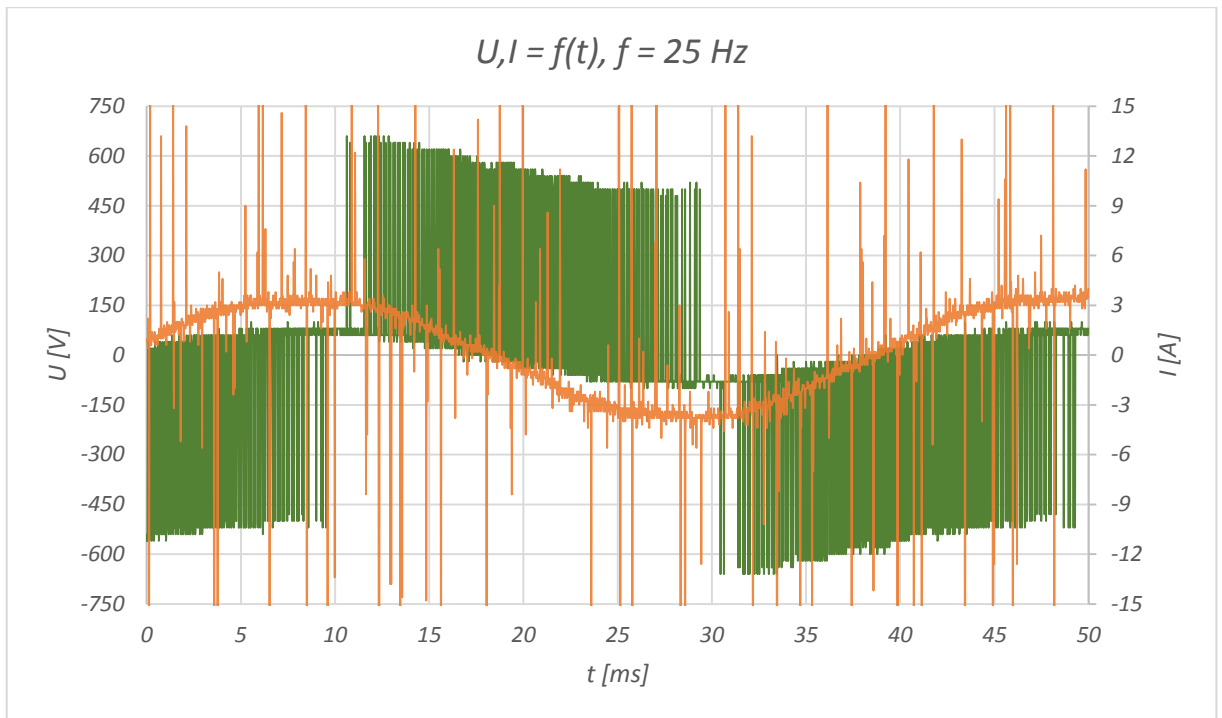
- Třífázový asynchronní motor 3AP90L-4, viz Obr. 40
- As. Dynamometr ASD6000 7kW
- Osciloskop Tektronix, digitální
- Napěťová sonda osciloskopu HZ115 1/1000
- Proudové kleště Fluke i301s 10mV/A
- Digitální multimetr MY-64
- Analogový ampérmetr a voltmetr elektromagnetický - motor
- Analogový ampérmetr a voltmetr magnetoelektrický - odporník



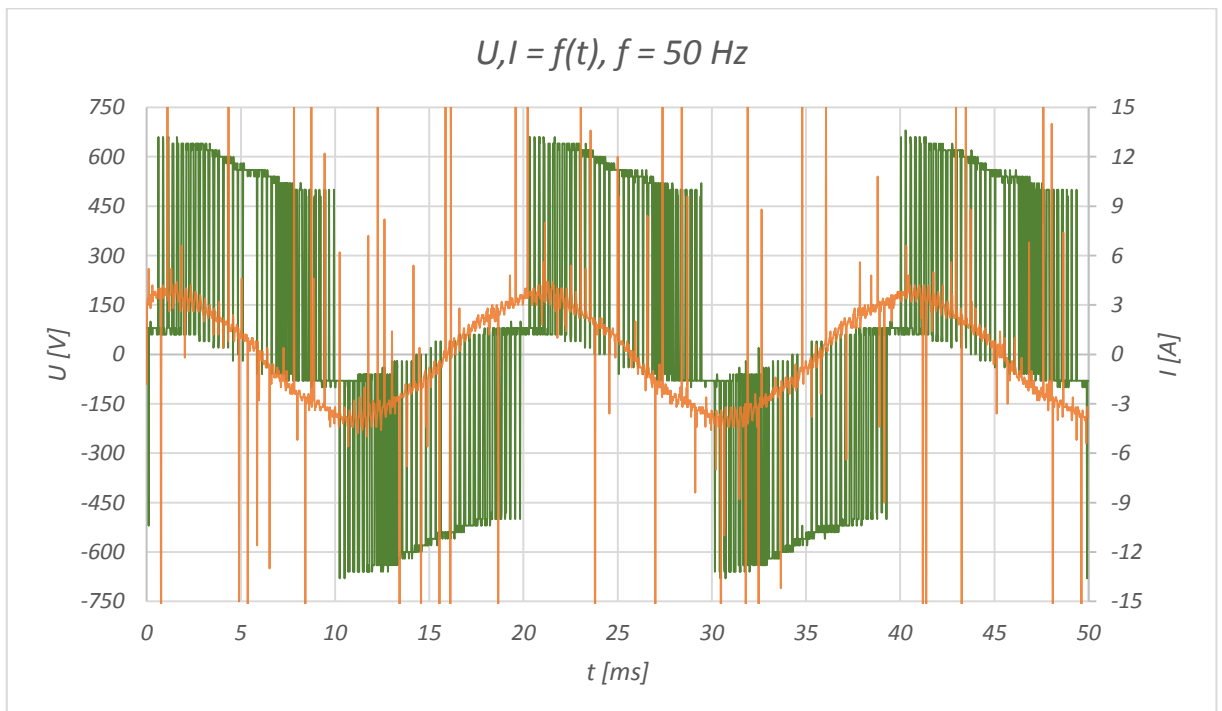
Obr. 40 – Štítek měřeného motoru

## 6.2 Měření osciloskopem

Pomocí napěťové a proudové sondy připojené k osciloskopu jsme změřili průběh napětí a proudu v jedné fázi motoru při třech frekvencích, při 25, 50 a 75 Hz. Motor byl v motorickém režimu s konstantní zátěží asi 3 Nm. Tyto průběhy jsou na následujících třech grafech.

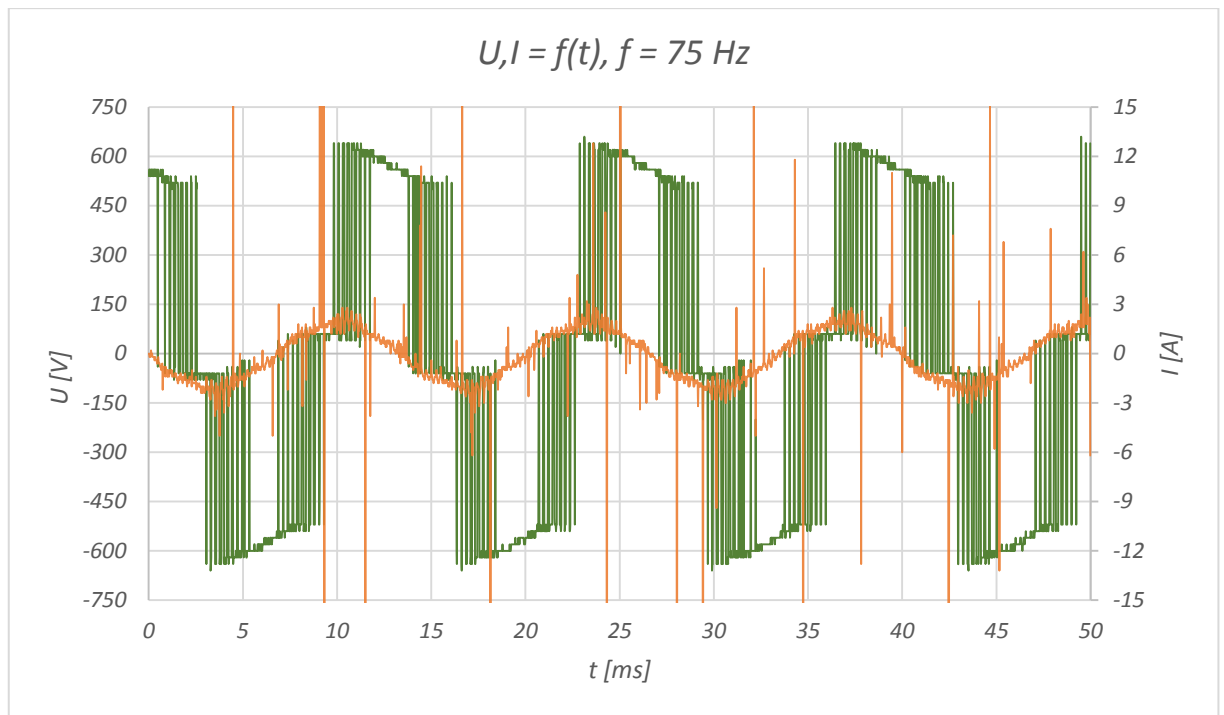


Graf 1 – Napětí a proud při 25 Hz



Graf 2 – Napětí a proud při 50 Hz





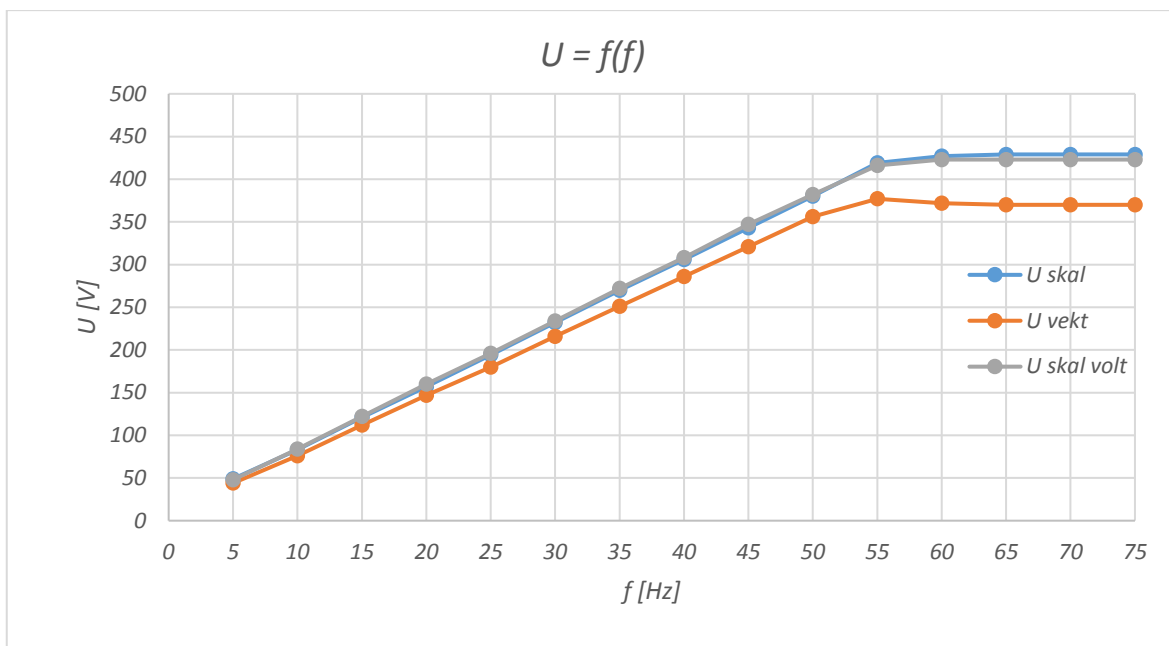
*Graf 3 – Napětí a proud při 75 Hz*

Napětí je zobrazeno zeleně a proud oranžově. Grafy jsou na stejně dlouhém časovém úseku a to 50 ms, rozsahy os jsou také stejné. Při frekvenci 75 Hz je tranzistor střídače na okamžik otevřen bez přerušení, šířka pulzu PWM dosáhla maxima a motor je napájen napětím meziobvodu. Jedná se o odbuzení.

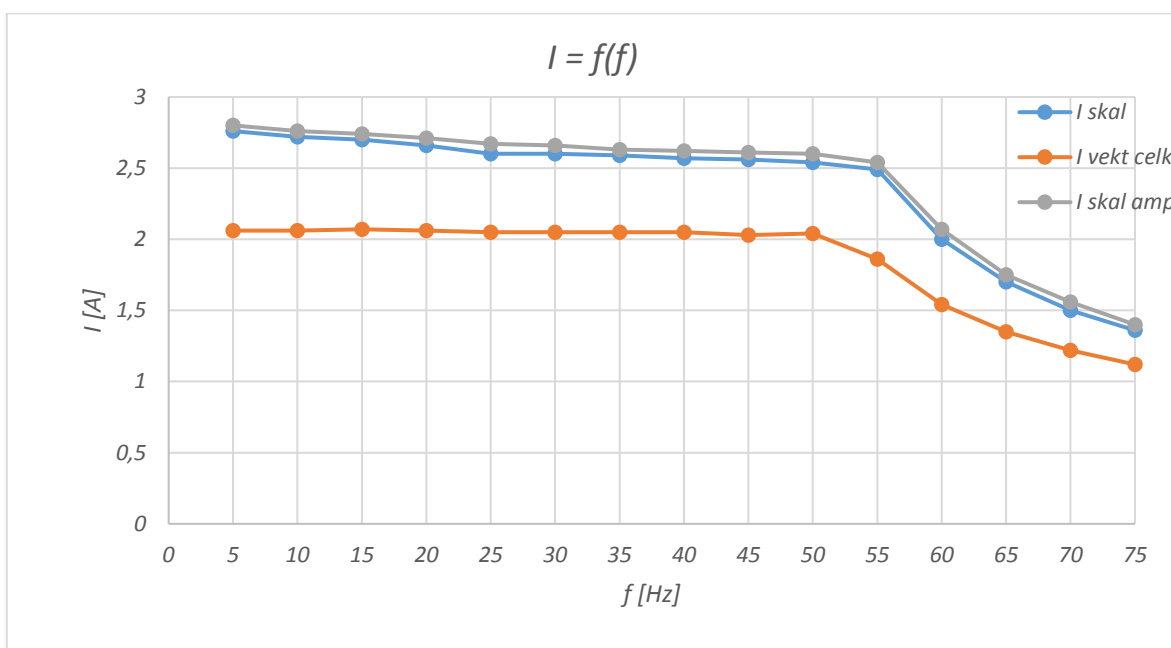
### 6.3 Změřené hodnoty v grafech

#### 6.3.1 $M_z = \text{konst.} = 0 \text{ Nm}$

Při prvním měření je zatěžovací moment nulový, motor je brzděn pouze vlastními ztrátami. Moment motoru je malý, a je otáčkově závislý. Nezávislou proměnou je frekvence. Napětí a proud při vektorovém řízení je změřen dvakrát. Křivky označené volt. a amp. představují hodnoty změřené analogovými měřicími přístroji. Tímto způsobem jsme si ověřili, že veličinám zobrazeným na displeji měniče můžeme věřit, odchylka je malá. Rozdíl hodnot je ovlivněn zaokrouhlením, nepřesností měřících přístrojů a chybou při odečtu hodnoty.



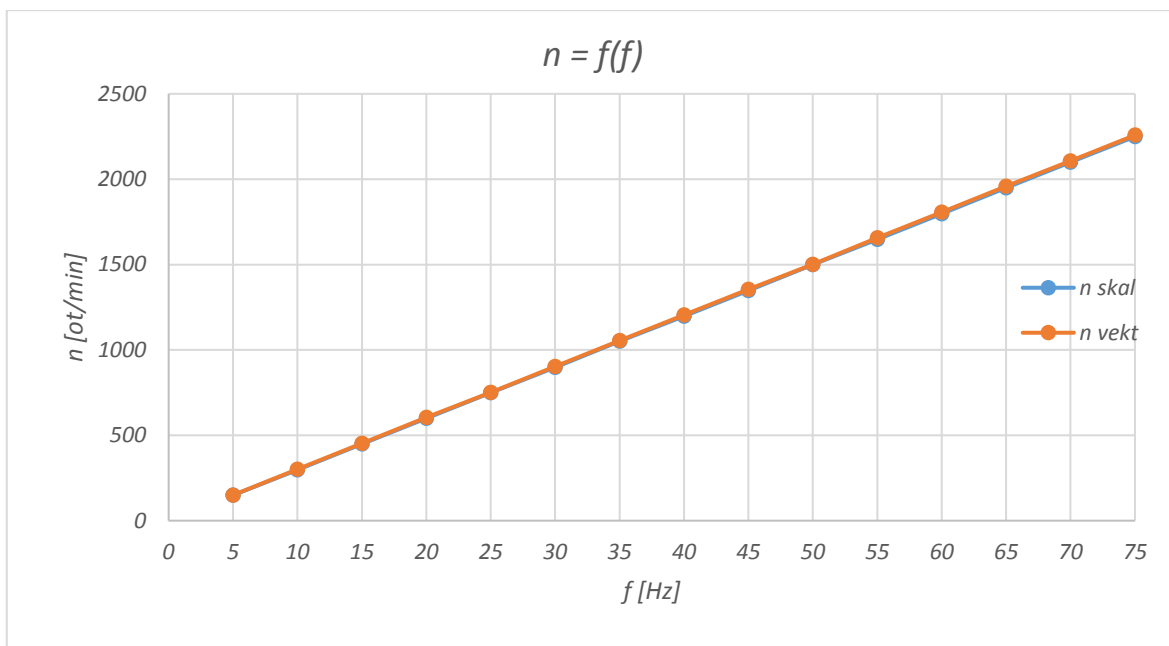
Graf 4 – Závislost napětí na frekvence



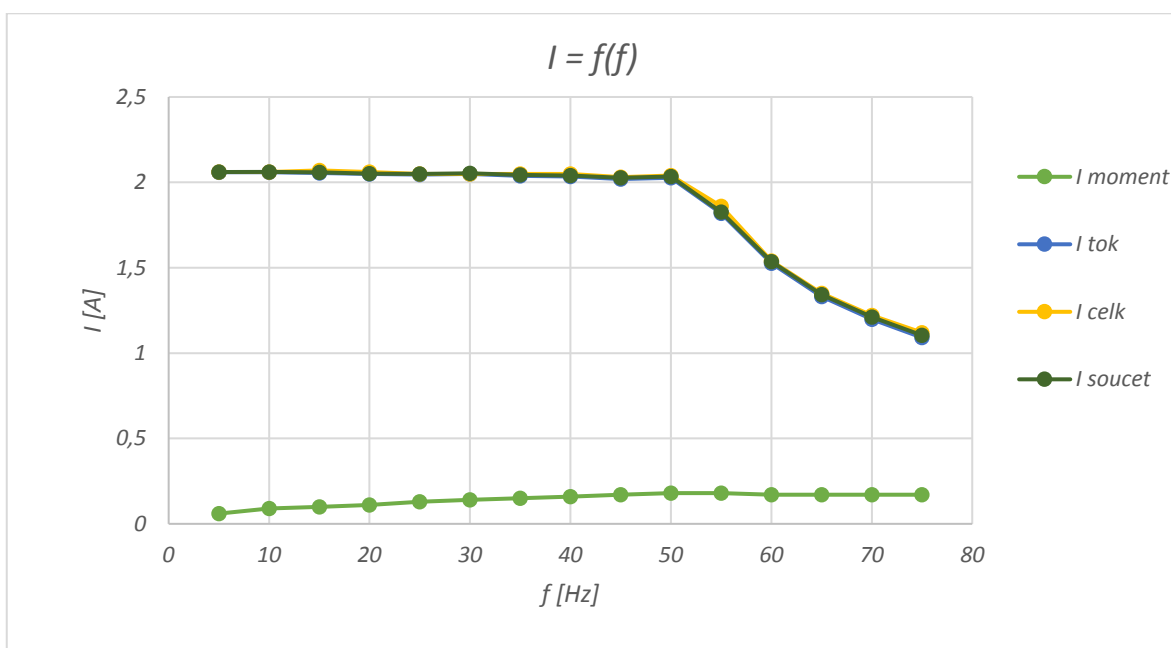
Graf 5 – Závislost proudu na frekvenci

Maximální napětí je u vektorového řízení trochu menší, ale nás zajímá hlavně proud, který je znatelně menší. Motor není zatížen a vektorové řízení zajistí, že skoro všichni proud tekoucí motorem zajišťuje magnetizaci. Tento budící proud je o něco málo větší, než 2 A. Rozložení proudů je v Graf 7.

Otáčky na prázdnou jsou téměř shodné.



Graf 6 – Závislost otáček na frekvenci

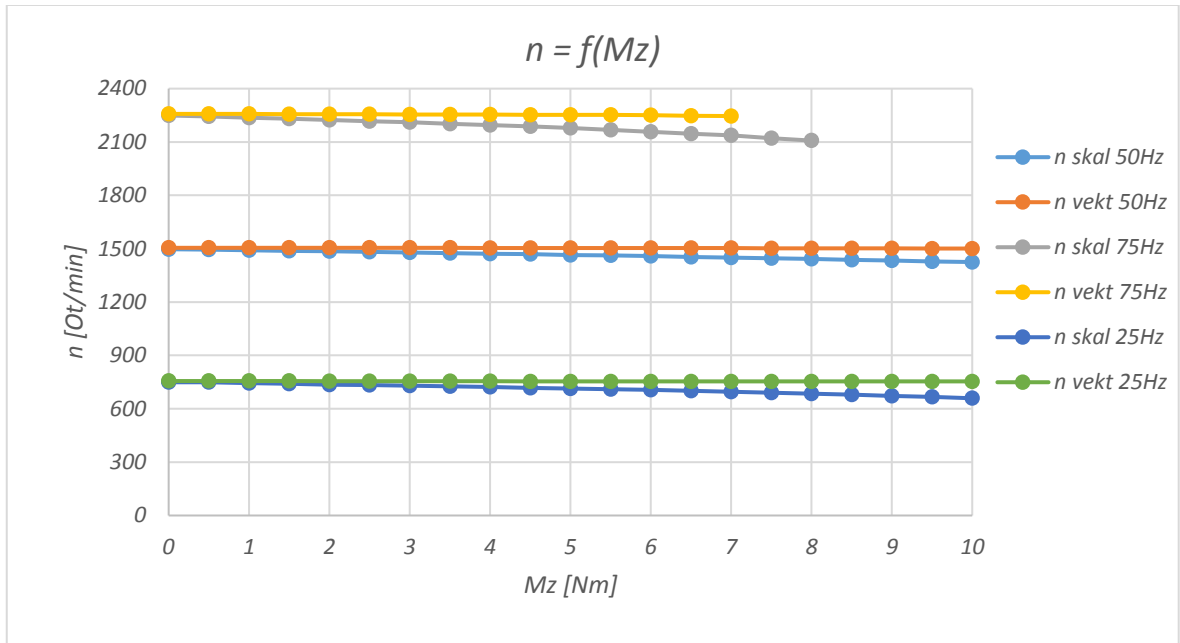


Graf 7 – Vektorové řízení - rozložení proudů

Proud vytvářející moment je minimální, a proud vytvářející magn. tok je téměř totožný s proudem celkovým, protože vektory proudů jsou vůči sobě pootočený o  $90^\circ$ . Jedná se o součet druhých mocnin pod společnou odmocninou, proto je momentová složka zanedbatelná.

$I_{\text{celk}}$  je označen proud zobrazený měničem a proud  $I_{\text{soucet}}$  je proud vypočítaný. Tyto dva proudy by měly být totožné. To se i potvrdilo.

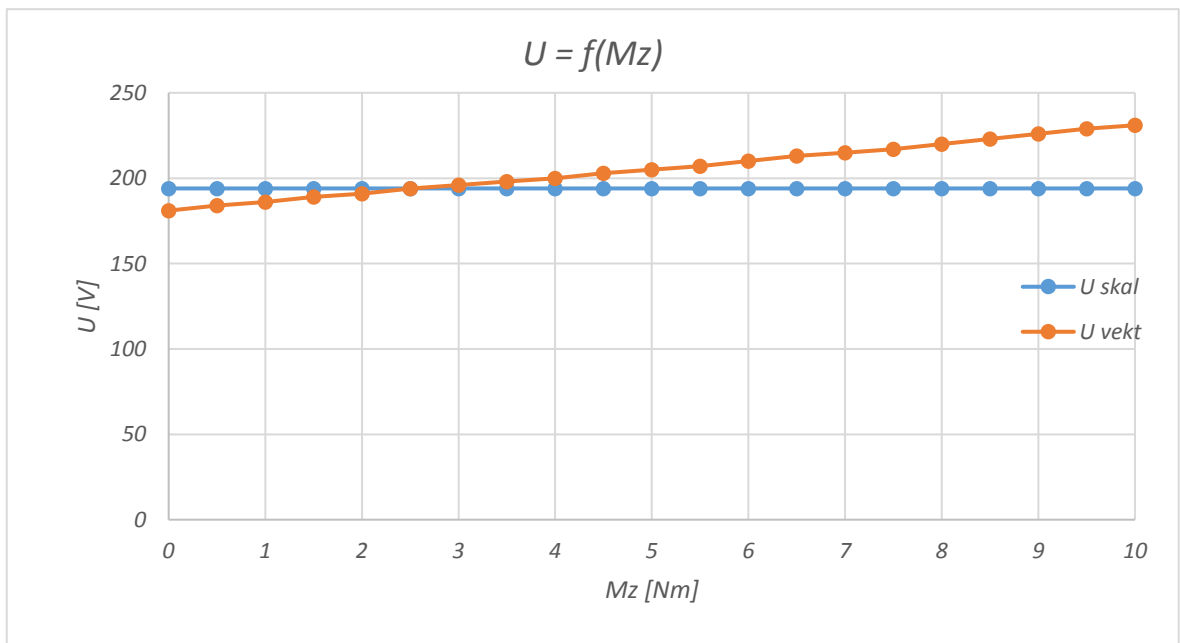
### 6.3.2 $f = \text{konst.}$



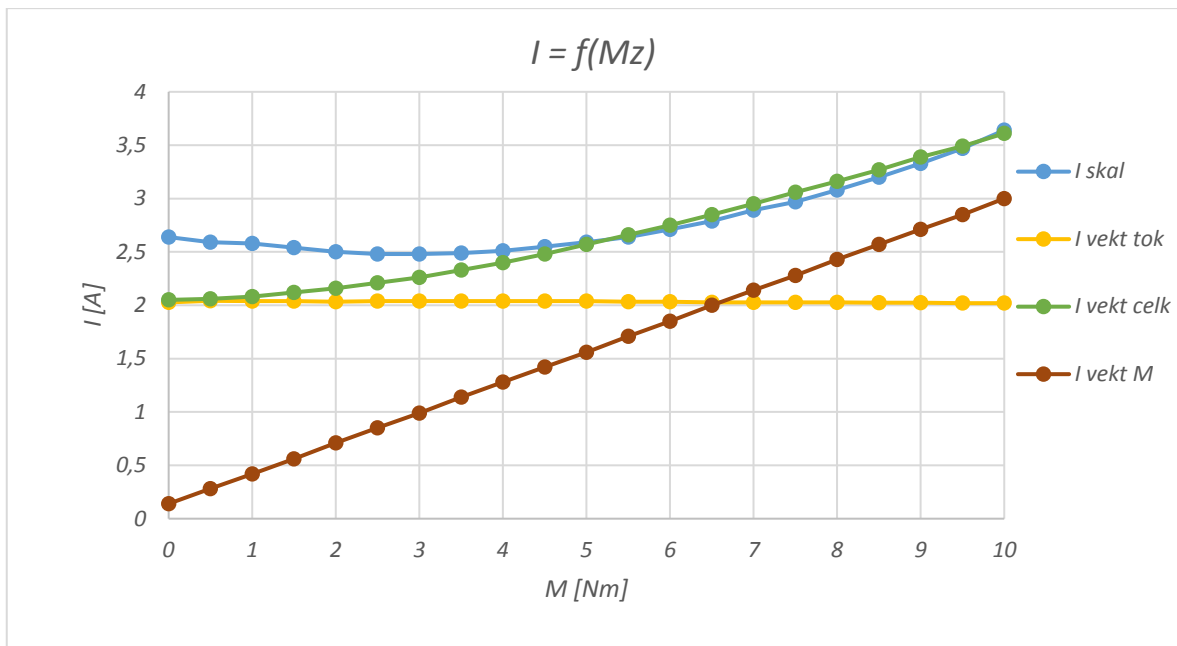
Graf 8 – Pokles otáček při zatížení

Pro vektorové řízení je zatěžovací charakteristika téměř přímkou, pokles je pouze o několik ot/min. Zatímco u skalárního řízení o několik desítek až k jednomu stu. Musíme si však uvědomit, že byla vypnuta kompenzace skluzu, ta by skalárnímu řízení zlepšila výsledky. Stejně tak vektorové řízení by vylepšil snímač otáček.

### 6.3.3 $f = \text{konst.} = 25 \text{ Hz}$



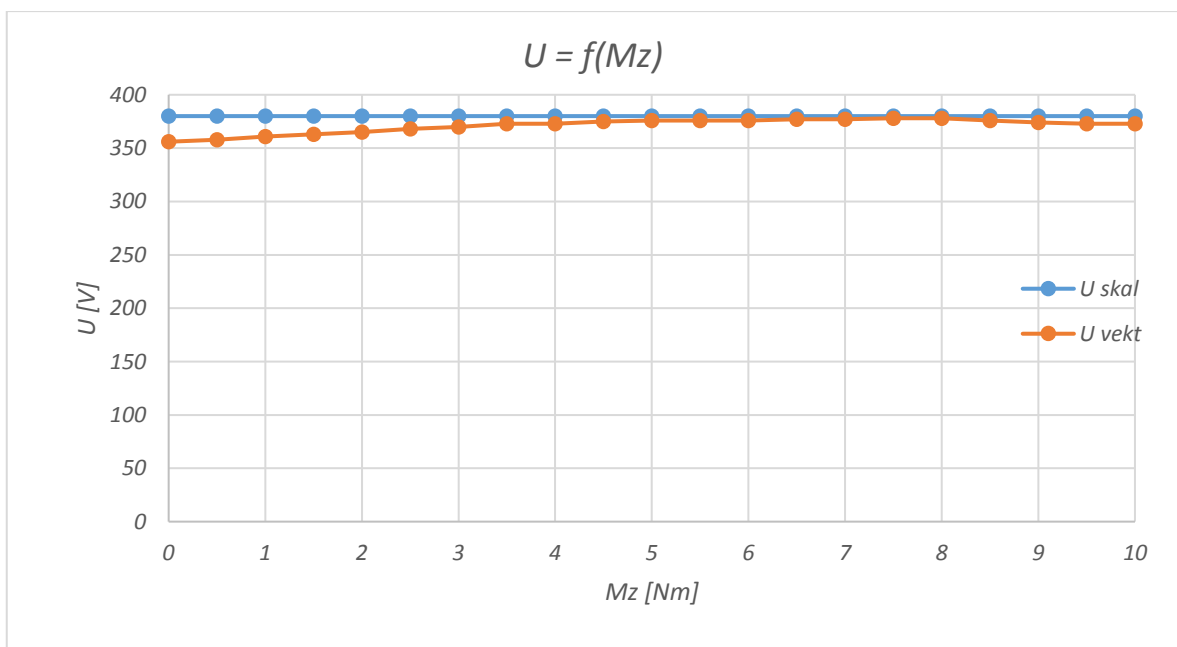
Graf 9 – Napěťová charakteristika pro 25 Hz



Graf 10 – Proudová charakteristika při 25 Hz

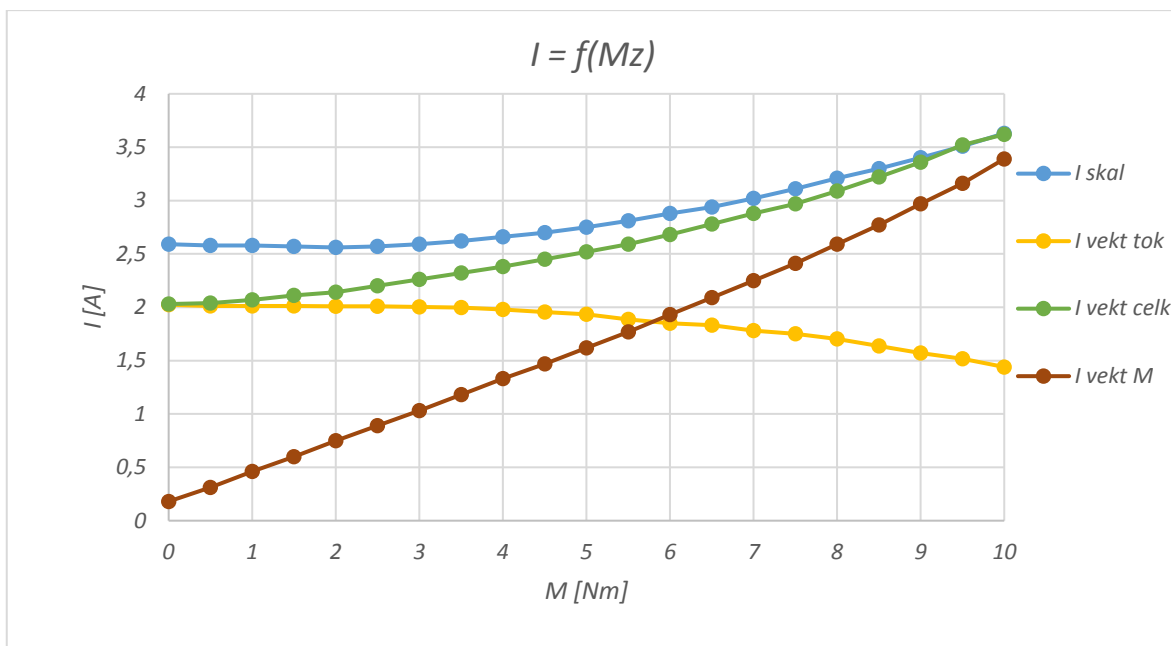
Momentotvorná složka proudu roste lineárně se zátěží, tokotvorná zůstává konstantní. Celkový proud pro skalární a vektorové řízení při zatížení je v tomto případě srovnatelný. Napětí skalárního řízení je konstantní, vektorové lineárně roste.

### 6.3.4 $f = \text{konst.} = 50 \text{ Hz}$



Graf 11 – Napětíová charakteristika pro 50 Hz

Napětí u skalárního řízení je přesně 380 V, u vektorového nejdříve opět roste a potom se ustálí na o něco nižší hodnotě.

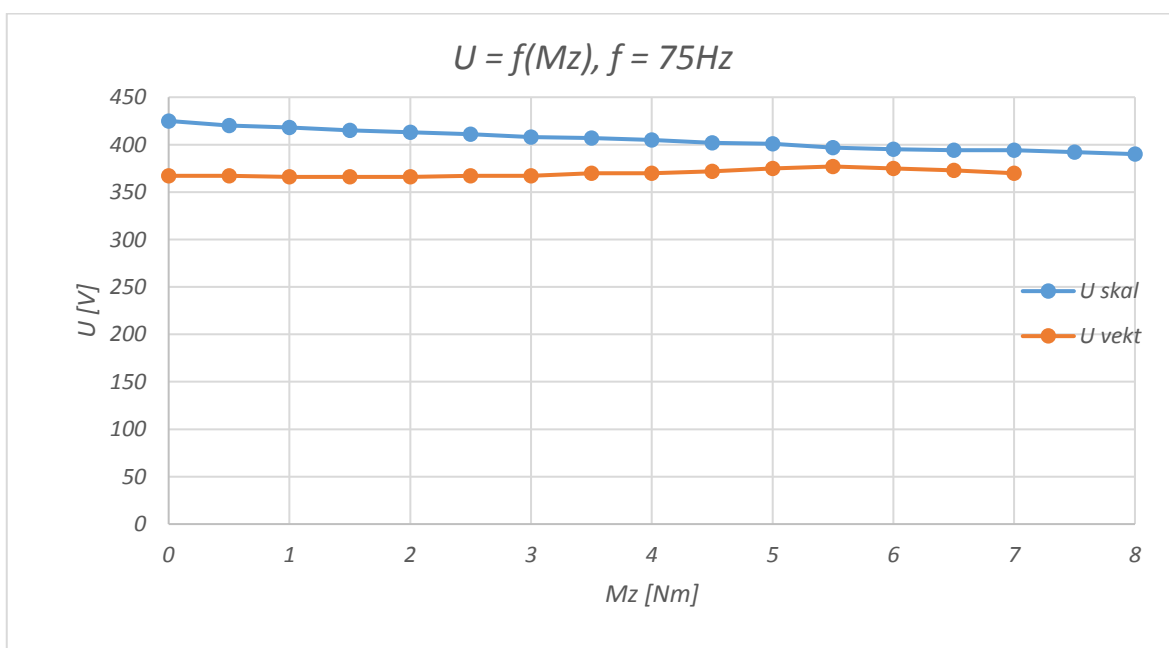


Graf 12 – Proudová charakteristika při 50 Hz

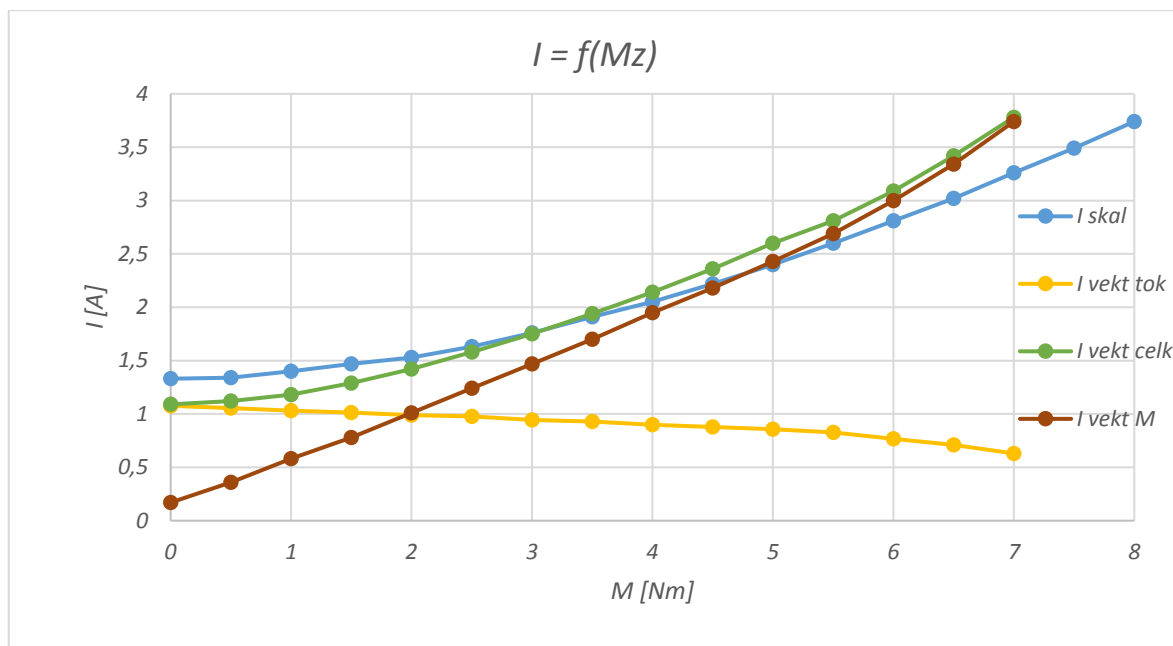
Při jmenovité frekvenci je velikost proudu příznivější pro vektorové řízení téměř až do jmenovitého proudu. Momentová složka proudu opět roste lineárně se zátěží, ovšem budící začne klesat, proto předpokládám, že je trochu snížena přetížitelnost motoru.

Harmonické proudy jsou důvod, proč při jmenovitém proudu neodebíráme z motoru jmenovitý moment, ale trochu menší.

### 6.3.5 $f = \text{konst.} = 75 \text{ Hz}$



Graf 13 – Napět'ová charakteristika pro 75 Hz



Graf 14 – Proudová charakteristika při 75 Hz

Motor je značně odbuzen, při skalárním řízení je snaha dodat motoru maximální napětí, se zatížením je příkon motoru větší a proto napětí klesá. Napětí u vektorového neklesá, ale je podstatně nižší. Vlivem odbuzení, které je nutné pro větší otáčky, je větší směrnice přímky reprezentující momentovou složku celkového proudu. To způsobí, že v druhé polovině charakteristiky je proud vektorového řízení větší než proud skalárního. Vlivem velkého proudu nebylo možné doměřit vektorové řízení do stejného momentu zatížení.

## 6.4 Závěr měření

Z měření vyplývá, že složitější vektorové řízení není vždy jednoznačně lepší, než řízení skalární to platí hlavně pro zvyšování otáček odbuzením, kde proud vektorového řízení roste příliš rychle. To je cena, za nízký pokles otáček rotoru, při dynamickém momentu zátěže budou jeho otáčky při všech frekvencích vždy stabilnější. Při skalární řízení se můžeme pouze snažit této stabilitě přiblížit vhodným nastavením parametrů.

Z pohledu efektivity jsou do jmenovité frekvence motoru při jmenovitém proudu obě metody srovnatelné, ovšem při malém zatížení jasně vítězí vektorové řízení. Při stejném momentu zátěže je proud vektorového řízení menší, to znamená větší účinnost. Otáčky jsou přitom dokonce o malinko větší, takže můžeme říct, že při větším výkonu má motor menší příkon.

## **Závěr**

Práce je zaměřena na podrobné seznámení s měniči, jejich konstrukcí a možnostmi, včetně konkrétního měniče SIEMENS MICROMASTER 440 a jeho nastavení.

Hlavní cíl, zkonstruovat přípravek byl splněn a během měření byla ověřena jeho kompletní funkčnost. Samotný návrh vzhledu a rozměrů byl několikrát změněn, proto byl zdouhavý, ale myslím, že se nakonec povedl. Výrobu přípravku jsem provedl sám, vlastnoručně, až na úkony, pro které je třeba speciálního vybavení, které nevlastním.

Nově zkonstruovaný přípravek je vhodný pro měření při skalárním i vektorovém řízení, při různém nastavení. Na ovládacím panelu je zobrazeno celkem pět veličin, výstupní frekvence, proud, napětí a napětí stejnosměrného obvodu plus jedna volitelná a k tomu dva analogové výstupy. Pouze měničem lze měřit až 7 veličin současně, proto je velice vhodný pro školní účely. Přípravek je oživený, přenastavený a plně funkční. Všechny cíle práce jsou tak splněny.



## Použitá literatura

- [1] ZOUBEK, Zdeněk a Jiří MĚŘIČKA. Elektrické stroje. Dotisk 1. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00373-6.
- [2] PAVELKA, Jiří. Elektrické pohony. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 222 s. ISBN 978-80-01-03588-7.
- [3] PAVELKA, Jiří, Zdeněk ČEŘOVSKÝ a Jiří LETTL. Výkonová elektronika. Dotisk 3. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2009, 227 s. ISBN 978-80-01-03626-6.
- [4] KOBRLE, Pavel. Frekvenční měniče [online]. Ústí n. L., 8 s. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: [http://p.kobrlle.sweb.cz/pohony/frekv\\_m.pdf](http://p.kobrlle.sweb.cz/pohony/frekv_m.pdf).
- [5] ČERNÍK, Martin. Výkonová elektronika. Liberec: Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-7494-160-3. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18325132-Vykonova-elektronika-martin-cernik.html>.
- [6] Příklady odrušení. ELFIS [online]. Praha: GrowJOB, c2005-2017 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://www.elfis.cz/shop/products/odrusovaci-filtry%2C-supress-filters/priklady-odruseni/>.
- [7] SEW EURODRIVE Příručka pro školení: Základy\_MDX\_1. [Hradec králové], 1999, 50 s. [cit. 2017-05-80].
- [8] SIEMENS MICROMASTER 440 120 W až 75 kW: Návod k obsluze a údržbě [online]. Praha, 2003, 322 s. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: [http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data\\_files/technika\\_pohonu/menice/stridave\\_menice/nizkonapetove\\_menice/micromaster/micromaster\\_440/\\_manualy/opi\\_micromaster\\_440\\_03-2003\\_cz.pdf](http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data_files/technika_pohonu/menice/stridave_menice/nizkonapetove_menice/micromaster/micromaster_440/_manualy/opi_micromaster_440_03-2003_cz.pdf)
- [9] GAJDŮŠEK, Pavel. Přehled metod řízení asynchronních motorů. Elektorevue [online]. Brno: VUT, 2005 [cit. 2017-05-11] Dostupné z: <http://www.elektorevue.cz/clanky/05020/index.html>.
- [10] Druhy regulace frekvenčních měničů. Pohonnatechnika.cz, Peter Vas [online]. c2007-2017 [cit. 2017-05-11] Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/frekvencni-menice/zpusoby-regulace-fm/>.
- [11] SIEMENS data sheet for MICROMASTER 440 [online]. 2016, 2 s. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/spice/docuservice/docuservice?configid=14&docu.mlfb=6SE6440-2UD21-5AA1&docu.inittyp=MLFB&docu.generationtype=VIEW&docu.viewid=PDF&region=DE&language=en&docu.language.locale1=en&docu.language.locale2=en>.
- [12] SIEMENS MICROMASTER 440 120 W až 250 kW: Návod k obsluze – stručný [online]. Praha, 2006, 69 s. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: [http://www.elprim.cz/navody/Siemens\\_MM440/MM440\\_strucny\\_navod.pdf](http://www.elprim.cz/navody/Siemens_MM440/MM440_strucny_navod.pdf).
- [13] TRUNEC, Jiří. Výukové přípravky se softstartery. Pardubice, 2014. Bakalářská práce. Univerzita pardubice. Vedoucí práce Petr Sýkora.

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Zapojení svorkovnice třífázového asynchronního motoru .....	12
Obr. 2 – Princip asynchronního motoru.....	12
Obr. 3 – Náhradní schéma asynchronního motoru .....	13
Obr. 4 – Stav nakrátko .....	13
Obr. 5 – Momentová charakteristika asynchronního motoru .....	15
Obr. 6 – Napěťové a proudové poměry při spouštění asynchronního motoru.....	16
Obr. 7 – Momentová charakteristika při frekvenčním řízení.....	18
Obr. 8 – Mechanická charakteristika při sníženém napětí.....	18
Obr. 9 – Provoz ve čtyřech kvadrantech .....	19
Obr. 10 – Přímý měnič kmitočtu .....	20
Obr. 11 – Schéma nepřímého měniče s napěťovým meziobvodem .....	21
Obr. 12 – Nepřímý měnič s proudovým meziobvodem a řízeným usměrňovačem .....	21
Obr. 13 – Základní náhradní schéma IGBT.....	22
Obr. 14 – Třífázový můstkový napěťový střídač.....	24
Obr. 15 – Třífázový proudový střídač .....	25
Obr. 16 – Sinusová PWM s frekvencí 50 Hz a spínací frekvencí 1,8 kHz.....	26
Obr. 17 – Výstupní napětí a proud pro obdélníkové řízení střídače, zdroj: vlastní měření .....	26
Obr. 18 – Připojení rekuperačního modulu .....	28
Obr. 19 – Nepřímý frekvenční měnič s připojeným odporníkem.....	28
Obr. 20 – Způsob činnosti brzdného spínače.....	29
Obr. 21 – Schéma síťového filtru 3ELF160M a jeho zapojení.....	30
Obr. 22 – Řízení otáček pomocí U/f charakteristiky .....	31
Obr. 23 – Vliv odbuzování na momentovou charakteristiku.....	32
Obr. 24 – Princip enkodéru.....	34
Obr. 25 – Reakce systému na skokovou změnu zatížení.....	35
Obr. 26 – komfortní ovládací panel AOP .....	38
Obr. 27 – Krokování motoru.....	39
Obr. 28 – Lineární a kvadratická charakteristika.....	40
Obr. 29 – Vícebodová charakteristika .....	40
Obr. 30 – Charakteristiky zátěže.....	41
Obr. 31 – Zapojení silových vodičů.....	43
Obr. 32 – Zapojení ovládání měniče.....	45

Obr. 33 – Pohled zepředu .....	46
Obr. 34 – Pohled zezadu .....	46
Obr. 33 – Zapojování vodičů .....	47
Obr. 36 – Nejdůležitější štitové parametry motoru.....	49
Obr. 37 – Schéma zapojení pracoviště.....	54
Obr. 38 – Zapojené pracoviště.....	54
Obr. 39 – Měřené soustrojí .....	55
Obr. 40 – Štítek měřeného motoru.....	55

## **Seznam tabulek**

Tab. 1 – Parametry měniče .....	36
Tab. 2 – Význam ovládacích tlačítek.....	38
Tab. 3 – Popis silových vodičů.....	43
Tab. 4 – Některá možná nastavení analogových výstupů měniče .....	44
Tab. 5 – Popis zapojených ovládacích svorek .....	45
Tab. 6 – Nastavení stavových relé .....	52

## Seznam grafů

Graf 1 – Napětí a proud při 25 Hz .....	56
Graf 2 – Napětí a proud při 50 Hz .....	56
Graf 3 – Napětí a proud při 75 Hz .....	57
Graf 4 – Závislost napětí na frekvence .....	58
Graf 5 – Závislost proudu na frekvenci .....	58
Graf 6 – Závislost otáček na frekvenci .....	59
Graf 7 – Vektorové řízení - rozložení proudů.....	59
Graf 8 – Pokles otáček při zatížení .....	60
Graf 9 – Napěťová charakteristika pro 25 Hz.....	60
Graf 10 – Proudová charakteristika při 25 Hz .....	61
Graf 11 – Napěťová charakteristika pro 50 Hz.....	61
Graf 12 – Proudová charakteristika při 50 Hz .....	62
Graf 13 – Napěťová charakteristika pro 75 Hz.....	62
Graf 14 – Proudová charakteristika při 75 Hz .....	63

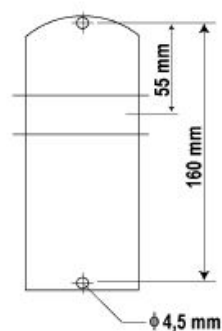
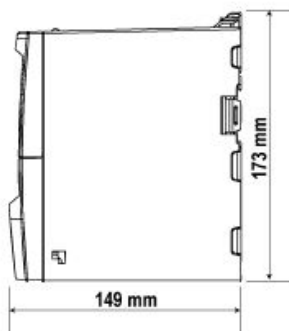
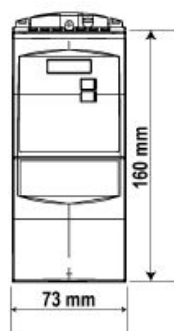
## **Seznam příloh**

Příloha A – Rozměry frekvenčního měniče.....	71
Příloha B – Rozměry nařezaných L profilů .....	71
Příloha C – Výkres svařené konstrukce .....	72
Příloha D – Výrobní výkres předního panelu .....	73
Příloha E – Výrobní výkres zadního panelu .....	74
Příloha F – Kompletní blokové schéma frekvenčního měniče SIEMENS.....	75
Příloha G – Změřené hodnoty.....	76
Příloha H – CD s elektronickou dokumentací	

## Přílohy

Příloha A – Rozměry frekvenčního měniče, zdroj: [8]

velikost A

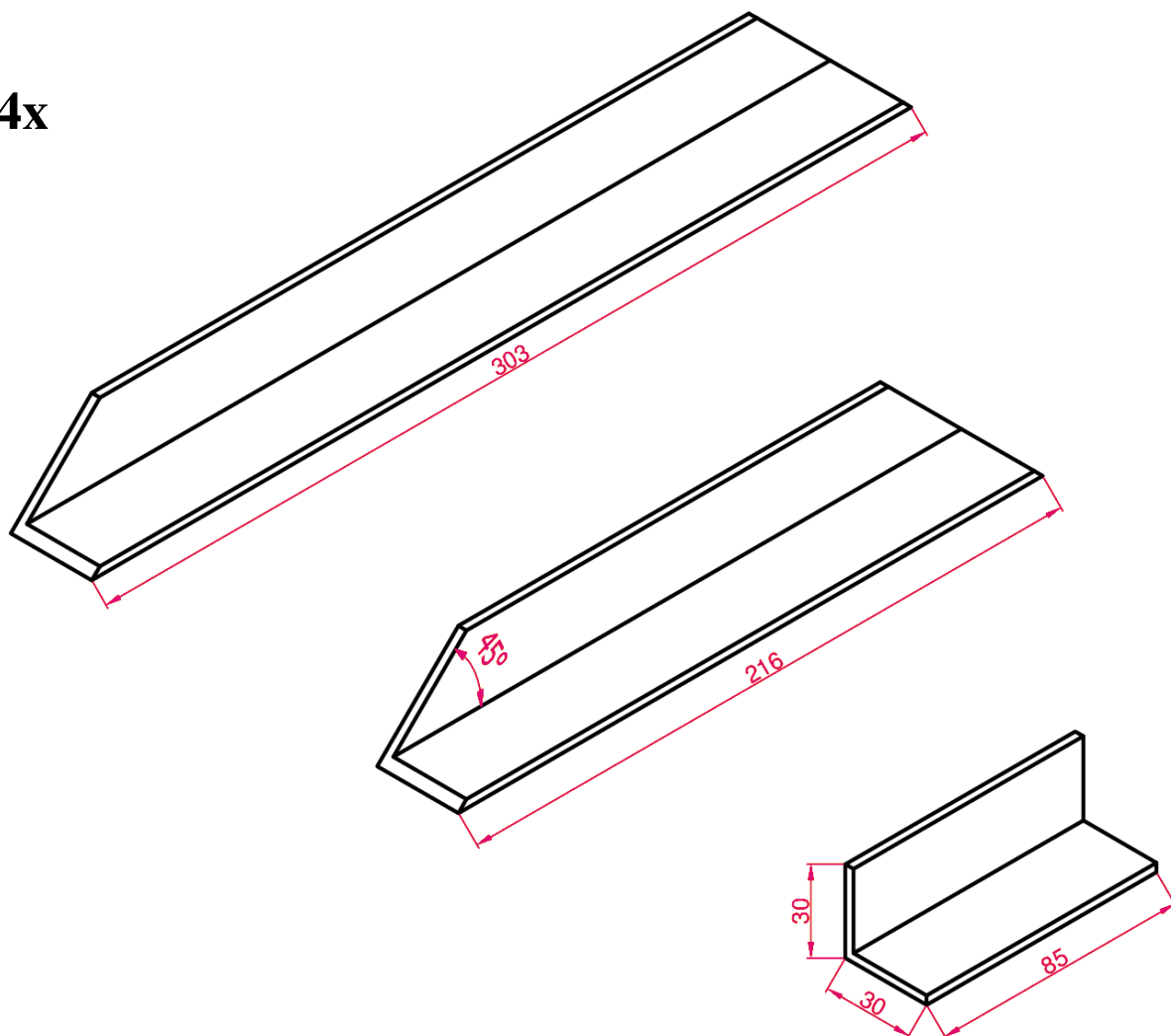


k montáži budete potřebovat

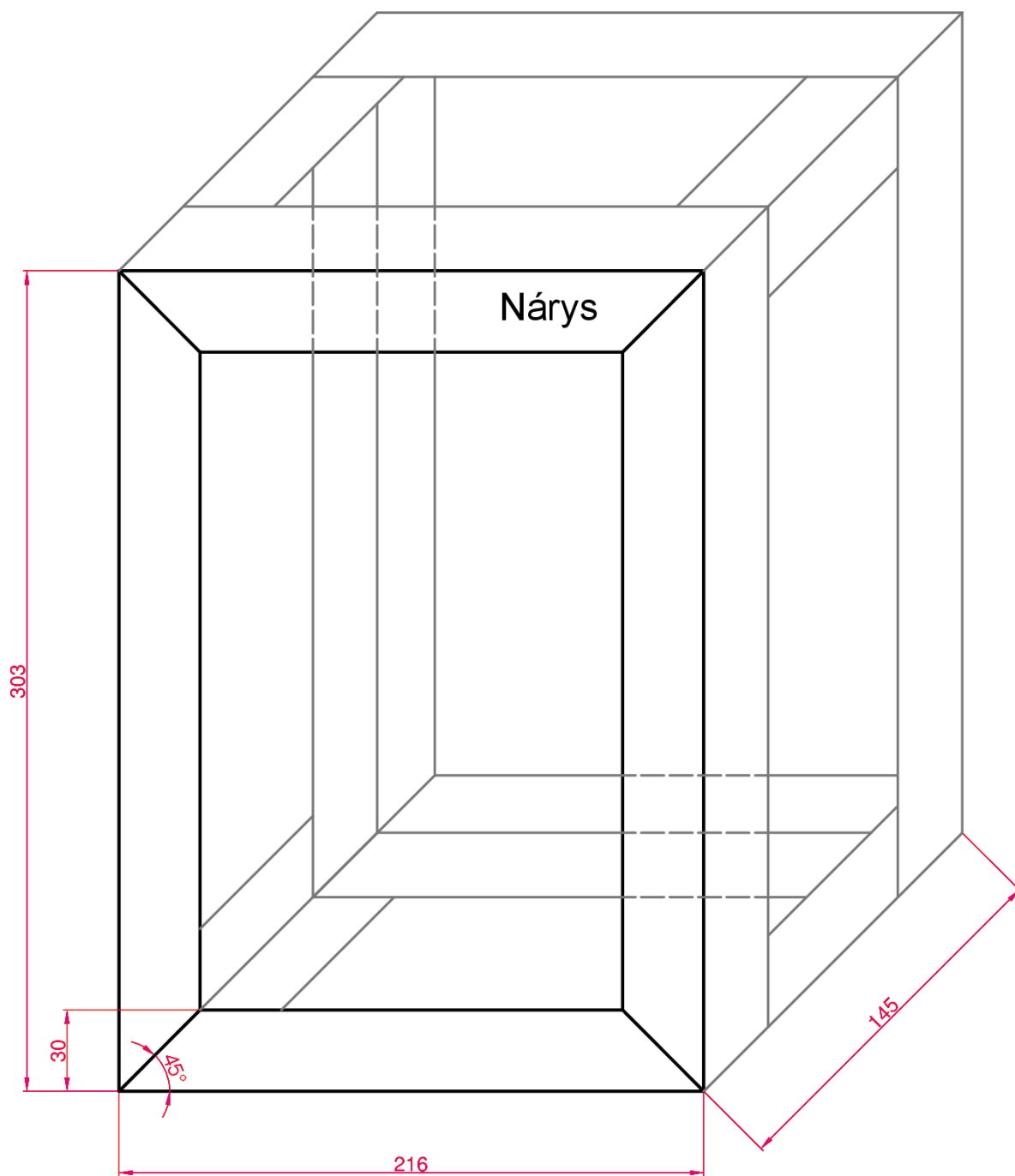
- ⇒ 2 šrouby M4,
- 2 matky M4,
- 2 podložky M4
- ⇒ otvory vrtat vrtákem  $\phi 4,5$  mm (DIN lištu)
- ⇒ šrouby utáhnout momentem 2,5 Nm

Příloha B – Rozměry nařezaných L profilů

4x

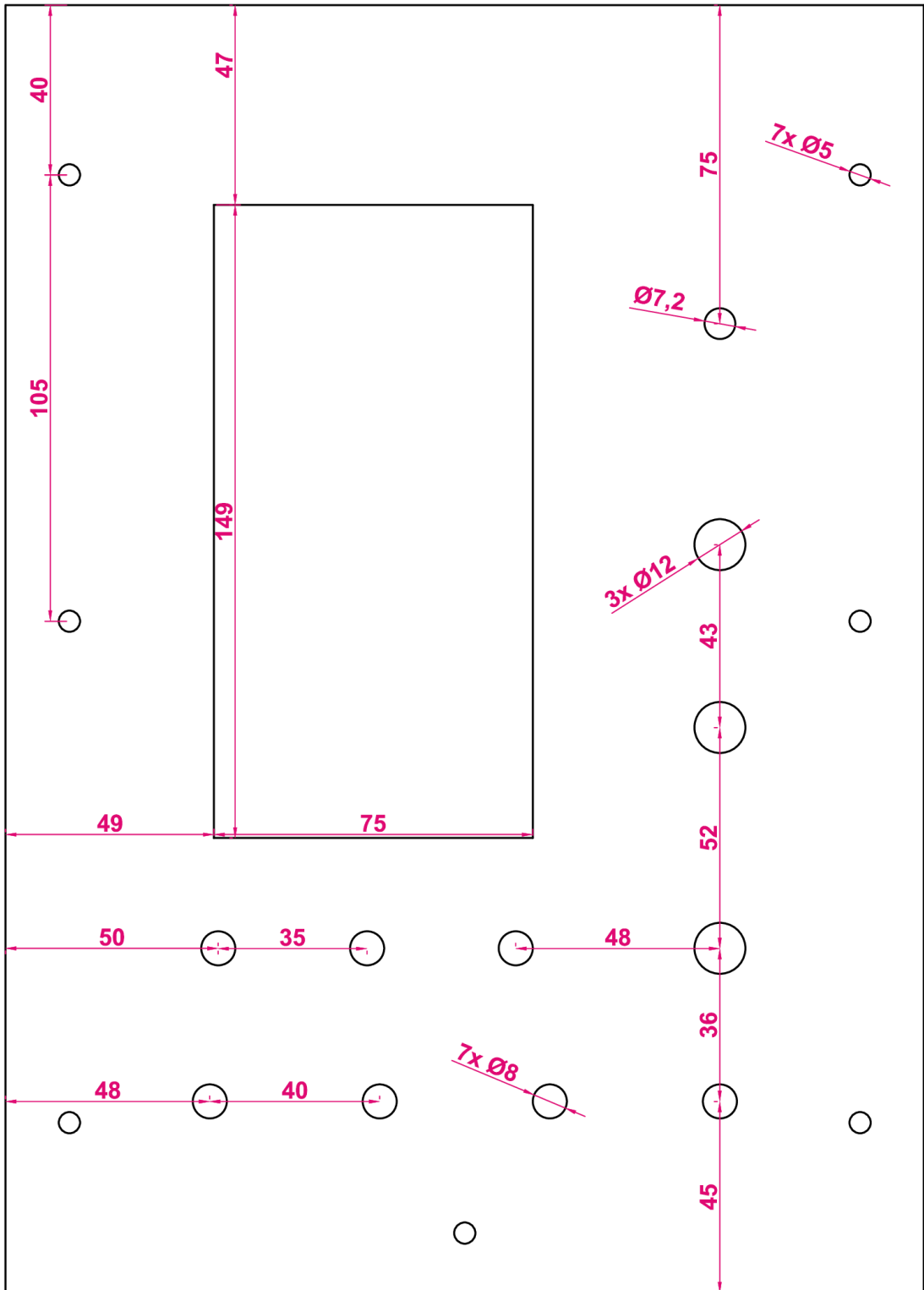


Příloha C – Výkres svařené konstrukce

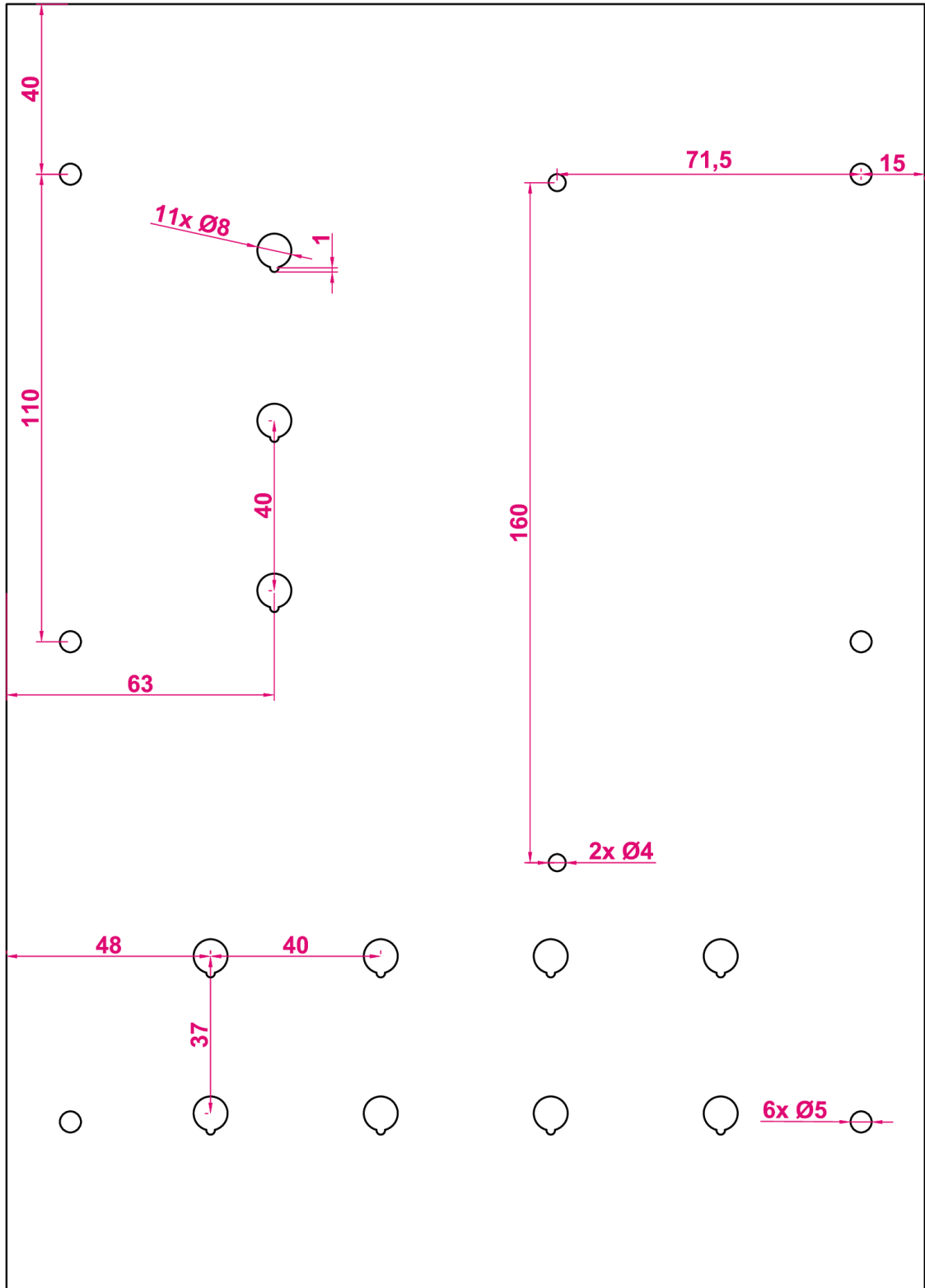




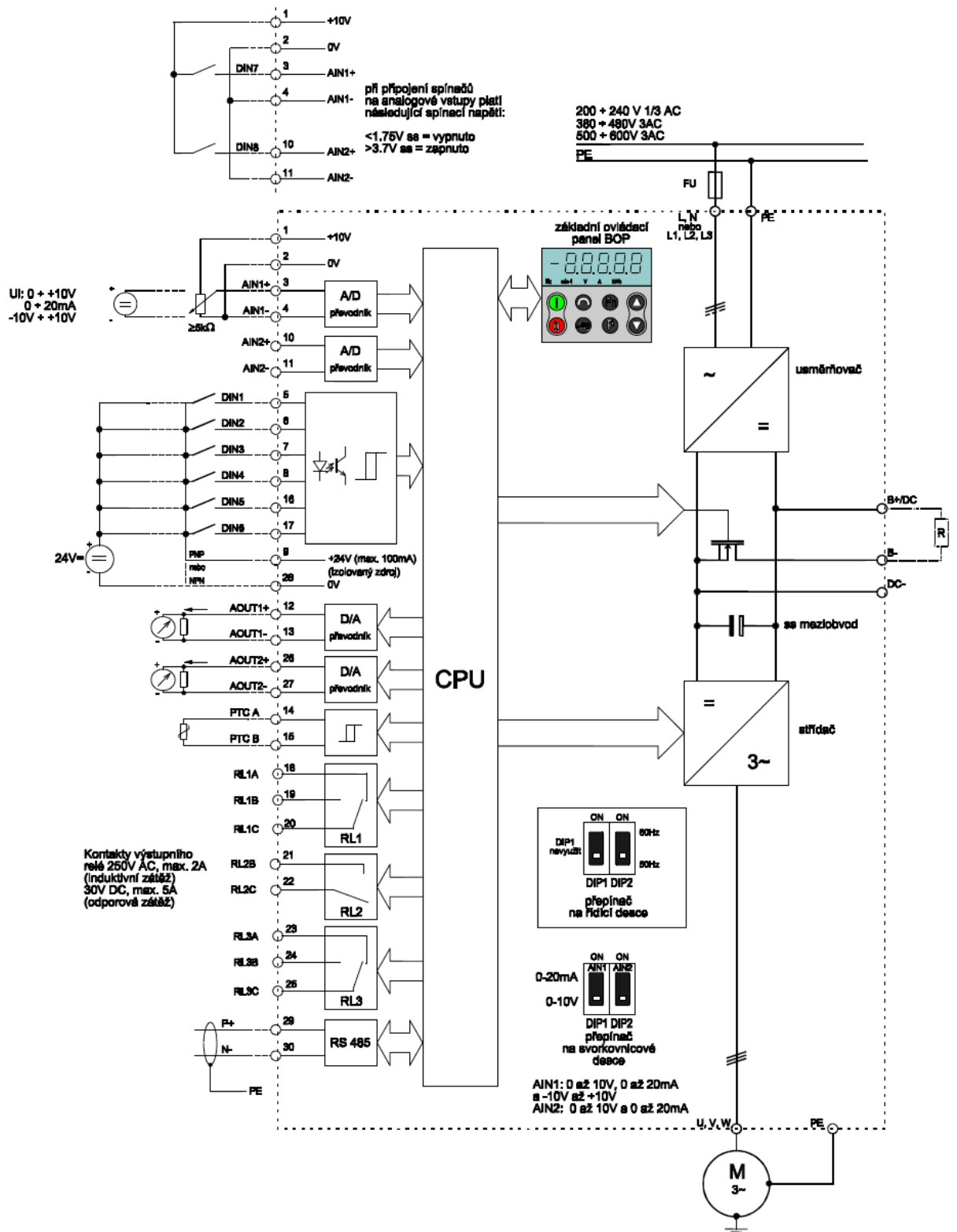
Příloha D – Výrobní výkres předního panelu



Příloha E – Výrobní výkres zadního panelu



Příloha F – Kompletní blokové schéma frekvenčního měniče SIEMENS, zdroj: [8]



## Skalární řízení

**Mz = konst = 0**

<i>f</i>	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
<i>U</i>	49	83	121	157	194	232	270	306	343	380	419	427	429	429	429
<i>l</i>	2,76	2,72	2,7	2,66	2,6	2,6	2,59	2,57	2,56	2,54	2,49	2	1,7	1,5	1,36
<i>n</i>	149	298	449	600	749	898	1052	1198	1348	1500	1648	1798	1950	2099	2249
<i>Uv</i>	48	84	122	160	196	234	272	308	347	382	416	423	423	423	423
<i>la</i>	2,8	2,76	2,74	2,71	2,67	2,66	2,63	2,62	2,61	2,6	2,54	2,07	1,75	1,56	1,4

**f = 25 = konst.**

<i>Mz</i>	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
<i>U</i>	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194
<i>l</i>	2,64	2,59	2,58	2,54	2,5	2,48	2,48	2,49	2,51	2,55	2,59	2,64	2,71	2,79	2,89	2,97	3,08	3,2	3,33	3,47	3,64
<i>n</i>	749	749	744	740	736	733	729	726	722	718	714	710	706	701	696	691	685	680	673	666	659

**f = 50 = konst.**

<i>Mz</i>	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
<i>U</i>	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380
<i>l</i>	2,59	2,58	2,58	2,57	2,56	2,57	2,59	2,62	2,66	2,7	2,75	2,81	2,88	2,94	3,02	3,11	3,21	3,3	3,4	3,51	3,63
<i>n</i>	1497	1494	1491	1488	1485	1482	1479	1475	1472	1469	1465	1462	1458	1454	1450	1446	1442	1438	1434	1429	1425

**f = 75 = konst.**

<i>Mz</i>	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8
<i>U</i>	425	420	418	415	413	411	408	407	405	402	401	397	395	394	394	392	390
<i>l</i>	1,33	1,34	1,4	1,47	1,53	1,63	1,76	1,91	2,05	2,22	2,4	2,6	2,81	3,02	3,26	3,49	3,74
<i>n</i>	2249	2243	2237	2231	2224	2217	2211	2203	2195	2187	2178	2168	2158	2147	2137	2122	2108

## Vektorové řízení

P2002 = 7,2 A - referenční proud pro analogový výstup

**f = 25 = konst.**

Mz	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
n	756	756	756	756	755	755	755	755	755	754	754	754	754	754	754	754	754	754	754	754	754
U	181	184	186	189	191	194	196	198	200	203	205	207	210	213	215	217	220	223	226	229	231
I M	0,14	0,28	0,42	0,56	0,71	0,85	0,99	1,14	1,28	1,42	1,56	1,71	1,85	2	2,14	2,28	2,43	2,57	2,71	2,85	3
I tok	5,63	5,67	5,66	5,66	5,65	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66	5,65	5,65	5,63	5,63	5,63	5,63	5,62	5,62	5,61	5,61
I tok pre	2,03	2,04	2,04	2,04	2,03	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,02	2,02	2,02	2,02
I soucet	2,03	2,06	2,08	2,11	2,15	2,21	2,27	2,33	2,41	2,48	2,57	2,66	2,75	2,85	2,95	3,05	3,16	3,27	3,38	3,49	3,62
I celk	2,05	2,06	2,08	2,12	2,16	2,21	2,26	2,33	2,4	2,48	2,57	2,66	2,75	2,85	2,95	3,06	3,16	3,27	3,39	3,49	3,61

**f = 50 = konst**

Mz	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
n	1505	1505	1505	1505	1505	1505	1505	1505	1504	1504	1504	1504	1504	1503	1503	1502	1502	1502	1502	1501	1501
U	356	358	361	363	365	368	370	373	373	375	376	376	376	377	377	378	378	376	374	373	373
I M	0,18	0,31	0,46	0,6	0,75	0,89	1,03	1,18	1,33	1,47	1,62	1,77	1,93	2,09	2,25	2,41	2,59	2,77	2,97	3,16	3,39
I tok	5,62	5,59	5,59	5,59	5,58	5,58	5,56	5,55	5,5	5,43	5,37	5,24	5,14	5,09	4,95	4,86	4,73	4,55	4,36	4,21	4
I tok pre	2,02	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,00	2,00	1,98	1,95	1,93	1,89	1,85	1,83	1,78	1,75	1,70	1,64	1,57	1,52	1,44
I soucet	2,03	2,04	2,06	2,10	2,14	2,20	2,25	2,32	2,39	2,45	2,52	2,59	2,67	2,78	2,87	2,98	3,10	3,22	3,36	3,50	3,68
I celk	2,03	2,04	2,07	2,11	2,14	2,2	2,26	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59	2,68	2,78	2,88	2,97	3,09	3,22	3,36	3,52	3,62

**f = 75 = konst**

<i>Mz</i>	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
<i>n</i>	2258	2258	2258	2257	2257	2256	2255	2255	2254	2253	2252	2252	2250	2247	2246
<i>U</i>	367	367	366	366	366	367	367	370	370	372	375	377	375	373	370
<i>l M</i>	0,17	0,36	0,58	0,78	1,01	1,24	1,47	1,7	1,95	2,18	2,43	2,69	3	3,34	3,74
<i>l tok</i>	2,99	2,93	2,86	2,81	2,75	2,71	2,62	2,58	2,5	2,44	2,38	2,3	2,13	1,97	1,75
<i>l tok pre</i>	1,08	1,05	1,03	1,01	0,99	0,98	0,94	0,93	0,90	0,88	0,86	0,83	0,77	0,71	0,63
<i>l soucet</i>	1,09	1,11	1,18	1,28	1,41	1,58	1,75	1,94	2,15	2,35	2,58	2,81	3,10	3,41	3,79
<i>l celk</i>	1,09	1,12	1,18	1,29	1,42	1,58	1,75	1,94	2,14	2,36	2,6	2,81	3,09	3,42	3,78

**Mz = konst = 0**

<i>f</i>	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
<i>n</i>	150	301	453	605	751	903	1055	1204	1355	1502	1656	1807	1958	2106	2258
<i>Um</i>	44	76	112	147	180	216	251	286	321	356	377	372	370	370	370
<i>l M</i>	0,06	0,09	0,1	0,11	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17
<i>l tok</i>	5,72	5,72	5,71	5,69	5,68	5,69	5,66	5,65	5,61	5,63	5,05	4,24	3,7	3,33	3,03
<i>l tok pre</i>	2,06	2,06	2,06	2,05	2,04	2,05	2,04	2,03	2,02	2,03	1,82	1,53	1,33	1,20	1,09
<i>l soucet</i>	2,06	2,06	2,06	2,05	2,05	2,05	2,04	2,04	2,03	2,03	1,83	1,54	1,34	1,21	1,10
<i>l celk</i>	2,06	2,06	2,07	2,06	2,05	2,05	2,05	2,05	2,03	2,04	1,86	1,54	1,35	1,22	1,12