

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

**Program jednoduchého frekvenčního měniče
pro asynchronní motor**

Petr Vosáhlo

Bakalářská práce
2009

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Petr VOSÁHLO
Studijní program: B3709 Dopravní technologie a spoje
Studijní obor: Dopravní infrastruktura-Elektrotechnická zařízení
v dopravě
Název tématu: Program jednoduchého frekvenčního měniče pro
asynchronní motor

Zásady pro vypracování:

- 1) Rozbor metod řízení asynchronního motoru
- 2) Návrh algoritmu řízení asynchronního motoru metodou u/f
- 3) Zpracování vstupních hodnot regulátorem
- 4) Naprogramování pulsně šířkového modulátoru třífázové sítě
- 5) Naprogramování regulační části frekvenčního měniče metodou u/f
- 6) Ověření vlastností naprogramovaného měniče 1kW

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

[1] Prof. Ing. PAVELKA DrSc., Jiří, Prof. Ing. ČEŘOVSKÝ DrSc, Zdeněk, Doc. Ing. LETTL CSc, Jiří: VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA. 2. upr. vyd. Praha : ČVUT PRAHA, 2007. 227 s. ISBN 978-80-01-03626-6.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ondřej Černý

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce:

11. prosince 2008

Termín odevzdání bakalářské práce:

1. června 2009

prof. Ing. Bohumír Čulík, CSc.
děkan

L.S.

prof. Ing. Vladimír Šebajda, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 18. února 2009

Prohlašuji:

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.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 26. 5. 2009

Petr Vosáhlo

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Ondřeji Černému za jeho odborné vedení, všestrannou pomoc, vstřícnost a ochotu při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Zdeňkovi Maškovi za cenné rady a podměty při ladění programu. Současně děkuji své rodině, přítelkyni a přátelům za podporu během studia a při dokončování této práce.

Anotace

Cílem této bakalářské práce je vytvořit program pro řízení asynchronního motoru. Práce se zabývá rozbořem metod řízení a popisem metody frekvenčního řízení metodou u/f. V práci jsou popsány vývojové diagramy algoritmu řízení. Program je napsán pro řídicí terminál ART267A, který obsahuje mikroprocesor 167C. Tato práce ověřuje vlastnosti naprogramovaného měniče na asynchronním motoru.

Annotation

The aim of this bachelor paper is to create a program for an asynchronous motor control. The bachelor paper introduces an analysis of the operating methods and a description of a frequency operating method by the method u/f. There are described flowcharts of control algorithm. The program is written for the control terminal ART267A, which includes the microprocessor 167C. This bachelor paper verifies the characteristics of a programmed converter on the asynchronous motor.

Obsah

1	Rozbor metod řízení asynchronního motoru	12
1.1	Řízení otáčivé rychlosti rotoru změnou počtu pólových dvojic	13
1.2	Řízení otáčivé rychlosti změnou napětí na svorkách	16
1.3	Řízení otáčivé rychlosti rotoru změnou frekvence.....	16
2	Návrh algoritmu řízení asynchronního motoru metodou u/f.....	22
2.1	Popis řídicího terminálu ART267A.....	22
2.2	Popis navrženého algoritmu řízení.....	22
2.3	Popis časovačů a komparační jednotky	23
2.4	Přiřazení hodnoty z tabulky	24
2.5	Obsluha výstupu PŠM.....	25
3	Zpracování vstupních hodnot regulátorem	28
4	Naprogramování pulsně šířkového modulátoru třífázové sítě	30
5	Naprogramování regulační části frekvenčního měniče metodou u/f.....	32
6	Ověření vlastností naprogramovaného měniče na asynchronním motoru	34

Úvod

Ve své bakalářské práci se zabývám rozбором metod řízení asynchronního motoru, především metodou u/f. Zejména se zaměřuji na popis vývojových diagramů (algoritmu řízení). Hlavním cílem této práce bylo naprogramovat pulsně-šířkový modulátor třífázové sítě metodou u/f a ověření jeho vlastností na asynchronním motoru.

Asynchronní motor, především s klecovou kotvou (také s rotorem, či kotvou nakrátko), je v současnosti nejrozšířenějším motorem pro průmyslové aplikace. Zejména díky jeho nízké ceně, malým provozním nákladům a vysoké spolehlivosti. Jeho hlavní nevýhodou od jeho vzniku je obtížná regulace otáčivé rychlosti rotoru. S rozvojem polovodičů v regulační a výkonové technice však bylo toto omezení překonáno. Nejčastějším způsobem řízení napěťových střídačů, který umožňuje současnou změnu výstupní frekvence a výstupního napětí, je pulsně-šířková modulace (dále jen PŠM). PŠM je diskrétní modulace pro přenos analogového signálu pomocí dvoustavového signálu. Signál (informace) je přenášen pomocí střídů.

Princip působení asynchronního stroje je založen na točivém magnetickém poli v jeho vzduchové mezeře. Toto pole je buzeno trojfázovým vinutím rozloženým v drážkách statoru. Jednotlivé fáze vinutí jsou proti sobě prostorově posunuty o 120° elektrických. Vinutí se napájí ze souměrné soustavy trojfázových napětí, to znamená, že je protékáno souměrnou soustavou proudů, které jsou rovněž navzájem posunuty o 120° elektrických. Tyto proudy vytváří magnetické pole stálého prostorového tvaru, otáčející se rychlostí

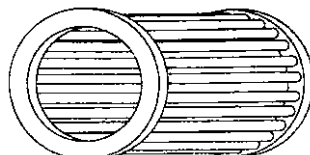
$$n_1 = \frac{f_1}{p} \quad (1)$$

n_1rychlost točivého magnetického pole (synchronní rychlost)
[ot./min.]

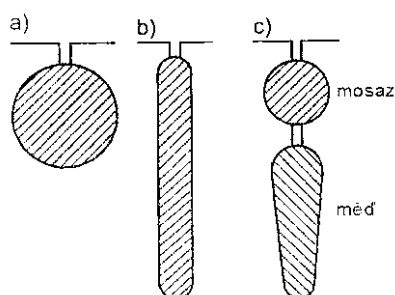
f_1 frekvence statorového (napájecího) napětí [Hz]

p počet pólových dvojic [-]

Klecové rotorové vinutí je složeno z tyčí a zkratovacích kroužků po obou stranách (viz. obr. 1).

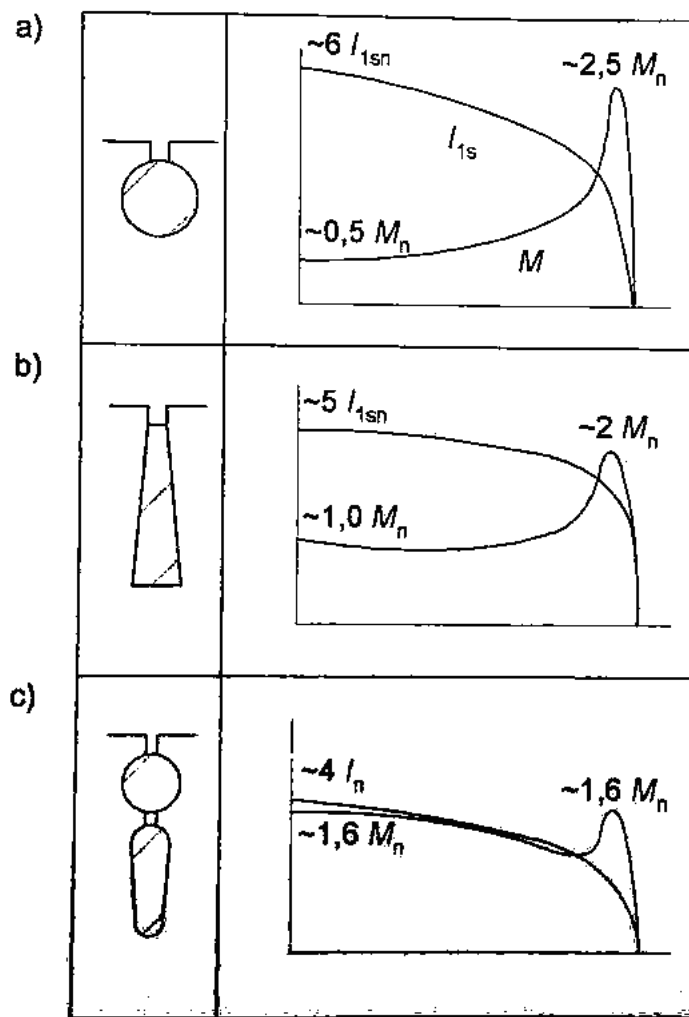


Obr. 1 Klecové vinutí [5].



Obr. 2 Typy rotorových drážek klecového vinutí a) jednoduchá, b) vířivá, c) dvojitá (Boucherotova) klec [5].

Celá klec je z mědi nebo hliníku, případně mosazi. Drážky rotoru bývají polozavřené různého tvaru (viz. obr. 2). Tvar má vliv na průběh točivého momentu v závislosti na rychlosti otáčení a také na jeho záběrový moment (viz. obr. 3). Momentové charakteristiky jsou tedy odlišné. Příčinou odlišnosti jsou vířivé proudy, které při vzrůstajícím rotorovém kmitočtu intenzivněji vytlačují proud v úzkých tyčích klece k povrchu tyčí a tím zvětšují efektivní odpor klece.



Obr. 3 Typické momentové charakteristiky asynchronních motorů s klecovými rotory a) jednoduchá, b) vírová, c) dvojitá (Boucherotova) klec [5].

Požaduje-li se, aby měl motor větší záběrový moment, zhotovuje se jeho klec z odporového materiálu (s horší elektrickou vodivostí). Případně se ztenčí spojovací kruhy nebo se střídavě prořezávají (nesmí se však přerušit spojení s tyčí). Takto upravený motor se rozbíhá již s maximálním momentem za cenu horší účinnosti [5].

1 Rozbor metod řízení asynchronního motoru

Základním požadavkem pro řízení motoru je plynulá a hospodárná regulace v širokém rozsahu otáček. Pro rychlost otáčení rotoru n (mechanickou rychlost) platí vztah (2).

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p}(1 - s) \quad (2)$$

s skluz [-]

V literatuře [1] je pro skluz uveden vztah (3)

$$s = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1} \quad (3)$$

n rychlost otáčení rotoru [ot./min.]

n_2 relativní rychlost nebo také rychlost skluzová [ot./min.]

Napětí a proudy naindukované v rotoru mají frekvenci f_2 . Frekvence f_2 závisí na skluzové rychlosti n_2 vztahem (4)

$$n_2 = \frac{f_2}{p} = \frac{\omega_2}{2 \cdot \pi \cdot p} \quad (4)$$

ω_2 úhlová frekvence rotorových veličin[rad/s]

Pro skluz tedy platí vztah (5)

$$s = \frac{f_2}{f_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_{2m}}{\omega_{1m}} \quad (5)$$

ω_{2m}mechanická (relativní) rychlost rotoru vůči točivému magnetickému poli

ω_{1m}rychlost točivého magnetického pole (synchronní)

Asynchronní motor pracuje v rozsahu rychlostí otáčení

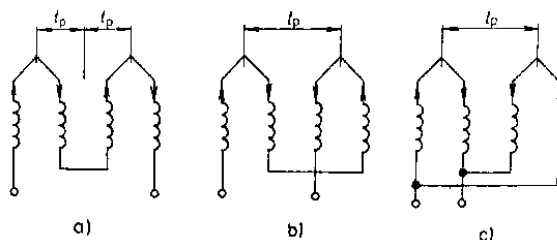
$$0 \leq n < n_1 \quad (6)$$

a tomu odpovídá rozsah skluzu $1 > s > 0$.

Z výše uvedených vztahů je zřejmé, že rychlost otáčení rotoru lze ovlivnit třemi způsoby, změnou napájecí frekvence f_1 , změnou počtu pólových dvojic a ovlivněním velikosti skluzu s .

1. 1 Řízení otáčivé rychlosti rotoru změnou počtu pólových dvojic

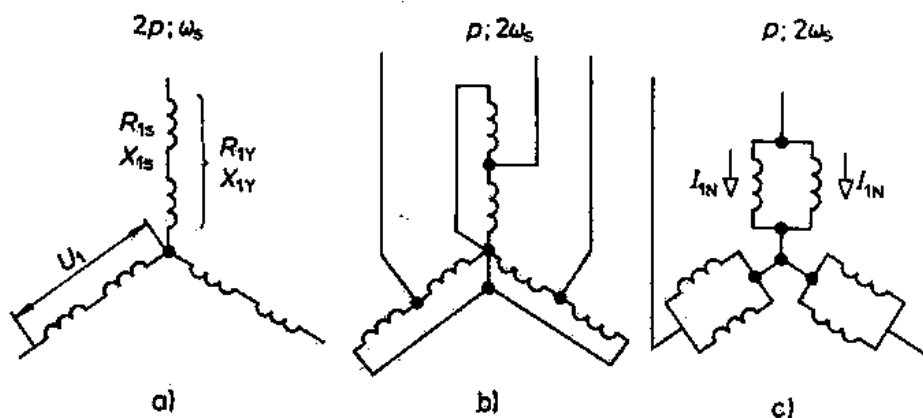
Tato regulace nemůže být plynulá, ale pouze stupňovitá a dosti omezená. V praxi se vyrábějí nanejvýš čtyř-rychlostní asynchronní motory. Motor má na statoru vinutí, jehož počet pólů lze měnit. Dvou-rychlostní motor má na statoru obvykle jedno vinutí, jehož počet pólů lze přepínat v poměru 1 : 2 (obr. 4).



Obr. 4 Přepínání cívek jedné fáze statoru ze základního spojení a) na sériové b) a paralelní c) [2].

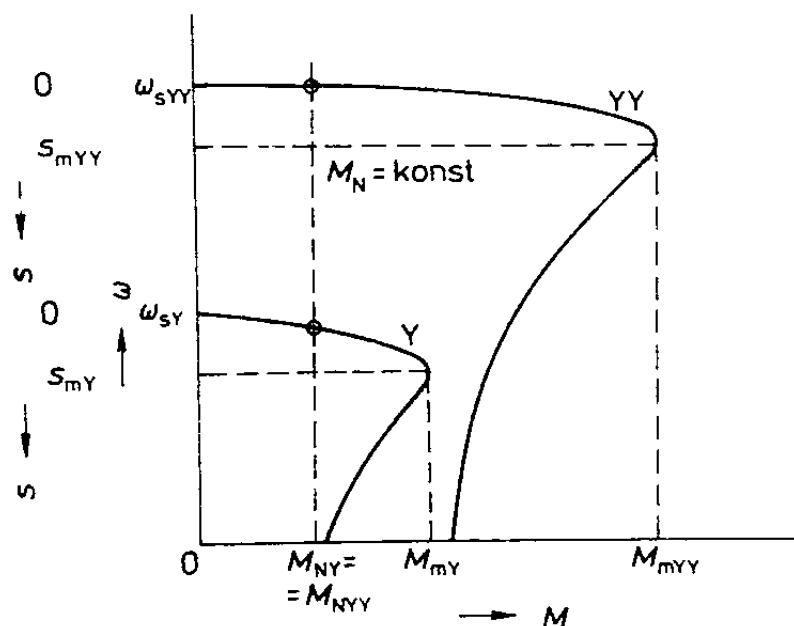
t_ppólová rozteč

Nejčastěji se používají dvě uspořádání. Jsou to přepínání hvězda Y/dvojitá hvězda YY (obr. 2) nebo trojúhelník D/dvojitá hvězda YY (obr. 5).



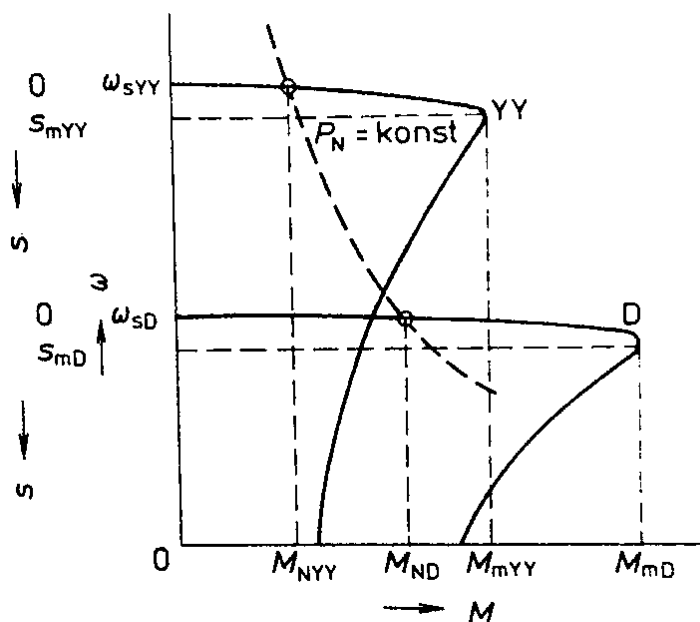
Obr. 5 Přepínání vinutí statoru Y – YY [2].

První varianta má po přepnutí dvojnásobnou rychlost otáčení, dvojnásobný síťový proud, stejné točivé momenty a moment zvratu se zdvojnásobí. Tento způsob přepínání se někdy nazývá přepínání při stálém momentu. Ve spojení vinutí do hvězdy Y není magnetický obvod plně využit (obr. 6).

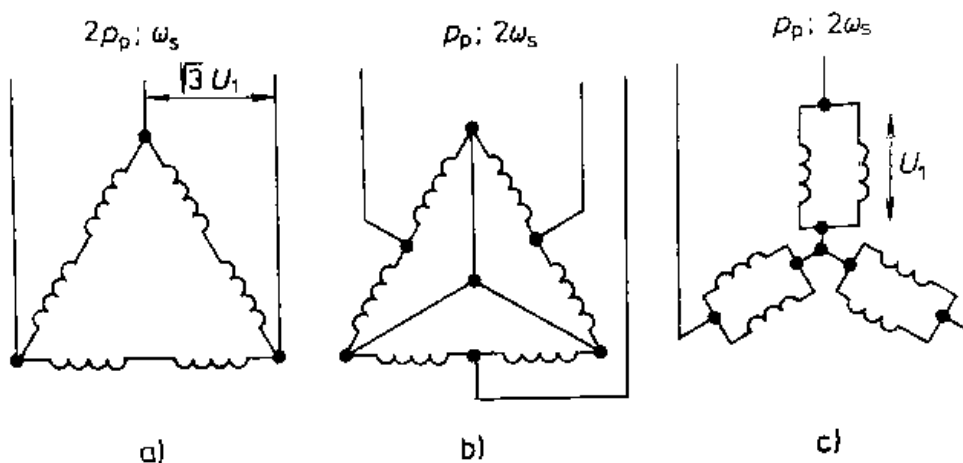


Obr. 6 Mechanické charakteristiky při spojení Y – YY [2].

Přepínání trojúhelník/dvojitá hvězda vede po přepnutí opět na dvojnásobnou rychlost otáčení a na dvojnásobný síťový proud, točivý moment však je $\sqrt{3}$ krát menší a moment zvratu poklesne na $2/3$. Motor v obou zapojeních pracuje s přibližně stejným výkonem, proto se někdy tento způsob nazývá přepínání při stálém výkonu (obr. 7).



Obr. 7 Mechanické charakteristiky při spojení D – YY [2].



Obr. 8 Přepínání vinutí statoru D – YY [2].

Tří-rychlostní a čtyř-rychlostní motory mají dvě nezávislá vinutí, z nichž jedno nebo obě vinutí jsou přepínatelná [2].

1. 2 Řízení otáčivé rychlosti změnou napětí na svorkách

U asynchronních motorů s klecovým rotorem, lze řídit rychlost otáčení změnou napětí na svorkách. Nevýhodou je, že moment se mění s druhou mocninou napětí, přičemž se nemění skluz zvratu. Lze tedy měnit otáčky od jmenovitého skluzu do blízkosti skluzu zvratu, kde je ovšem nebezpečí náhlého zastavení motoru i při malém přetížení. Proto se tento způsob řízení prakticky nepoužívá [1].

1. 3 Řízení otáčivé rychlosti rotoru změnou frekvence

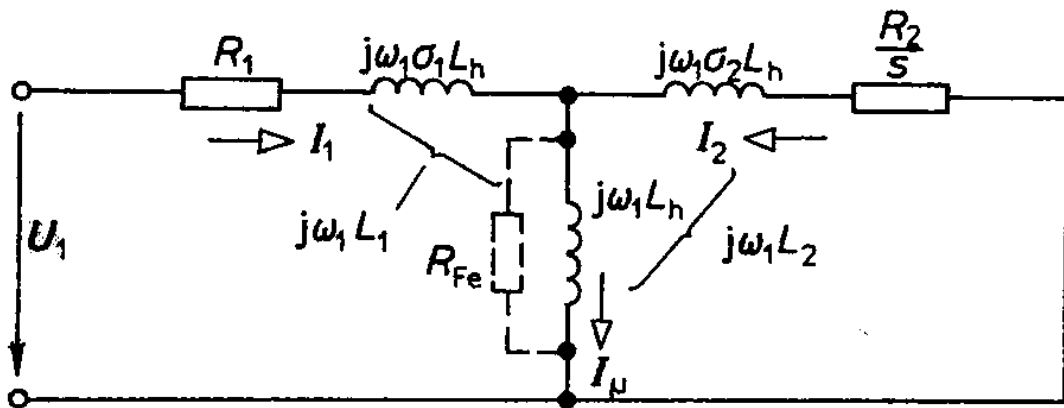
V současné době je to nejpoužívanější a nejdokonalejší bezeztrátový způsob řízení, plyne ze vztahu (2). Je zřejmé, že vyžaduje zdroj proměnlivého kmitočtu. Dříve se pro tento účel používaly rotační měniče kmitočtu, dnes výhradně polovodičové střídače. Z hlediska samotného řízení rychlosti otáčení lze uvažovat dvě koncepce - skalární a vektorové.

Skalární řízení pracuje pouze s amplitudami veličin (skalární hodnoty). Pro tento způsob řízení jsou charakteristické následující znaky:

- pohon nepotřebuje snímač rychlosti otáčení (větší odchylky rychlosti otáčení oproti žádané hodnotě)
- jmenovitý točivý moment je v rozsahu přibližně 5 až 100% rychlosti otáčení (pohon má průměrné dynamické vlastnosti)
- relativní jednoduchost a nízká cena obvodové části měniče (jednodušší aplikace pohonu jako ventilátor, čerpadlo a další...)

Je-li asynchronní motor připojen na třífázovou elektrickou síť s konstantním napětím a frekvencí, má pouze jednu momentovou charakteristiku (obr. 10b označená f_{1N}). Na této charakteristice z celého momentového rozsahu odpovídá

pouze jeden stabilní bod, ve kterém může stroj pracovat. Odpovídající rozsah otáček je omezen pouze od chodu naprázdno (bez mechanické zátěže) po moment zvratu (viz. obr. 11 $\Delta\omega_k$). Pokud můžeme nezávisle měnit napájecí frekvenci a napětí, dosáhneme požadovaného momentu a otáček za různých podmínek (různé charakteristiky f_{11} , f_{12} , f_{13} obr. 10b). Zadaná frekvence určuje otáčivou rychlost stroje s odchylkou danou skluzem. Abychom mohli ve stroji udržovat stálý magnetický tok (moment), je zapotřebí se změnou frekvence měnit také výstupní napětí střídače (obr. 10a). Indukované napětí, které musí být v rovnováze s napájecím napětím asynchronního stroje, je závislé na generované frekvenci a velikosti magnetického toku. Vhodným vztahem těchto veličin lze pohon optimalizovat.



Obr. 9 Náhradní schéma jedné fáze asynchronního motoru

R_1 odpor statorového vinutí [Ω]

$j\omega_1\sigma_1L_h$ rozptyloví indukčnost statoru [H]

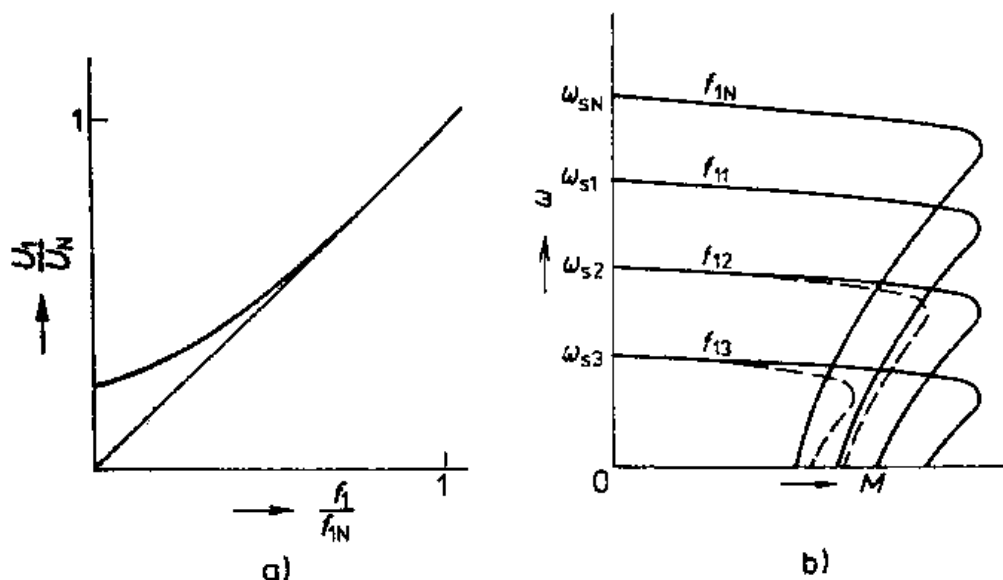
R_{FE} odpor respektující ztráty v železe [Ω]

$j\omega_1L_h$ hlavní indukčnost [H]

$j\omega_2\sigma_2L_h$ rozptylová indukčnost rotoru [H]

R_2/s ekvivalentní odpor rotorového vinutí [Ω]

Motor lze plynule řídit v rozsahu frekvencí $0 < f_1 < f_{1N}$. Pokud je zátěžný moment stejný, úbytek rychlosti se nemění a pracovní charakteristiky mají stejný sklon (obr. 11b). Současně se snižuje hodnota momentu zvratu charakteristiky f_{12} a f_{13} (čárkované průběhy). Snižování uvedené hodnoty je způsobeno konstantním poměrem u/f v celém rozsahu řízení.



Obr. 10 a) Změna napájecího napětí, b) mechanické charakteristiky asynchronního motoru [2]

Mtočivý moment [N.m]

f_{1N} jmenovitá frekvence motoru [Hz]

Z tohoto důvodu se zavádí závislost, například jako na obr. 10a, která koriguje vliv činného odporu statorového vinutí a umožňuje plynulé řízení od nízkých otáček. Rozsah řízení pro $f_1 > f_{1N}$, je nadále možné zvyšovat pouze zvýšením frekvence (nelze přesáhnout jmenovitou hodnotu napětí motoru). Tomuto způsobu řízení se někdy říká odbuzování. Přestože lze zvyšovat frekvenci, nelze udržovat konstantní magnetický tok stroje. Při konstantním napětí je magnetický tok nepřímo úměrný frekvenci. Momentové charakteristiky pro oblast odbuzování se vyznačují klesajícím momentem zvratu (obr. 7 charakteristiky f_{14} , f_{13} , f_{12}).

Pro jmenovitý moment platí vztah (7).

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_{mn}} \quad (7)$$

P_n jmenovitý výkon stroje [W]

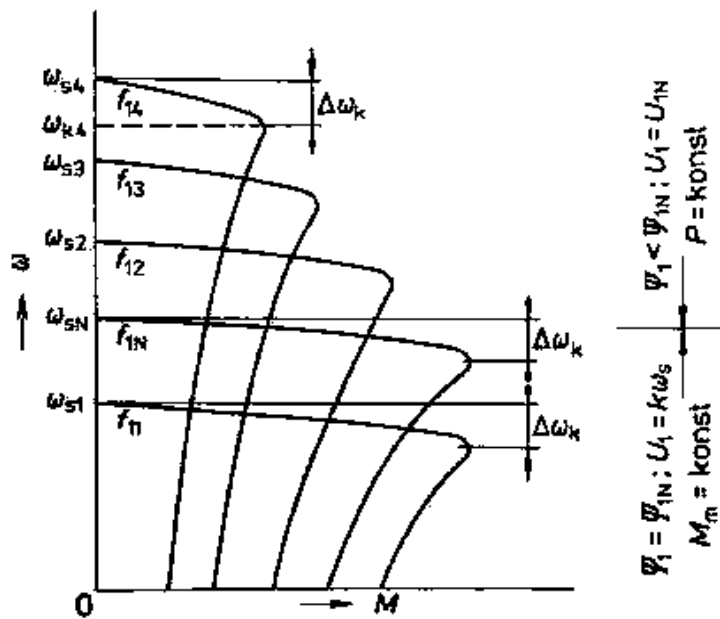
ω_{mn} jmenovitá otáčivá rychlost rotoru [rad/s]

Při zanedbání Jouleových ztrát a příčné větve v náhradním schématu lze vztah upravit na tvar pro moment asynchronního motoru

$$M = \frac{3 \cdot \frac{R_2}{s} \cdot U_1^2 \cdot p_p}{\omega_1 \cdot (R_1 + \frac{R_2}{s}) + X_k^2} \quad (8)$$

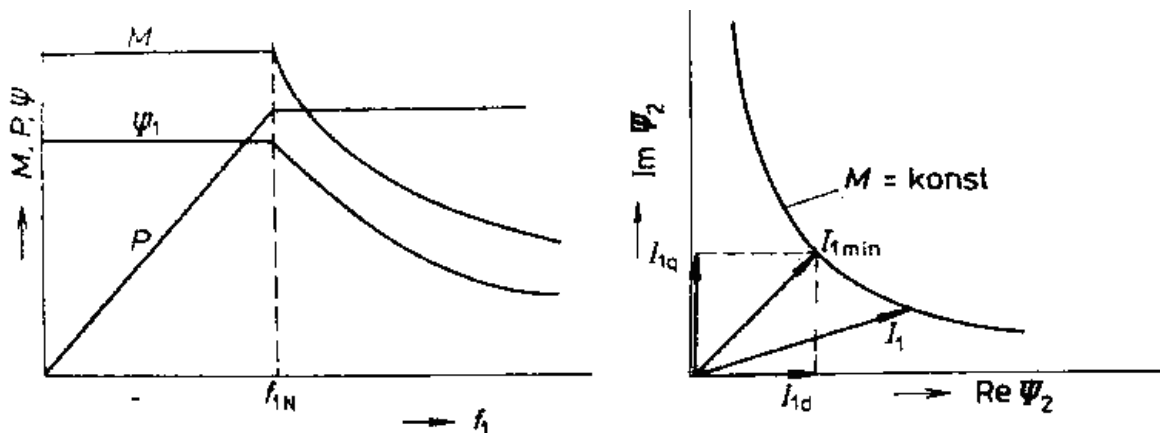
X_k^2 reaktance rozptylových indukčností [H]

$$X_k^2 = \omega_1 (\sigma_1 L_h + \sigma_2 L_h) \quad (9)$$



Obr. 11 Mechanické charakteristiky frekvenčně řízeného motoru [2]

Na obr. 12 je zobrazen minimální proud statoru a jeho činná a jalová (tokotvorná) složka. Velikost tohoto proudu lze měnit například změnou poměru mezi rotorovou frekvencí a statorovým proudem. Optimální řízení lze realizovat vektorovou regulací.



Obr. 12 Průběhy veličin při frekvenčním řízení asynchronního motoru (vlevo), minimální potřebný proud statoru pro stálý moment (vpravo) [2].

I_{1min}minimální potřebný proud statoru [A]

I_1 činná složka proudu I_{1min} [A]

I_{1q} jalová složka proudu I_{1min} [A]

Vektorové řízení je principiálně i obvodově složitější a je nad rámec této práce. V literatuře [5] se uvádí jeho základní znaky:

- umožňuje velmi přesné řízení rychlosti otáčení
- vyznačuje se velmi dobrými dynamickými vlastnostmi
- jmenovitý moment již při rozběhu motoru
- svými vlastnostmi se přibližuje příznivým vlastnostem stejnosměrnému motoru s cizím buzením

Princip vektorového řízení pracuje na rozdíl od skalárního s vektory veličin. Nadřazený regulátor rychlosti má obvykle podřízenou smyčku regulace točivého momentu. Je zde nutné snímání mechanických otáček rotoru. Zvláště se řídí složka statorového proudu, která vytváří točivý moment, a zvláště složka řídící magnetický tok. K jejich stanovení musí mít pohon snímač polohy rotoru oproti statoru [2], [3], [4].

2 Návrh algoritmu řízení asynchronního motoru metodou u/f

Program je napsán v programovacím jazyce C. Algoritmus řízení je pro řídicí terminál ART267A, který obsahuje mikroprocesor 167C. Terminál obsahuje vlastní knihovny, k dispozici jsou funkce pro implementované periferie.

2. 1 Popis řídicího terminálu ART267A

ART267A je kompaktní řídicí terminál v kovovém krytu. Terminál má zabudovaný pod-světlený LCD displej 2x16 znaků a membránovou klávesnici s 8 klávesami. Na zadní straně jsou vyvedeny vstupy a výstupy pomocí pružinových konektorů WAGO734. Pomocí těchto konektorů je vyvedeno 8 galvanicky oddělených číslicových vstupů a výstupů 24V/0,5A. Dále 6 analogových vstupů (rozsahy 0V až 5V, 0V až 10V a 0A až 20mA) a dva analogové výstupy (0V až 10V/10mA). Terminál je připojen k počítači pomocí rozhraní RS232 (sériová linka). Paměťový prostor obsahuje 512KB FLASH, 128KB RAM a 2KB EEPROM.

2. 2 Popis navrženého algoritmu řízení

Na obr. 13 je zjednodušený vývojový diagram algoritmu řízení. Prvním krokem je nastavení časovače, komparační jednotky a výstupu PŠM. Následuje zadání frekvence z klávesnice (podrobný popis viz. kapitola 3). Dalším krokem je přerušení od časovače po 1ms. Po vyvolání přerušení se nastaví hodnota z tabulky do komparačního registru. Smyčka programu se vrací do hlavního programu a čeká na vyvolání nového přerušení. Dokud není vyvoláno přerušení (než uplyne 1ms), lze nastavit novou hodnotu frekvence (tato část programu cykluje v nekonečné smyčce).

Vypnutí výstupu PŠM je možné stiskem klávesy ESC nebo zadáním nulové hodnoty frekvence. V obou případech se zhasne LED OK a rozsvítí se LED STOP. Současně je na displeji zobrazena hláška ! STOP !, která signalizuje vypnutí výstupu PŠM. Pro nový rozběh motoru, lze stiskem klávesy UP zadat na novou frekvenci.

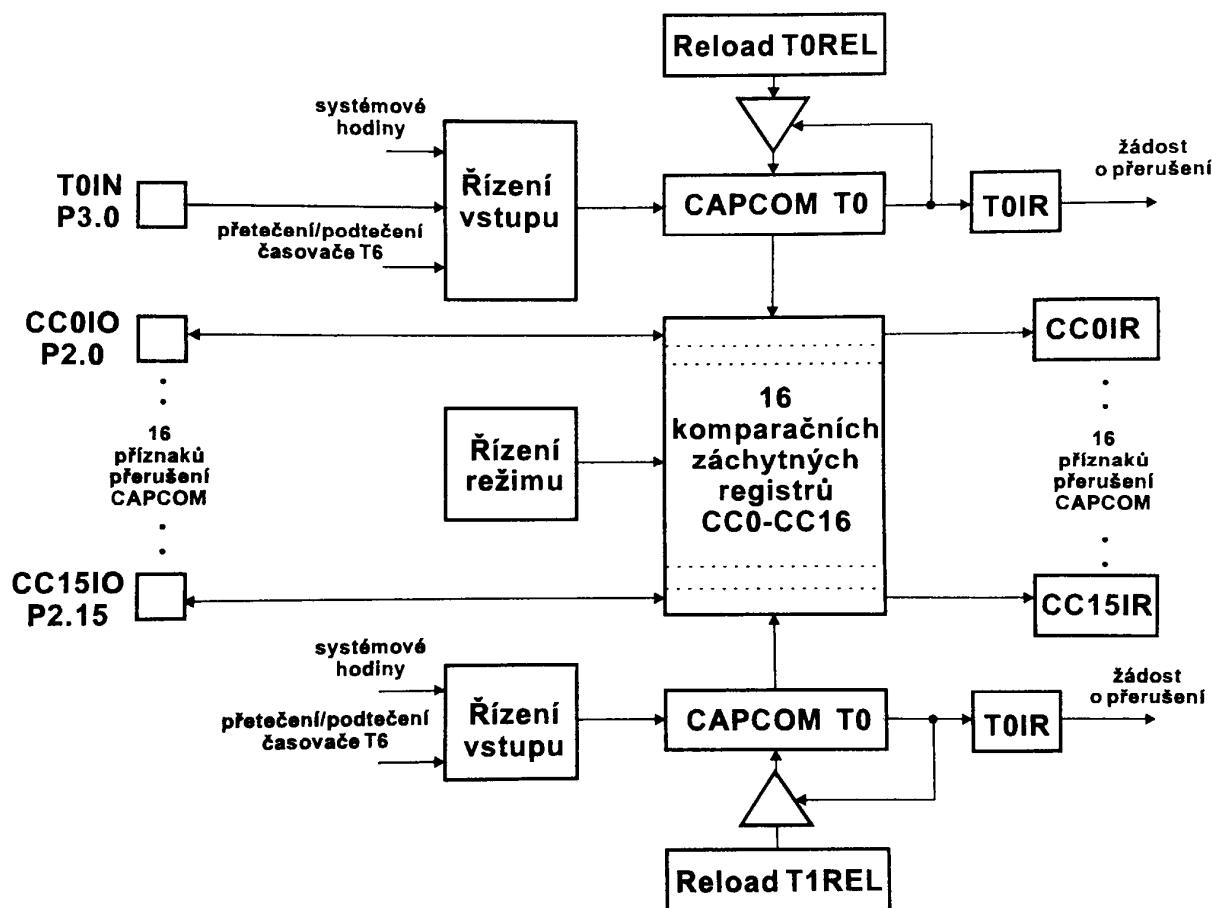


Obr. 13 Zjednodušený vývojový diagram programu

2. 3 Popis časovačů a komparační jednotky

Záchytná/srovnávací jednotka (CAPCOM) obr. 14 slouží ke generování a řízení časových sekvencí na 16 kanálech s minimálním softwarovým zásahem. Lze s ní generovat PŠM. Je tvořena dvojicí šestnáctibitových čítačů/časovačů T0 a T1 na které je připojeno pole šestnácti registrů CCx (capture/compare) CCO až CC15. Tyto

registry jsou vyvedeny na příslušné porty mikroprocesoru a mohou pracovat jako záchytné nebo srovnávací (komparační). Každý časovač má vlastní plnicí registr T0REL a T1REL.



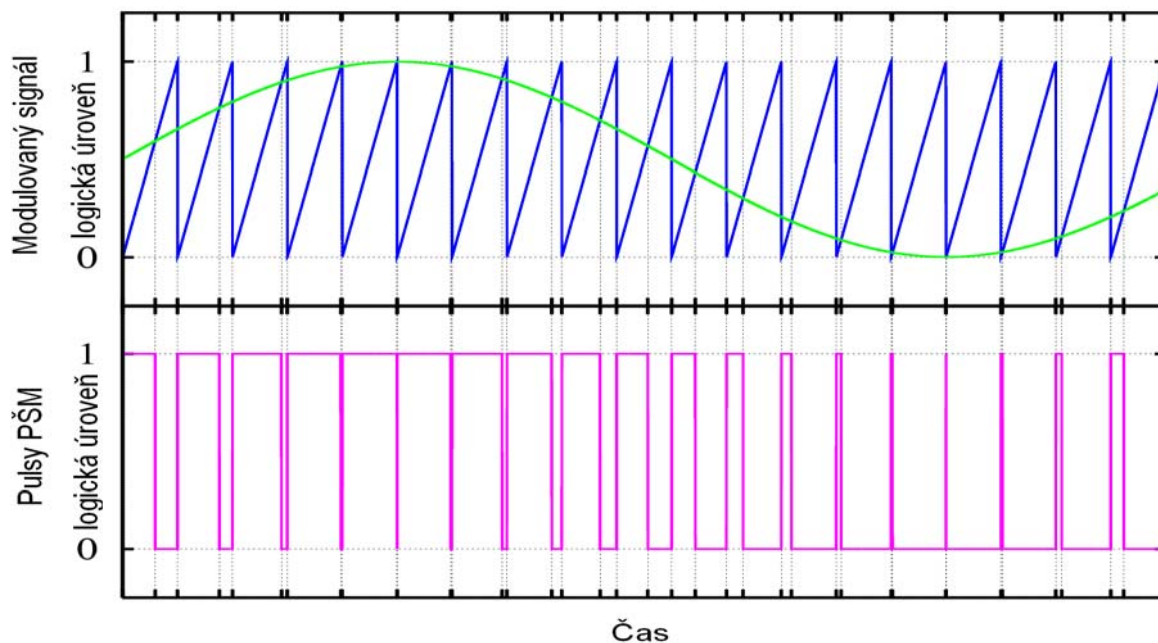
Obr. 14 Jednotka záchytných a komparačních registrů mikroprocesoru C167 [6]

Vstupní signál pro čítače/časovače může být buď vydělený kmitočet oscilátoru (maximální rozlišení je 400ns) nebo výstup čítače/časovače T6 jednotky GPT1 (jednotka časovačů) [6].

2. 4 Přiřazení hodnoty z tabulky

Princip generování výstupu PŠM je založen na přiřazení požadované hodnoty z uložené matice v paměti. Hodnoty v matici reprezentují 1 periodu sinusového průběhu. Tyto hodnoty jsou vypočítané v tabulkovém editoru MS EXCEL 2003.

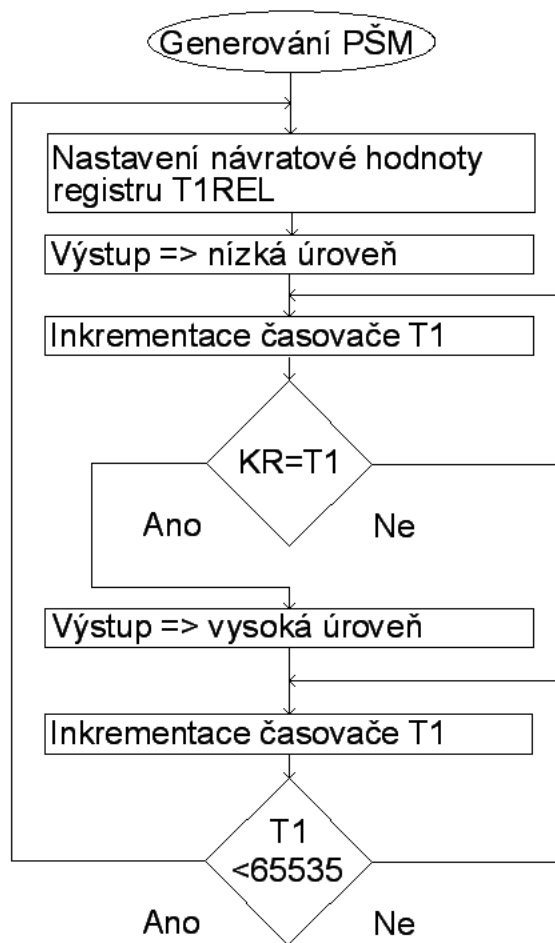
Tabulka je datového typu INT a obsahuje 1000 hodnot. Na obrázku 15 je zobrazen princip generování PŠM. Zelený průběh představuje průběh natabelovaný v matici. Modrý pilovitý průběh je od časovače T1. Při shodě se nastaví nízká logická úroveň (z principu plyne, že logické úrovně mohou být invertované).



Obr. 15 Princip generování PŠM [8].

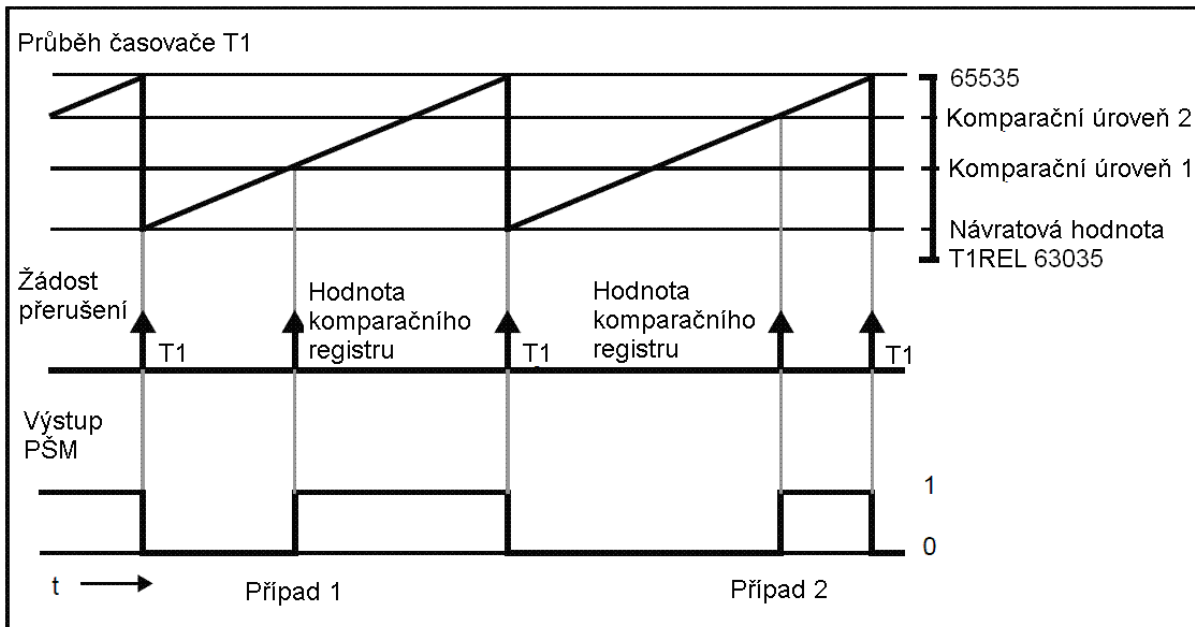
2. 5 Obsluha výstupu PŠM

Generování pulsů PŠM je za pomoci časovače T1 a komparační jednotky. Časovač T1 je nastaven na dobu periody 1ms, což odpovídá frekvenci 1kHz. Vývojový diagram je na obr. 16.



Obr. 16 Vývojový diagram pro generování PŠM

KRkomparační registr



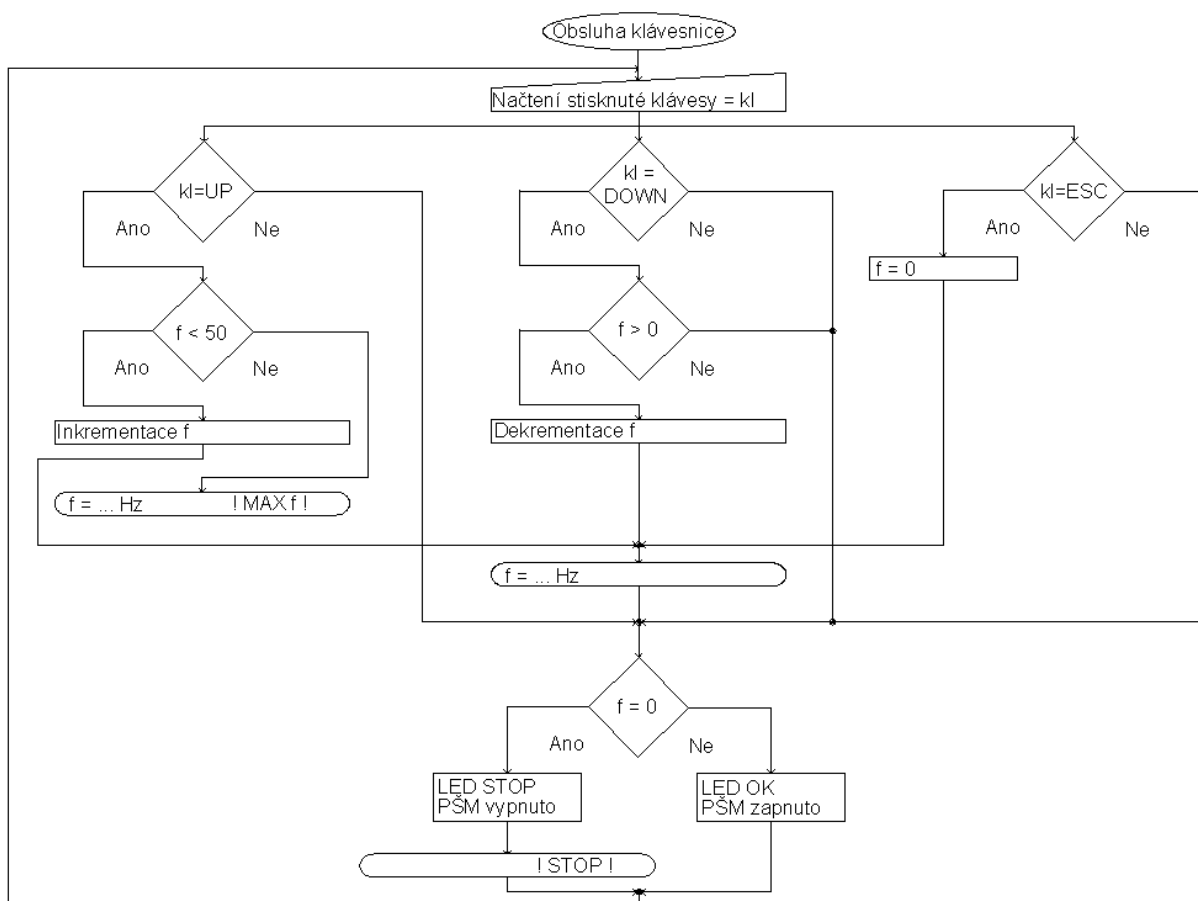
Obr. 17 Generování PŠM pomocí terminálu ART267A, komparační mód 3 [7].

Mód komparační jednotky je zvolen tak, že při rovnosti hodnoty komparačního registru a aktuální hodnoty časovače T1, se změní stav příslušného výstupu do logické úrovně 1 (ta odpovídá 24V).

Logická úroveň 1 je zachována až do přetečení časovače T1 (tomu odpovídá hodnota 65535). Po přetečení časovače se znovu nastaví návratová hodnota registru T1REL na 63035 (viz. obr. 17). Hodnota časovače T1 se mění v rozmezí 63035 až 65535. Z tohoto důvodu je nutné nastavovat hodnotu komparačního registru rovněž v tomto intervalu. Hodnoty v tabulce jsou v rozmezí 0 až 500, musí se tedy v každém přerušení od časovače T0 (1ms) přepočítat.

3 Zpracování vstupních hodnot regulátorem

Vstupní hodnoty jsou načítány z klávesnice. Po nahrání programu do terminálu ART267A a jeho spuštění je obsluha vyzvána k zadání požadované frekvence. Současně je rozsvícena LED STOP. Frekvence se zadává klávesami na přední straně terminálu ART267A. Při stisku klávesy UP se hodnota frekvence zvýší o jeden Hertz, při stisku klávesy DOWN se hodnota frekvence sníží o jeden Hertz. Potvrzení zadané hodnoty je klávesou ENTER. Při stisku klávesy se začnou generovat pulsy PŠM odpovídající zadané frekvenci. Současně se rozsvítí led RUN, která signalizuje chod programu a generování pulsů PŠM.



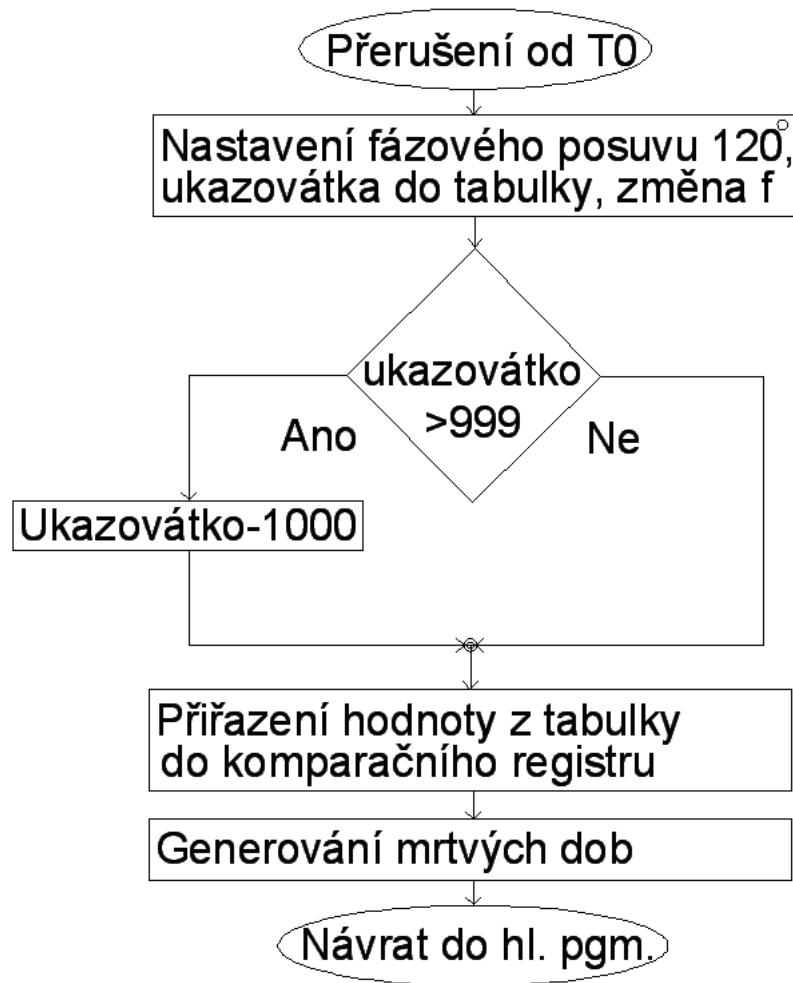
Obr. 18 Vývojový diagram pro obsluhu klávesnice

Při chodu programu by bylo velmi nepraktické každou hodnotu potvrzovat stiskem klávesy ENTER, zadávání nové frekvence je již bez stisku této klávesy. Přerušit program (vypnutí výstupu PŠM) je možné stiskem klávesy ESC nebo nastavením nulové hodnoty frekvence. Vývojový diagram pro zpracování vstupních hodnot je na obr. 18.

4 Naprogramování pulsně šířkového modulátoru třífázové sítě

Pro generování souměrné soustavy trojfázových napětí, které jsou navzájem posunuty o 120° elektrických, je zapotřebí vhodně nastavit ukazovátka do tabulky, což je ošetřeno vzájemnou vazbou mezi jednotlivými fázemi. Po přerušení od časovače T0 se ukazateli do tabulky (ukazovátka a) přičte hodnota zadané frekvence. Při zadání frekvence vyšší než 1Hz se některé hodnoty v tabulce vynechávají v závislosti na zadané frekvenci. Sled zbylých dvou fází je určen přičtením hodnoty 333 k ukazovátku b, hodnoty 666 k ukazovátku c. Tím je zaručen stálý fázový posuv při změně frekvence v jakémkoli časovém okamžiku. V tabulce je celkem 1000 hodnot. Programem je testováno, zda je již překročena poslední hodnota. Pokud ano, od aktuální pozice ukazovátka se odečte hodnota 1000. Ukazovátka se dostane opět na začátek tabulky (cykluje v nekonečné smyčce).

Dalším krokem je přiřazení hodnoty z tabulky na pozici odpovídajícího ukazovátka do příslušného komparačního registru. Pro správnou (bezpečnou) funkci výkonového polovodičového měniče je programově zajištěno vygenerování ochranné doby. Ochranná doba je čas, který potřebuje součástka pro úplné vypnutí. Tato doba je v programu nastavena jako parametr a lze ji měnit. Výchozí nastavená hodnota je 0,8 μ s. Následuje návrat do hlavního programu. Komparační jednotka má novou hodnotu a generuje puls s jinou šířkou. Na obr. 19 je výše popsán vývojový diagram pro generování třífázových řídicích pulsů.



Obr. 19 Vývojový diagram pro generování třífázové PŠM

5 Naprogramování regulační části frekvenčního měniče metodou u/f

Na obr. 20 je znázorněna korekce závislosti pro nízké frekvence statorového napětí. Této závislosti se někdy říká rozběhová rampa, která se určí výpočtem nebo empiricky.

Rozběhová rampa je programem nastavena tak, že pokud je frekvence menší než 15Hz, je nastaveno konstantní napětí (určeno empiricky). Regulace se provádí pouze změnou frekvence. Od 15Hz do 50Hz je nastaven poměr u/f konstantní. Jak bylo popsáno v kapitole 2, rozsah hodnot z tabulky je potřeba přepočítat následujícím vztahem

$$KR_a = 64275 + (\text{hodnota}[a] - 250) \cdot \frac{f}{f_n} \quad (10)$$

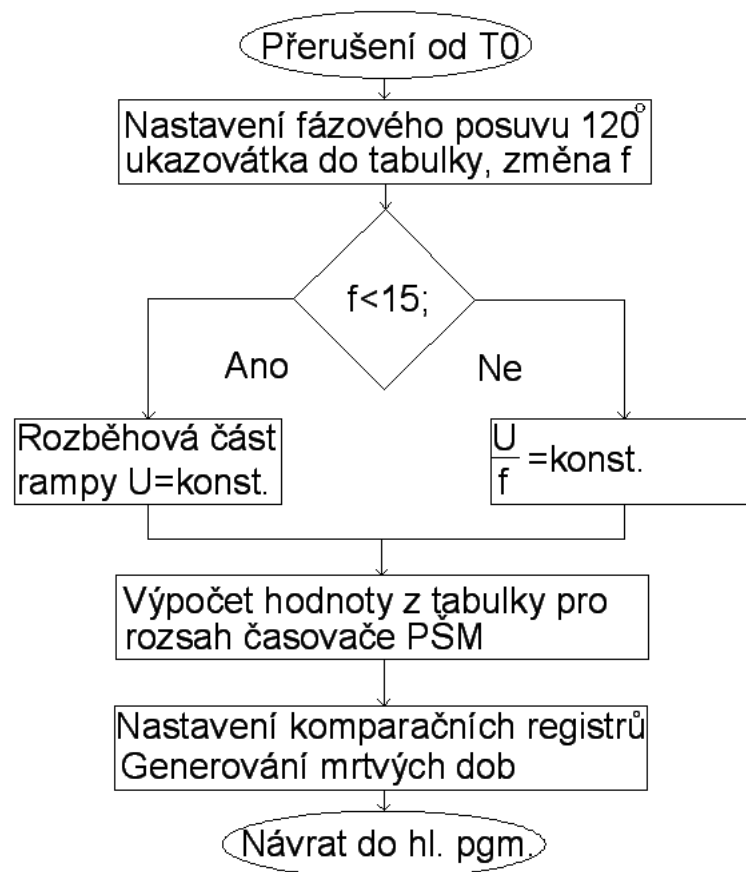
KR_akomparační registr a

f_njmenovitá hodnota frekvence [Hz]

fzadaná frekvence

hodnota[a] ... hodnota z tabulky na pozici a

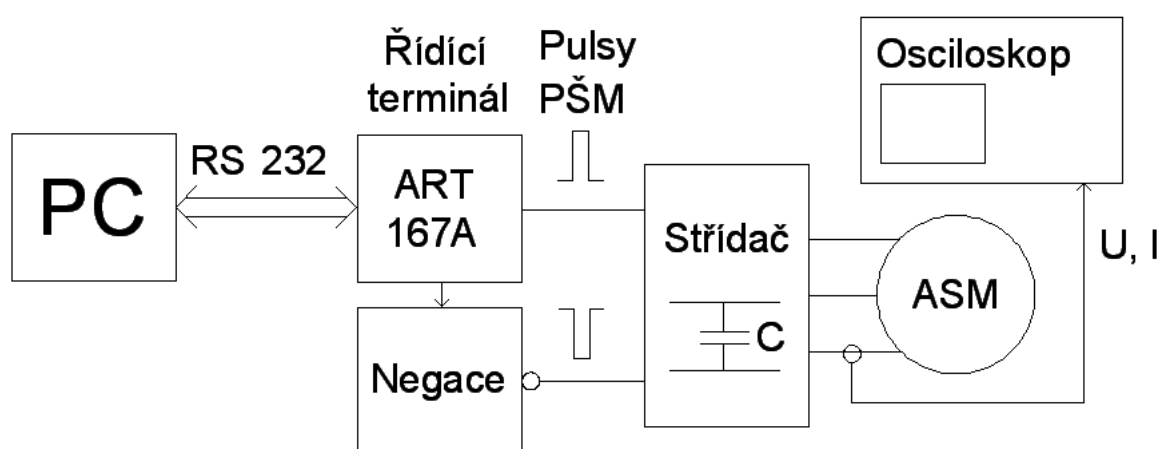
Hodnota 64275 je konstanta pro nastavení offsetu. Konstanta 250 se odčítá od každé hodnoty, protože jsou v matici pouze kladná čísla. Po vynásobení frekvencí se přičte k nastavenému offsetu. Toto je ukázka výpočtu pro jednu fázi. Tento výpočet se v každém přerušení počítá pro každou fázi zvlášť.



Obr. 20 Vývojový diagram pro regulační část frekvenčního měniče

6 Ověření vlastností naprogramovaného měniče na asynchronním motoru

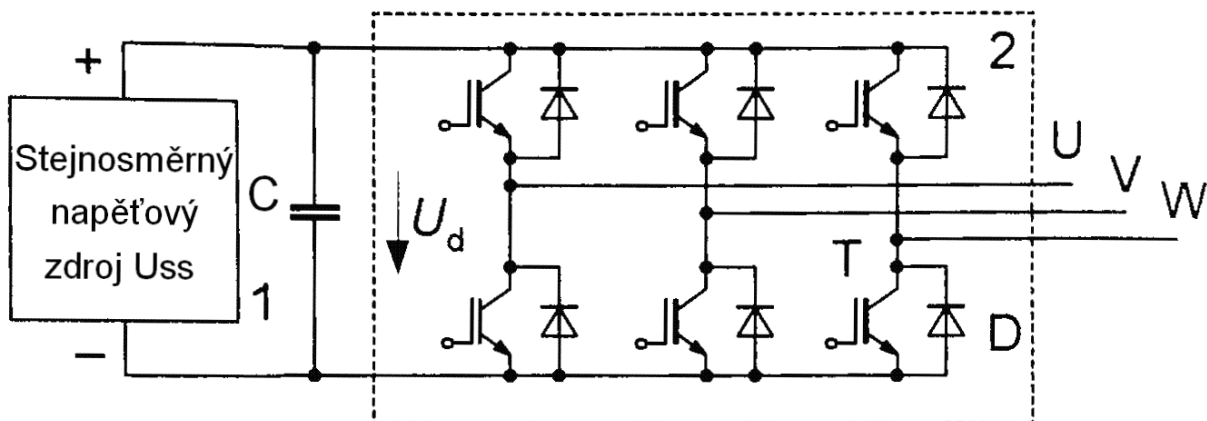
Na obrázku 21 je blokové schéma zapojení ověřování vlastností měniče. Ověření vlastností naprogramovaného měniče bylo realizováno na motoru s klecovou kotvou. Motor má štítkové hodnoty 220V/50Hz a jmenovitý výkon 100W.



Obr. 21 Blokové schéma zapojení ověřování vlastností měniče

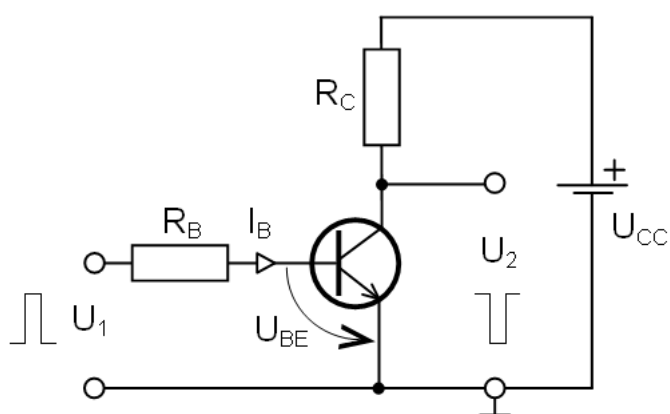
Jako koncový výkonový stupeň (střídač) byl použit školní modul v můstkovém zapojení dle obr. 22 Střídač je na vstupu napájen napětím 15V (stejnoseměrných SS). Na vstupu střídače je implementována logika pro vyhodnocení správného sledu vstupních pulsů. Pokud je vyhodnocena chyba, výkonová spínací část je odpojena. Tím je zaručeno ochránění spínacích prvků před poškozením.

Výkonová část je napájena napětím, na které je motor navržen (hodnota amplitudy napětí). Při ověřování vlastností bylo napájecí napětí 195V, protože ve zkušební laboratoři nebyl galvanicky oddělený zdroj s vyšším napětím k dispozici. Motor byl zapojen do trojúhelníku D, to znamená, že mělo být nastaveno napětí $220 \cdot \sqrt{2} = 310V$.



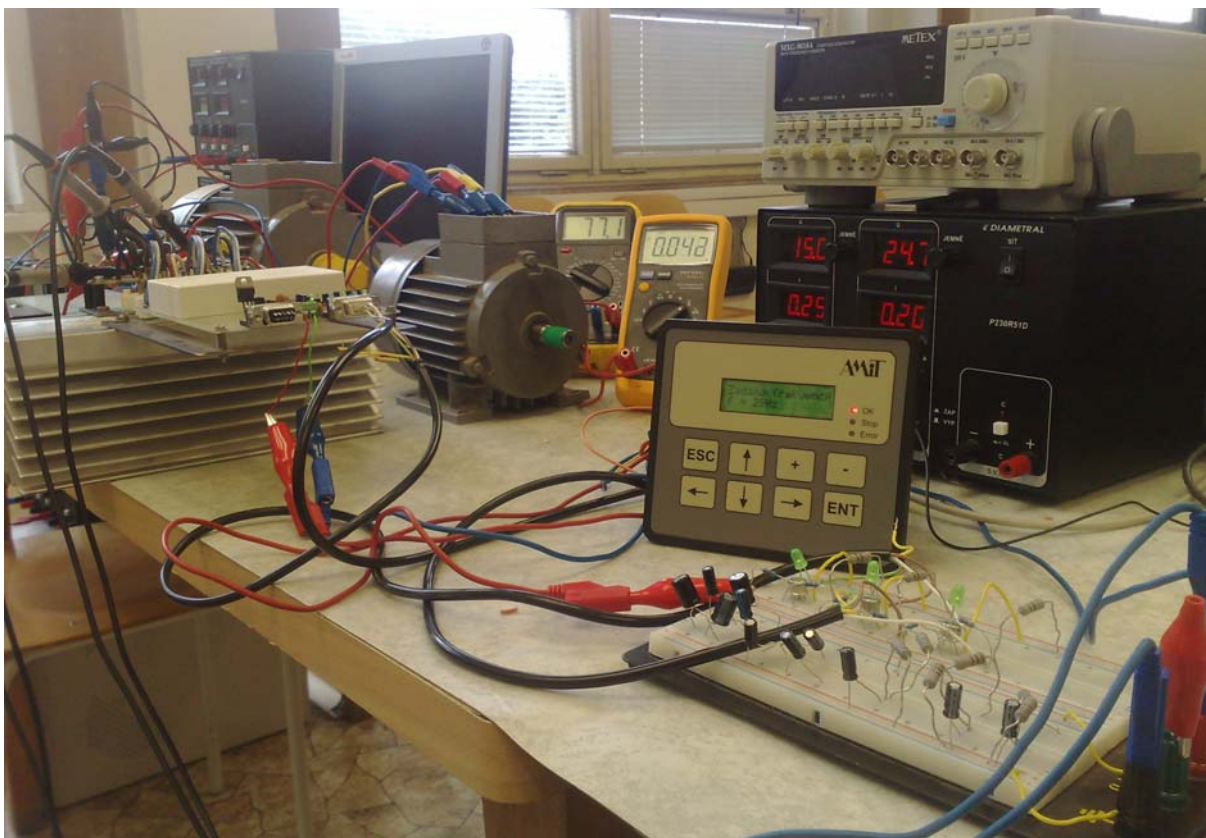
Obr. 22 Schéma zapojení třífázového můstkového střídače, 1) napájecí část, 2) výkonová (spínací) část s IGBT tranzistory

Jelikož se jedná o třífázový střídač, je zapotřebí šestice řídicích pulsů (trojice přímo vyvedených pulsů a trojice negovaných pulsů). Nejprve jsem negování realizoval logickým hradlem z řady CMOS 4000 (obvod 4009). Tento obvod se však neosvědčil. Pokud byl připojen pouze jeden vstup, obvod fungoval správně, při zapojení všech tří vstupů docházelo k zámkům. Logická úroveň výstupů byla v zakázané oblasti. Proto jsem negování trojice řídicích pulsů realizoval zapojením tranzistoru jako spínače (obr. 23). Toto zapojení již fungovalo bez potíží. Tento obvod byl sestaven na nespájkivém poli (obr. 24 vpravo dole).



Obr. 23 Schéma zapojení tranzistoru jako spínače pro negování pulsů PŠM

Na obrázku 24 je fotografie z laboratoře při ověřování vlastností naprogramovaného měniče. Uprostřed je měřený asynchronní motor, vlevo vedle něho je střídač, napravo od motoru řídicí terminál. Vpravo dole je nespájivé pole se zapojením tranzistoru jako spínače (pro negování trojice pulsů).



Obr. 24 Ověřování vlastností naprogramovaného měniče v laboratoři

Závěr

Cílem této práce bylo naprogramovat pulsně šířkový modulátor třífázové sítě a ověřit jeho vlastnosti na asynchronním motoru. Výše popsaný program generuje PŠM s frekvencí 1kHz. Regulace otáčivé rychlosti motoru je v rozmezí od 1 Hz do 50Hz. Program obsahuje nastavení rozběhové rampy, do 15Hz je nastaveno konstantní napětí, od 15Hz do 50Hz je nastaven poměr $u/f = \text{konstanta}$. Rovněž je zajištěno generování mrtvých dob pro správnou funkci střídače.

Prvním krokem při řešení zadaného problému, bylo naprogramování a ověření funkčnosti algoritmu ukazatele do tabulky, fázového posuvu 120° elektrických mezi jednotlivými fázemi a zadávání hodnoty frekvence z klávesnice. Tuto část programu jsem nejprve odladil na analogových výstupech terminálu.

Dalším krokem při ladění programu bylo nastavení komparační jednotky a číslicového výstupu. Ověření funkčnosti jsem realizoval nastavením 50% střídy a měření efektivní hodnoty na ručkovém voltmetru. Poté jsem program upravil dle vývojového algoritmu na obr. 9. Program generoval z jednoho výstupu PŠM. Abych ověřil nastavení programu, připojil jsem výstup na dolnofrekvenční propust (integrační RC článek) s vhodně zvolenou časovou konstantou. Obvod jsem realizoval na nespájkivém poli.

Po odladění výše popsané části jsem přistoupil k realizaci navrženého algoritmu třífázové sítě obr. 14. Frekvence PŠM jsem nejprve nastavil na 500Hz. Následovalo změření fázového posuvu mezi jednotlivými fázemi 120° elektrických na trojici RC článků (zobrazení průběhů na osciloskopu). Dále jsem naprogramoval a odladil generování mrtvých dob pro správnou funkci střídače, což obnášelo nastavení a opětovné proměření další trojice výstupu PŠM.

Abych mohl řídicí pulsy PŠM připojit na střídač, bylo zapotřebí znegovat trojici pulsů (viz kapitola 6). Rád bych podotkl, že odhalení příčiny proč hradlo nefungovalo správně zabralo poměrně hodně času. Nejprve po ladění a neodhalení chyby

v programu, jsem se zaměřil na pečlivé proměření zapojeného obvodu 4009. K dispozici jsem měl 8 kanálový osciloskop, na kterém byl velice zřetelně vidět problém.

Po zapojení a odzkoušení obvodu tranzistoru jako spínače (obr.), jsem připojil řídicí pulsy na vstupní část střídače a odzkoušel celé zapojení. Výstup střídače byl připojen nejprve na RC člancích, potom již na motoru. Po odladění drobných chyb v programu, jsem nastavil rozběhovou rampu (nastavení rampy bylo realizováno empiricky).

Po odladění verze PŠM na frekvenci 500Hz jsem začal odladovat verzi výstupu modulátoru na frekvenci 5kHz. Tato úprava obnášela přednastavení časovače T1 na požadovanou frekvenci. Aby správně fungovala rozběhová rampa, bylo nutné upravit přepočty algoritmu regulační části včetně pře-tabelování tabulky. Tato verze ovšem nefungovala, chod motoru byl nestabilní. Po úpravě programu bez rozběhové rampy, měl motor sice o málo lepší vlastnosti, ale měřený proud nebyl zdaleka sinusový.

Od této verze programu jsem opustil a přecházející postup opakoval na frekvenci 3kHz. Tato verze měla obdobné vlastnosti. Nastavil jsem frekvenci PŠM na 1,5kHz, ale ani tato verze neměla uspokojivé výsledky. Snížil jsem tedy frekvenci na 1kHz, tato verze se již osvědčila.

Závěr mého bádání je, že terminál v tomto nastaveném módu není vhodný pro frekvence vyšší než 1kHz. Dále by se mohlo vyzkoušet nastavit jiný mód komparační jednotky nebo detailně proměřit jednotlivé výstupy terminálu, tranzistorových spínačů a také vstupní obvod střídače. Další možností by bylo vyzkoušet jiný střídač. K tomuto detailnímu měření, jsem se z časových důvodů již nevěnoval. Při ověřování vlastností naprogramovaného měniče se vyskytly nepředvídatelné obtíže. Mnohdy se měření (ověřování, hledání příčiny chyby) protáhlo až do večerních hodin. Přestože hlavním úkolem bylo naprogramovat řídicí terminál ART267A, strávil jsem značnou část při ověřování vlastností naprogramovaného měniče (obvod výkonové části).

Do budoucna by bylo vhodné opustit metodu skalárního řízení a věnovat se dnes již častější a dokonalejší vektorové regulaci. To by mohlo být navazující téma pro diplomovou práci.

Seznam literatury

- [1] DOC. ING. MĚŘIČKA, CSC., Jiří, PROF. ING. DR. HAMATA, DRSC., Václav, DOC. ING. VOŽENÍLEK, CSC., Petr. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Zikova 4, 166 35 Praha 6 : ČVUT, 1993. 311 s. ISBN 80-01-01020-1.
- [2] PROF. ING. CAHA, CSC., Zdeněk, PROF. ING. ČERNÝ, CSC., Miroslav. *Elektrické pohony*. 1990. vyd. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. 355 s. ISBN 80-03-00418-7.
- [3] PROF. ING. PAVELKA, CSC., Jiří, PROF. ING. ČEŘOVSKÝ, DrSc., Zdeněk, DOC. ING. LETL CSC, Jiří. *Výkonová elektronika*. 2. upr. vyd. Praha : ČVUT PRAHA, 2007. 227 s. ISBN 978-80-01-0326-6.
- [4] JAVŮREK, Jiří. *Regulace moderních elektrických pohonů*. Tomáš Pavlica. 1. vyd. Praha : [s.n.], 2003. 264 s. ISBN 80-247-0507-9.
- [5] ROUBÍČEK, Ota. *Elektrické motory a pohony : příručka techniky, volby a užití vybraných druhů*. 1. vyd. Praha : BEN, technická literatura, 2004. 192 s. ISBN 80-7300-092-X.
- [6] DOC. ING. CHYSKÝ CSC., Jan, DOC. ING. NOVAK CSC., Jaroslav, ING. NOVAK, Lukáš. *Elektronické aplikace ve strojírenství : mikroprocesory*. 1. vyd. Praha : ČVUT, Zikova 4, 165 Praha 6, 1998. 146 s. ISBN 80-01-01744-3.
- [7] *Microcontroller SAB80C166 : Microcomputer Components*. München : [s.n.], 1997. 315 s. Dostupný z WWW:
<<http://search.datasheetcatalog.net/key/SAB80C166>>.
- [8] *Wikipedia* [online]. 2002 - [cit. 2009-05-25]. Dostupný z WWW:
<<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pwm.png>>.

- [9] *Elektrické stroje : Asynchronní motory* [online]. 2005 , 25.2.2006
[cit. 2009-05-25].Dostupný z WWW:
<<http://www.jsmilek.cz/skripta%20pdf/esp%209%20asm%20skripta.pdf>>.
- [10] *ART267A : Programátorská příručka*. 1. vyd. [s.l.] : [s.n.], 2001. 32 s.
- [11] *ART267A : Návod k obsluze*. 2. vyd. [s.l.] : [s.n.], 2001. 34 s.

Seznam zkratek

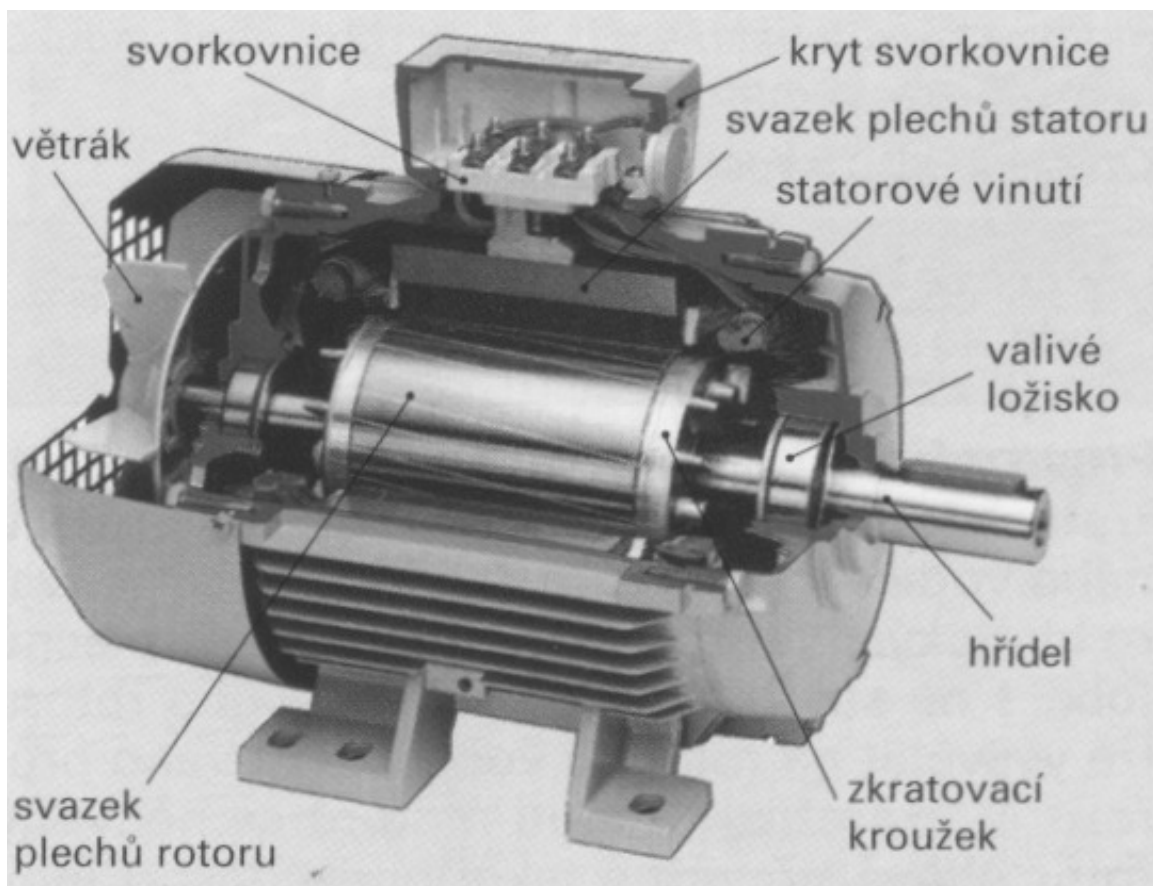
- PŠM – pulsně šířková modulace
- ASM – asynchronní motor
- KR – komparační registr
- CMOS – Complementary Metal–Oxide–Semiconductor, doplňující sekvo-oxid polovodič
- PC – personal computer, osobní počítač
- LED – light-emitting diode, světlo emitující dioda
- RS 232 – sériové linka
- T0REL – T0 reload register, návratový registr časovače T0
- T1REL – T1 reload register, návratový registr časovače T1
- RAM – random access memory, paměť s náhodným přístupem
- EEPROM – Electronically Erasable Programmable Read-Only Memory, elektricky mazatelná semipermanentní paměť ROM-RAM.
- CCx – capture/compare, záchytný/srovnávací registr
- CAPCOM – záchytná/srovnávací jednotka
- GPT1 – jednotka časovačů

Seznam obrázků

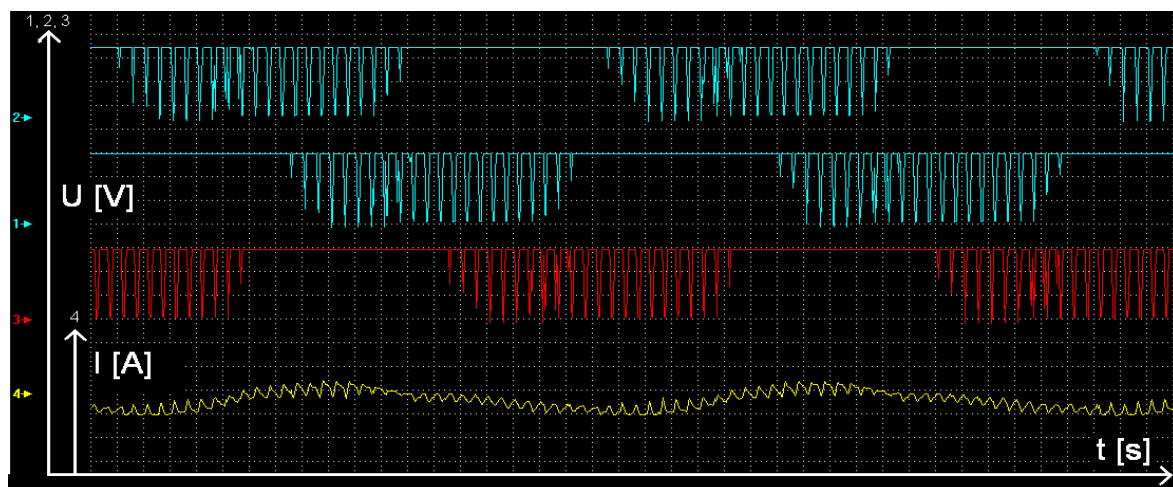
Obr. 1 Klecové vinutí [5].	10
Obr. 2 Typy rotorových drážek klecového vinutí a) jednoduchá, b) vírová, c) dvojitá (Boucherotova) klec [5].	10
Obr. 3 Typické momentové charakteristiky asynchronních motorů s klecovými rotory a) jednoduchá, b) vírová, c) dvojitá (Boucherotova) klec [5].....	11
Obr. 4 Přepínání cívek jedné fáze statoru ze základního spojení a) na sériové b) a paralelní c) [2].	13
Obr. 5 Přepínání vinutí statoru Y – YY [2].	14
Obr. 6 Mechanické charakteristiky při spojení Y – YY [2].	14
Obr. 7 Mechanické charakteristiky při spojení D – YY [2].	15
Obr. 8 Přepínání vinutí statoru D – YY [2].	15
Obr. 9 Náhradní schéma jedné fáze asynchronního motoru	17
Obr. 10 a) Změna napájecího napětí, b) mechanické charakteristiky asynchronního motoru [2].	18
Obr. 11 Mechanické charakteristiky frekvenčně řízeného motoru [2].	20
Obr. 12 Průběhy veličin při frekvenčním řízení asynchronního motoru (vlevo), minimální potřebný proud statoru pro stálý moment (vpravo) [2].	20
Obr. 13 Zjednodušený vývojový diagram programu	23

Obr. 14 Jednotka záchytných a komparačních registrů mikroprocesoru C167 [6]....	24
Obr. 15 Princip generování PŠM [8].	25
Obr. 16 Vývojový diagram pro generování PŠM	26
Obr. 17 Generování PŠM pomocí terminálu ART267A, komparační mód 3 [7].	27
Obr. 18 Vývojový diagram pro obsluhu klávesnice	28
Obr. 19 Vývojový diagram pro generování třífázové PŠM.....	31
Obr. 20 Vývojový diagram pro regulační část frekvenčního měniče	33
Obr. 21 Blokové schéma zapojení ověření vlastností měniče	34
Obr. 22 Schéma zapojení třífázového můstkového střídače, 1) napájecí část, 2) výkonová (spínací) část s IGBT tranzistory	35
Obr. 23 Schéma zapojení tranzistoru jako spínače pro negování pulsů PŠM	35
Obr. 24 Ověřování vlastností naprogramovaného měniče v laboratoři	36
Obr. 25 Řez asynchronním motorem s kotvou nakrátko [9]	45
Obr. 26 Průběhy 1, 2, 3 pulsy PŠM, průběh 4 proud jednou fází motoru měřeno při 5Hz.....	45

Přílohy



Obr. 25 Řez asynchronním motorem s kotvou nakrátko [9]



Obr. 26 Průběhy 1, 2, 3 pulsy PŠM, průběh 4 proud jednou fází motoru měřeno při 5Hz