



Fakulta elektrotechnická Research and Innovation Centre for Electrical Engineering

# Vícefázové stroje - prototyp devítifázového asynchronního stroje

Pracoviště:	RICE
Číslo dokumentu:	22190-028-2023
Typ zprávy:	Výzkumná zpráva
Řešitelé:	Ing. Patrik Kalaj
Hlavní řešitel:	Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
Počet stran:	18
Datum vydání:	20.12.2023
Oborové zařazení:	2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information en-
	gineering - Electrical and electronic engineering

Zadavatel / zákazník:

#### Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni Research and Innovation centre for Electrical Engineering Univerzitní 8 306 14 Plzeň

Kontaktní osoba: Ing. Patrik Kalaj tel. 377634194 kalaj@fel.zcu.cz

#### Tato zpráva vznikla s podporou projektu SGS-2021-021

#### Anotace

Tato výzkumná zpráva se zaměřuje na představeni prototypu devítifázový indukčního stroj a měřicího stanoviště. Jsou zde popsány technické parametry stroje tak i možností měření. Dále je zde proveden teoretický rozbor principu vytvoření vícepólového stroje při napájení vyššími harmonickými složkami.

#### Klíčová slova

Vícefázové stroje, devíti fázový asynchronní stroj, prototyp

### Název zprávy v anglickém jazyce

Multiphase machines - prototype of nine-phase induction machine

#### Anotace v anglickém jazyce

This research report focuses on the presentation of a prototype of a nine-phase induction machine and a measuring station. It describes both the technical parameters of the machine and the measurement capabilities. Furthermore, a theoretical analysis is conducted on the principle of creating a multipole machine when powered by higher harmonic components.

## Klíčová slova v anglickém jazyce

Multiphase machines, nine-phase induction machine, prototype

# Seznam symbolů a zkratek

$B_{\delta m-phase}$	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře
$H_x$	Intenzita magnetického pole
Ν	počet závitů cívky v drážce
$Q_1$	počet drážek motoru
$f_s$	Statorová frekvence
m	Počet fází
n	Mechanické otáčky (ot/min)
$p_{pv}$	Počet virtuálních pólpárů
$p_p$	Počet pólpárů
q	Počet drážek na pól a fázi
$u_i$	Indukované napětí
$u_m$	Modulační napětí
U/f	Konstanta pro určení amplitudy modulačního
	napětí
$\delta$	Šířka vzduchové mezera
ξ	Poloha cívky
$\mu$	Časové harmonické
ν	Prostorové harmonické
arphi	Posuv mezi fázemi
$\Phi$	Magnetický tok
$\Phi_p$	Magnetický tok v pólu - maximální hodnota
$\Phi_{pavg}$	Magnetický tok v pólu - průměrná hodnota
$\Phi_{pavg1}$	Magnetický tok v pólu - průměrná hodnota při
	základní harmonické
$\Phi_T$	Magnetický tok v zubu - maximální hodnota
$\Phi_{Tavg}$	Magnetický tok v zubu - průměrná hodnota
$\Phi_{Tavg1}$	Magnetický tok v zubu - průměrná hodnota
	při základní harmonické

Mechanická úhlová rychlost rotoru Elektrická úhlová rychlost rotoru

 $\omega_m$ 

 $\omega_e$ 

## Contents

1	Úvod	5
2	Analýza vícepólovosti u vícefázového stroje	6
3	Experimentální prototyp devítifázového asynchronního stroje	9
4	Závěr	15

# 1 Úvod

Vícefázové střídavé stroje, a to jak asynchronní, synchronií anebo reluktanční, jsou zajímavou alternativou namísto třífázových a to kvůli jejich výhodám. Mezi tyto výhody lze zařadit nízké zvlnění momentu, motor produkuje moment i při odpojení/poruše jedné nebo více fází, nižší fázový proud při stejném jmenovitém výkonu, vysoká hustota výkonu, což souvisí s nárůstem využití jha motoru, zvyšování momentu při injektáží vyšších harmonických, atd. Z těchto důvodů vícefázové systémy pronikají do různých aplikací, např. elektrické lodě, trakční motory pro tramvaje a lokomotivy, elektrická a hybridní vozidla, kde je vysoká hustota výkonu a také robustnost na prvním místě. [2, 6, 5, 4] Dále je možné vinutí statoru zapojit do různých kombinací, což přináší další variabilitu stroje. Počet zapojení vychází z rovnice (m+1)/2 pro obecný n-fazový stroj, kde m označuje počet fází [7].

#### 2 Analýza vícepólovosti u vícefázového stroje

Jednou z výhod vícefázových oproti třífázovým strojům je jejich vlastnost, že při napájení vyššími harmonickými se vytváří tzv. virtuální pólpáry  $(p_{pv})$  a tím i příslušné virtuální stroje. Každý tento virtuální stroj má vyšší počet pólpárů než základní stroj podle rovnice  $p_{pv} = \mu \cdot p_p$ , která platí pro vyšší harmonické, které jsou vhodné pro injektáž (je vysvětleno níže). Tyto virtuální pólpáry vznikají vynásobením statorové frekvence řádem příslušné časové harmonické  $\mu$ , a zároveň je tímto řádem vynásoben i fázový posuv  $(\mu \cdot \frac{2\pi}{m})$ , ale stále jsou zachovány fyzické posuvy mezi fázemi ve stroji ( $\frac{2\pi}{m}$ ). Jednotlivé fázové posuny pro devítifázový stroj jsou uvedeny v tabulce 2.1 pro liché harmonické (1., 3., 5., a 7). Ostatní harmonické a jejich násobky nejsou vhodné pro injektáž, např. 9. harmonická nevytváří točivé pole, a 2., 4.,6, a 8. harmonická se otáčejí v opačném směru. Tyto závěry jsou získány pomocí rovnice 1, která popisuje chovaní magnetického pole ve vzduchové mezeře motoru při injektáži, kde  $I^{\mu}$  (respektive I v rovnici 2) označuje amplitudu analyzovaného harmonického proudu,  $\alpha$  označuje mechanický úhel měřený ve vzduchové mezeře  $\delta$ ,  $\mu_0$  je permeabilita vakua, N je počet závitů cívky v drážce. Dále q označuje počet drážek na pól a fázi ( $q = \frac{Q_1}{pp \cdot m}$ ), kde  $Q_1$  označuje počet drážek motoru. Prostorové harmonické, které vycházejí z rozkladu pomocí Fourierovy řady, jdou zde označeny jako v. Pro devítifázový motor má rovnice 1 tvar uvedený v 2. Rovnice 1 a 2 vycházejí z popisu hypotetického vinutí s jednou cívkou napájené časově proměnným sinusovým proudem vytvářející magnetomotorickou sílu, to ukazuje rovnice 3, kde  $\xi$  je poloha cívky. Blíže se touto problematikou zabývá příspěvek [3].

$$B_{\delta \ m-phase}(\alpha) = 4\mu_0 I^{\mu} \frac{q_N}{\pi\delta} \sum_{\nu=1}^{\infty} \left[ \frac{\frac{1}{\nu} \sin\left(\nu \frac{\alpha_y}{2}\right) \sin\left(\nu \frac{1}{2}\alpha_1 m q\right) \frac{\sin\left(\nu \frac{1}{2}\alpha_1 q\right)}{q \sin\left(\nu \frac{1}{2}\alpha_1\right)}}{\sum_{k=1}^{m} \left[ \sin\left(\nu \frac{2\alpha + (1 - k4q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left(\left(\omega t - \frac{k - 1}{m} 2\pi\right) \cdot \mu\right) \right]} \right],$$
  
$$\alpha_1 = 2\pi/Q_1, \alpha_y = \beta \cdot \pi, \beta \in \langle 0; 1 \rangle$$
(1)

Fáze	1. harm.	3. harm.	5. harm	7. harm
A	0	0	0	0
В	$-2\pi/9$	$-2\pi/3$	$-10\pi/9$	$-14\pi/9$
C	$-4\pi/9$	$-4\pi/3$	$-2\pi/9$	$-10\pi/9$
D	$-6\pi/9$	0	$-12\pi/9$	$-6\pi/9$
E	$-8\pi/9$	$-2\pi/3$	$-4\pi/9$	$-2\pi/9$
F	$-10\pi/9$	$-4\pi/3$	$-14\pi/9$	$-16\pi/9$
G	$-12\pi/9$	0	$-6\pi/9$	$-12\pi/9$
Н	$-14\pi/9$	$-2\pi/3$	$-16\pi/9$	$-8\pi/9$
Ι	$-16\pi/9$	$-4\pi/3$	$-8\pi/9$	$-4\pi/9$

Tab. 2.1: Fázový posun (elektrické úhly) v devítifázovém stroji při injektáži lichých harmonických složek

$$B_{\delta \ 9-phase}(\alpha) = 4\mu_0 I \frac{qN}{\pi\delta} \sum_{\nu=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\nu} \sin\left(\nu \frac{\alpha_y}{2}\right) \sin\left(\nu \frac{1}{2}\alpha_1 mq\right) \frac{\sin\left(\nu \frac{1}{2}\alpha_1 q\right)}{q\sin\left(\nu \frac{1}{2}\alpha_1\right)} \cdot \left[ \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-4q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left(\omega t \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-8q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{2}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-16q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{6}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-26q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{6}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-24q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{10}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-22q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{12}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-32q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{14}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-32q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{14}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-32q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-32q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-32q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi\right) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi\right) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \sin\left((\omega t - \frac{16}{9}\pi\right) \cdot \mu\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \left(\frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) \cdot \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1-36q)\alpha_1}{2}\right) + \sin\left(\nu \frac{2\alpha+(1$$

$$H_x(\alpha) = \frac{2 \cdot i}{\pi \delta} \sum_{\nu=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{\nu} \sin\left(\nu \frac{\alpha_y}{2}\right) \cos\left(\nu \cdot \left(\alpha - \left(\xi + (x-1)\right) \cdot \alpha_1\right)\right) \right]$$
(3)

Pro případ devítifázového stroje s jedním pólpárem jsou na obrázcích 2.1a a 2.1b ukázány průběhy rozložení magnetického pole ve vzduchové mezeře. Pro jednotlivé průběhy magnetického pole je naznačen směr otáčení. V obrázku 2.1a se zobrazuje průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro harmonické vhodné k injektáži, jedná se o 3., 5., a 7. harmonickou spolu se základní harmonickou. Na průbězích je patrné zvýšení počtu pólpárů při injektáži. Toto zvýšení počtu pólpárů odpovídá násobku konkretní harmonické ( $\mu \cdot \frac{2\pi}{9}$ ). Při napájení vyššími harmonickými složkami vzroste statorová frekvence a zároveň se zvyšuje počet pólpárů a tím dochází ke shodné mechanické rychlosti pro základní a vyšší harmonické. To ale platí jen pro případ vyšších harmonických, které jsou vhodné pro injektáž. Na obrázku 2.1b jsou ukázány průběhy vyšších harmonických, které nejsou vhodné pro injektáž např. z důvodu nesprávného



Obr. 2.1: Rozložené magnetické pole ve vzduchové mezeře devítifázového motoru s jedním pólpárem - vliv vyšších harmonických

Tab. 2.2: Počet pólpárů, statorová frekvence a mechanická rychlost motoru při napájení základní harmonickou a vyššími harmonickými složkami (liché) pro prototyp devítifázového motoru

Harmonická	$p_p$	$f_s$ (Hz)	n (ot/min)
1.	2	50	1500
3.	6	150	1500
5.	10	250	1500
7.	14	350	1500

směru rotace magnetického pole (2., 4., 6., 8., harmonická) anebo nevytváří virtuální pólpáry (10. harmonická).

Pro devítifázový stroj, na kterém je provedeno experimentální ověření, blíže je popsán v kapitole 3, jsou v tabulce 2.2 uvedeny parametry (počet pólpárů a statorová frekvence) virtuálních strojů při napájení vyššími harmonickými složkami, které jsou vhodné pro injektáž. Dále je zde uvedena výsledná mechanická rychlost na hřídeli stroje, která je pro všechny uvedené harmonické shodná. Pro srovnaní jsou v této tabulce uvedeny parametry stroje i pro základní harmonickou.

+

# 3 Experimentální prototyp devítifázového asynchronního stroje

Pro ověření teoretických předpokladů o vícefázových strojů byl postaven experimentální prototyp devítifázového asynchronního motoru s klecí nakrátko, který ukazuje obrázek 3.1 s osazeným inkrementálním rotačním snímačem IRC315 (4096 pulzů na otáčku). Parametry tohoto stroje jsou uvedeny v tabulce 3.1. Napájení motoru je řešeno pomocí tří identických napěťových střídačů se čtyřmi půlmůstky, které mají společný meziobvod viz. schéma na obrázku 3.4. Měniče spolu s řídící jednotkou (MLC interface) jsou ukázány na obrazu 3.2. Řídící jednotka je osazena mikrokontrolérem TI TMS320F28335. Spínací frekvence střídačů je 7 kHz. Měření proudu je realizováno pomocí čidel LEM, kterými jsou vybaveny střídače, o následné zpracování se stará řídící jednota.

Experimentální motor je možné připojit ke standardnímu třífázovému asynchronnímu motoru, který slouží jako zátěž. Motory jsou poté spojeny přes čidlo momentové T20WN, které umožňuje měřit moment a otáčky. Měřící stand zachycuje obrázek 3.5. Na svorkovnici motoru (obrázek 3.6 )jsou kromě vynutí stroje (začátek vinutí velká písmena, konec vinutí mala písmena) vyvedeny vodiče z teplotních senzoru PT100 a měřicí cívky pro měření indukovaného napětí. Díky vyvedení obou stran vinutí je možné motor přepojit do 5 variant zapojeni statorového vinutí: hvězda, devitiúhelník, enneagram, trojitý trojúhelník a velký enneagram. Schémata zapojení jsou uvedena na obrazcích 3.3a až 3.3e.



Obr. 3.1: Experimentální devítifázový asyn- Obr. 3.2: Střídače a řídící jednotka (MLC) pro chronní motor s osazený otáčkovým čidlem



devítifázový asynchronní motor



Obr. 3.3: Konfigurace zapojení statorového vinutí u devítifázového motoru [1]

Parametry	Hodnota
Počet pólpárů	2
Počet fází	9
Jmenovitý příkon (kW)	15
Jmenovitá efektivní hodnota napětí na fázi (V)	380
Jmenovitá efektivní hodnota proudu na fázi (A)	5,85
Jmenovitá frekvence (Hz)	50
Jmenovité otáčky (ot/min)	1480
Počet statorových drážek	36
Počet závitů v drážce	57
Počet tyčí klece rotoru	28
Počet závitů v sérii	114
Počet závitů jedné cívky	57
Závit rozdělen 3 paralelními vodiči o průměru (mm)	0,71
Celkový počet vodičů v drážce	171
Odpor statoru ( $\Omega$ )	1,46

Tab. 3.1: Parametry devítifázového asynchronního motor



Obr. 3.4: Schéma zapojení devitífázového střídače



Obr. 3.5: Měřící stand pro zatížení devítifázového motoru



Obr. 3.6: Svorkovnice na stroji - popis

Schéma zapojení hlavního vinutí stroje je na obrázku 3.7. Parametry hlavního vinut jsou uvedeny v tabulce 3.1. Jak již bylo zmíněno, na svorkovnici (obrázek 3.6 ) jsou vyvedeny měřici cívky, aby bylo možné změřit průběh magnetického toku v motoru. To je provedeno pomocí čtyř měřících cívek, které jsou instalovány ve statoru (viz obrázek 3.9)a slouží pro měření indukovaného napětí - dvě na pólové rozteči a dvě na zubech statoru (na každém jedna). Na obrázku 3.8a jsou schématicky ukázány měřící vinutí na pólovém nástavci (cívka umístěna na dně drážky – vývody označeny PD1 a PD2, cívka umístěna u vzduchové mezery – vývody označeny PV1 a PV2). Průměr vodiče je 0,2 mm a počet zavitu jedné cívky se rovna 6. Na obrázku 3.8b zobrazuje vinutí na dvou zubech. Vývody vinutích označené jako ZD1 a ZD2 jsou umístěny na dně drážky a vývody označené jako ZV1 a ZV2 jsou umístěny u vzduchové mezery. Průměr vodiče je 0,2 mm a počet zavitu jedné cívky se rovna 30. Změřené indukované napětí je možné poté vhodně zpracovat. Ukázka navinutí měřící cívky na zubu je na obrázku 3.9. Umístění měřicích cívek, jak na zubu tak i na pólu, je ukázáno na obrázku 3.7 šedou barvou.



Obr. 3.7: Schéma zapojení vinutí



(a) Umístění měřící cívky podle pólové rozteče (cívka umístěna na dně drážky vývody označeny PD1 a PD2, cívka umístěna u vzduchové mezery vývody označeny PV1 a PV2)



(b) Umístění měřící cívky na zubu (Vývody vinutích označené jako ZD1 a ZD2 jsou umístěny na dně drážky a vývody označené jako ZV1 a ZV2 jsou umístěny u vzduchové mezery)

Obr. 3.8: Schématické zobrazení umístění měřících cívek ve statoru



Obr. 3.9: Statorové vinutí devítifázového asynchronního motoru s měřící cívkou na zubu

Řízení pro tento stroj je provedeno, co nejvíce variabilně, aby bylo možné ověřit jeho vlastnosti. Základní řízení je provedeno bez zpětné vazby od čidla otáček nebo proudu. Výstupem z tohoto řízení je modulační napětí, u kterého lze libovolně měnit vliv jednotlivých harmonických složek. Modulační napětí  $u_m$  se skládá ze součtu jednotlivých harmonických (1., 3., 5., a 7.) viz výraz 4. Konstanty  $V_1$ ,  $V_3$ ,  $V_5$  a  $V_7$  slouží k úpravě vlivu od jednotlivých harmonických složek a amplituda modulačního napětí je určeno na základě statorové frekvence  $f_s$  a na konstanty <sup>U</sup>/f. Řídicí SW umožňuje vypínat u jednotlivých fází spínaní a tím vytvořit stav, kdy vypadne jedna fáze z chodu. Díky tomu jednoduchému způsobu řízeni je možné otestovat celou řadu možností napájeni vícefázový stroje např. napájení jen vyššími harmonickými složkami, změnit fázový posuv - vytvořit třífázový motor. Dále je možné využit pro řízení i vektorové řízení (pozn.: bude blíže popsaná v další výzkumné zprávě).

$$u_m = f_s \cdot U/f \cdot (V_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t + \varphi_m) + V_3 \cdot \sin((2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t + \varphi_m) \cdot 3) + V_5 \cdot \sin((2\pi \cdot f_s \cdot t + \varphi_m) \cdot 5) V_7 \cdot \sin((2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t + \varphi_m) \cdot 7)), \qquad (4)$$
$$\varphi_m = k \cdot \frac{2\pi}{9}, \ m = 1, 2 \dots 9, \ k = 0, 1 \dots 8$$

Ovládání samotných měničů je řešeno přes FPGA, mikrokontrolér neposkytuje dostatek PWM bran. V FPGA je řešen, modulátor, který má nastavenou spínací frekvenci na 7 kHz, pila je symetrická a počítá od -3572 do 3572. Dále je zde ošetřeny deadtime, vypínání měniče respektive jeho spínání, vypínání jednotlivých fází. V tabulce 3.2 jsou uvedeny adresy pro dané proměnné/funkce. Tato tabulka je aktuální k verzi 3 ve FPGA.

Funkce	Adresa
Fáze A	0x32
Fáze B	0x33
Fáze C	0x33
Chopper	0x35- první bit
vypínání/zapínání spínáni pro měnič	0x38 - první bit
vypínaní jednolitých fází	0x39
Fáze D	0x42
Fáze E	0x43
Fáze F	0x43
Vypínání choppru	0×49
Fáze G	0x52
Fáze H	0x53
Fáze I	0x53
Test zápis	0×70
Test čteni	0x71
Verze	0x72

Tab. 3.2: Adresy v FPGA

### 4 Závěr

V této zprávě byl popsán prototyp devítifázového asynchronního motoru spolu se základním řízením. Jsou zde uvedeny parametry stroje a specifika stroje jako měřící cívky a teplotní senzory. Dále zde byl proveden stručný teoretický rozbor problematiky vícepólovosti.

#### References

- R. Cermak et al. "Nine-Phase Induction motor with Harmonic Injection and Different Winding Topology". In: 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). Vol. 1. 2020, pp. 2125–2131.
- [2] Mario J. Duran, Emil Levi, and Federico Barrero. "Multiphase Electric Drives: Introduction". In: Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. American Cancer Society, 2017, pp. 1–26. ISBN: 9780471346081.
- [3] Vladimir Kindl et al. "Review of Time and Space Harmonics in Multi-Phase Induction Machine". In: *Energies* 13.2 (2020). ISSN: 1996-1073.
- [4] E. Levi. "Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications". In: *IEEE Trans*actions on Industrial Electronics 55.5 (2008), pp. 1893–1909.
- [5] E. Levi, F. Barrero, and M. J. Duran. "Multiphase machines and drives Revisited". In: IEEE Transactions on Industrial Electronics 63.1 (2016), pp. 429–432.
- [6] E. Levi et al. "Multiphase induction motor drives a technology status review". In: *Electric Power Applications, IET* 1.4 (July 2007), pp. 489–516. ISSN: 1751-8660.
- [7] A. Mohammadpour, S. Sadeghi, and L. Parsa. "A Generalized Fault-Tolerant Control Strategy for Five-Phase PM Motor Drives Considering Star, Pentagon, and Pentacle Connections of Stator Windings". In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61.1 (2014), pp. 63–75.

# List of Figures

2.1	Rozložené magnetické pole ve vzduchové mezeře devítifázového motoru s jed-			
	ním pólpárem - vliv vyšších harmonických	8		
3.1	Experimentální devítifázový asynchronní motor s osazený otáčkovým čidlem .	9		
3.2	Střídače a řídící jednotka (MLC) pro devítifázový asynchronní motor	9		
3.3	Konfigurace zapojení statorového vinutí u devítifázového motoru $[1]$	10		
3.4	Schéma zapojení devitífázového střídače	11		
3.5	Měřící stand pro zatížení devítifázového motoru	11		
3.6	Svorkovnice na stroji - popis	11		
3.7	Schéma zapojení vinutí	12		
3.8	Schématické zobrazení umístění měřících cívek ve statoru	13		
3.9	Statorové vinutí devítifázového asynchronního motoru s měřící cívkou na zubu	13		

## List of Tables

2.1	Fázový posun (elektrické úhly) v devítifázovém stroji při injektáži lichých har-	
	monických složek	7
2.2	Počet pólpárů, statorová frekvence a mechanická rychlost motoru při napájení	
	základní harmonickou a vyššími harmonickými složkami (liché) pro prototyp	
	devítifázového motoru	8
3.1	Parametry devítifázového asynchronního motor	10
3.2	Adresy v FPGA	14

## Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
1	Všechny	První revize zprávy		