

Vícefázové stroje - měření na devítifázovém asynchronním stroji

Pracoviště: RICE
Číslo dokumentu: 22190-0029-2023
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Ing. Patrik Kalaj
Hlavní řešitel: Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
Počet stran: 24
Datum vydání: 1.7.2021
Oborové zařazení: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering - 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 experimentální měření na vícefázovém stroji. Cílem měření je analyzovat chování tohoto typu stroje při napájení vyššími harmonickými složkami při různých provozních stavech. Pro měření je využit prototyp devítifázového asynchronního motoru o výkonu 15 kW.

Klíčová slova

Devíti fázový asynchronní stroj, experimentální měření, vyšší harmonické složky

Název zprávy v anglickém jazyce

Multiphase machines - measurement on of nine-phase induction machine

Anotace v anglickém jazyce

This research report focuses on experimental measurements on a multiphase machine. The goal of the measurements is to analyze the behavior of this type of machine when powered by higher harmonic components under various operating conditions. A prototype of a fifteen-kilowatt nine-phase induction machine is used for the measurements.

Klíčová slova v anglickém jazyce

Nine-phase induction machine, experimental measurements, higher harmonic components

Seznam symbolů a zkratk

$B_{\delta m-phase}$	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře
H_x	Intenzita magnetického pole
N	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
δ	Šířka vzduchové mezera
ξ	Poloha cívky
μ	Časové harmonické
ν	Prostorové harmonické
φ	Posuv mezi fázemi
Φ	Magnetický tok
Φ_p	Magnetický tok v pólu - maximální hodnota
$\Phi_{p avg}$	Magnetický tok v pólu - průměrná hodnota
$\Phi_{p avg1}$	Magnetický tok v pólu - průměrná hodnota při základní harmonické
Φ_T	Magnetický tok v zubu - maximální hodnota
$\Phi_{T avg}$	Magnetický tok v zubu - průměrná hodnota
$\Phi_{T avg1}$	Magnetický tok v zubu - průměrná hodnota při základní harmonické

ω_m

Mechanická úhlová rychlost rotoru

ω_e

Elektrická úhlová rychlost rotoru

Contents

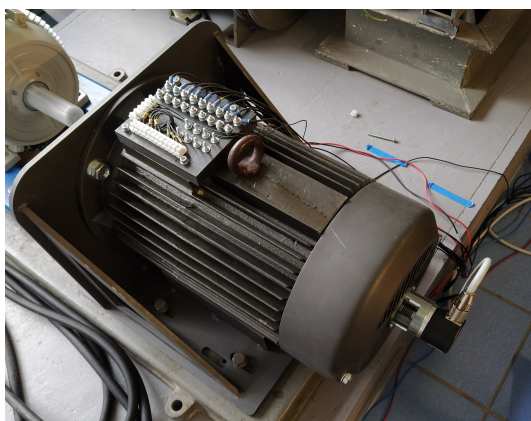
1	Úvod	5
2	Experimentální prototyp devítifázového asynchronního stroje	6
3	Měření vlivu vyšších harmonických na změnu magnetického toku	10
4	Měření momentových charakteristik při injektáži	16
5	Závěr	21

1 Úvod

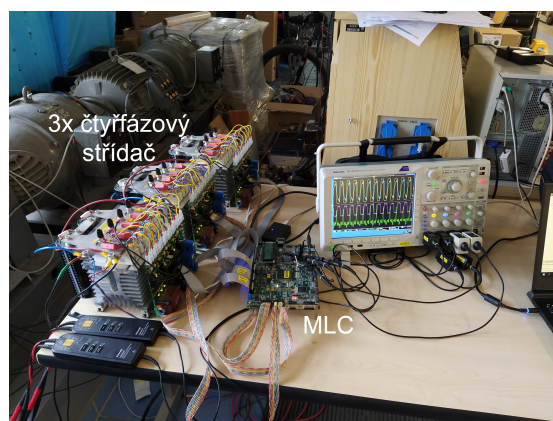
Vícefázové stroje, a to jak asynchronní, synchronní anebo reluktanční, jsou zajímavou alternativou k třífázovým a to kvůli jejich nesporným výhodám. Mezi tyto výhody lze zařadit nízké zvlnění momentu, motor produkuje moment i při odpojení/poruše jedné nebo více fází, nižší fázový proud při stejném jmenovitém výkonu, vysoká hustota výkonu, což souvisí s nárůstem využití jha motoru, zvyšování momentu při injektáží vyšších harmonických, atd. [2, 5, 4, 3] A právě možnost zvyšování momentu pomocí injektáže vyšších harmonických složek je ověřena v této zprávě. Měření je provedeno na devítifázovém asynchronním stroji. Jsou provedeny dvě měření. První má za cíl ověřit vliv injektáže na tvar magnetického toku a druhé měření se zabývá vlivem injektáže na momentové charakteristiky.

2 Experimentální prototyp devítifázového asynchronního stroje

Měření je provedeno na experimentální prototyp devítifázového asynchronního motoru s klecí nakrátko, který ukazuje obrázek 2.1 s osazeným inkrementálním rotačním snímačem IRC315 (4096 pulzů na otáčku). Parametry tohoto stroje jsou uvedeny v tabulce 2.1. Pro napájení jsou využity 3 napěťové měniče, které jsou ukázány na obrázku 2.2, spínací frekvence těchto měničů je 7 kHz. Zapojení měničů je ukázáno na obrázku 2.3.



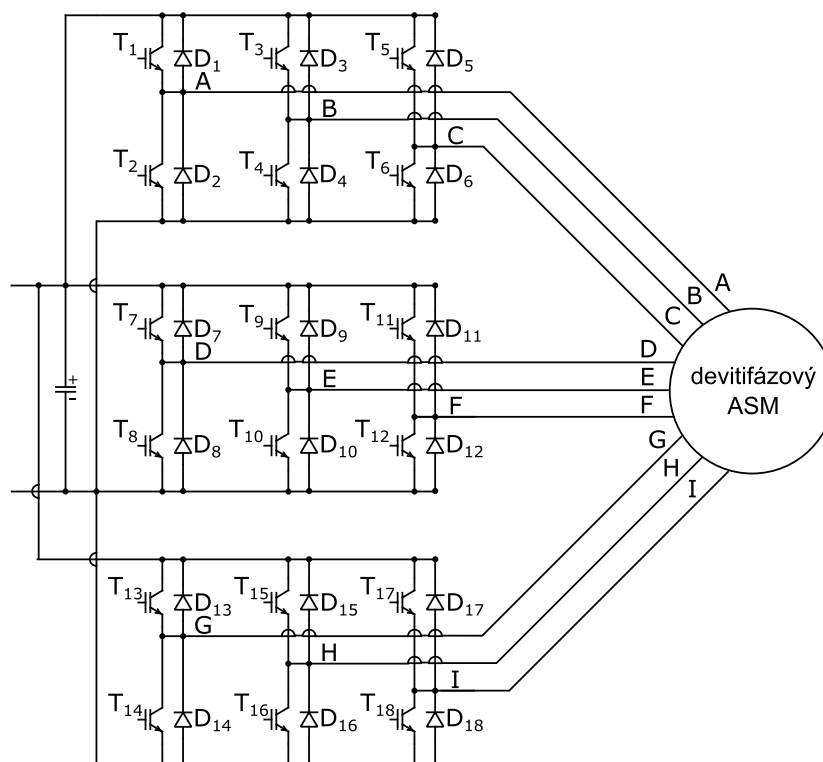
Obr. 2.1: Experimentální devítifázový asynchronní motor s osazeným otáčkovým čidlem



Obr. 2.2: Střídače a řídicí jednotka (MLC) pro devítifázový asynchronní motor

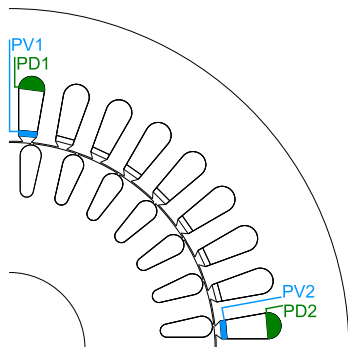
Tab. 2.1: Parametry devítifázového asynchronního motor

Parametry	Hodnota
Počet pólů	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 (Ω)	1,36

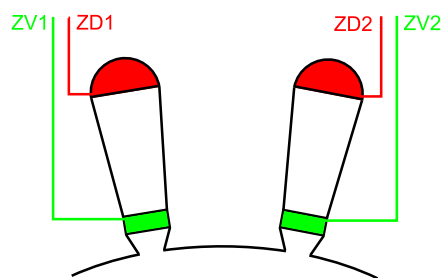


Obr. 2.3: Schéma zapojení devítifázového střídače

Motor je vybaven čtyřmi měřicími cívkami ve statoru, aby bylo možné změřit průběh magnetického toku v motoru respektive indukované napětí. Dvě cívky jsou na pólové rozteči a dvě na zubech statoru (na každém jedna). Na obrázku 2.4a jsou schématicky ukázány měřící vinutí na pólovém nastavci (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 2.4b 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. Blíže je tento stroj popsán ve výzkumné zprávě: Vícefázové stroje - prototyp devítifázového asynchronního stroje (číslo dokumentu 22190-028-2023).



(a) Umístění měřicí 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 měřicí 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. 2.4: Schématické zobrazení umístění měřících cívek ve statoru

Řízení pro uvedená měření je provedeno na základní úrovni bez zpětné vazby od proudu nebo čidla otáček. Modulační napětí u_m se skládá ze součtu jednotlivých harmonických (1., 3., 5., a 7.) viz výraz 1. 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 U/f .

$$u_m = f_s \cdot U/f \cdot (V_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t + \varphi_m) + V_3 \cdot \sin((2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t + \varphi_m) \cdot 3) + V_5 \cdot \sin((2 \pi \cdot f_s \cdot t + \varphi_m) \cdot 5) + V_7 \cdot \sin((2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t + \varphi_m) \cdot 7)), \quad (1)$$

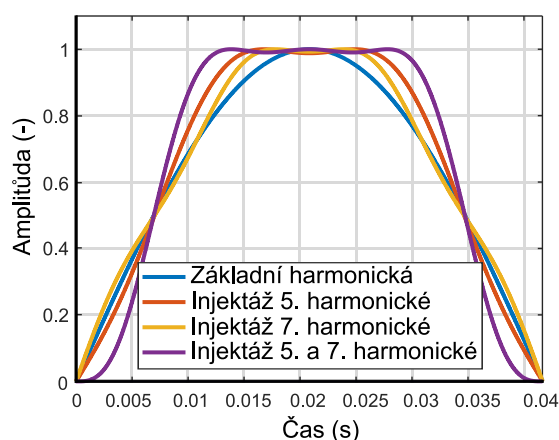
$$\varphi_m = k \cdot \frac{2\pi}{9}, \quad m = 1, 2 \dots 9, \quad k = 0, 1 \dots 8$$

3 Měření vlivu vyšších harmonických na změnu magnetického toku

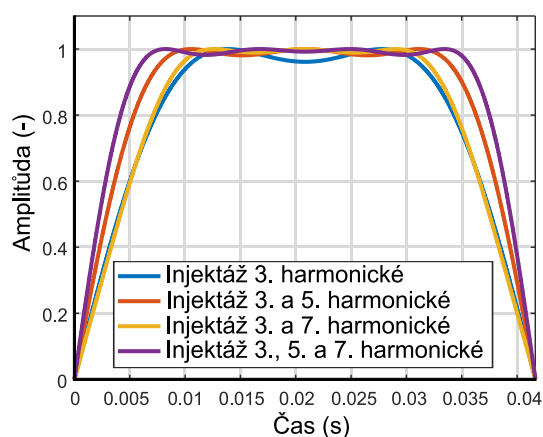
Toto měření mělo za cíl ověřit vliv zvyšování magnetického toku v zubu a pólu při injektáži vyšších harmonických na nezátíženém motoru. Při injektáži jsou využity hodnoty konstant V , jsou určeny jako optimum pro získání lichoběžníkového průběhu s co nejkolmějšími hranami při zachování stejné amplitudy. Hodnoty konstant V_1 , V_3 , V_5 a V_7 jsou uvedeny v tabulce 3.1 pro kombinace základní harmonické a harmonických vyšších řádů (3., 5. a 7. - vhodné pro injektáž). Tvary průběhů pro injektáž vyšších harmonických při použití konstant z tabulky 3.1 jsou zobrazeny na obrázcích 3.1a a 3.1b.

Tab. 3.1: Konstanty V pro kombinace první a ostatních harmonických pro dosažení lichoběžníkového tvaru

Kombinace harmonický	V_1	V_3	V_5	V_7
1.	1	0	0	0
1.+3.	1,1547	0,1933	0	0
1.+5.	1,0515	0	-0,0635	0
1.+7.	1,0257	0	0	0,0331
1.+3.+5.	1,2072	0,2785	0,0714	0
1.+3.+7	1,1708	0,1910	0	-0,0202
1.+5.+7.	1,0774	0	-0,1356	-0,0582
1.+3.+5.+7.	1,2311	0,3275	0,1255	0,0369

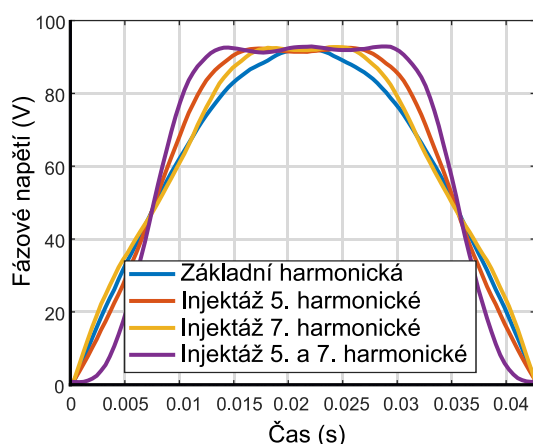


(a) Příklad injektáže 5. a 7. harmonické

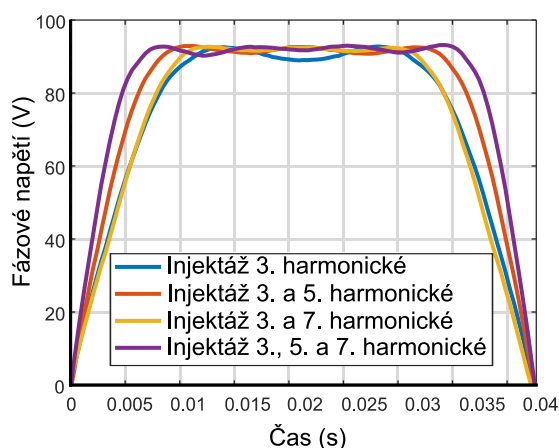


(b) Příklad injektáž 3., 5. a 7. harmonické

Obr. 3.1: Teoretické průběhy fázového napětí při injektáži vyšších harmonických

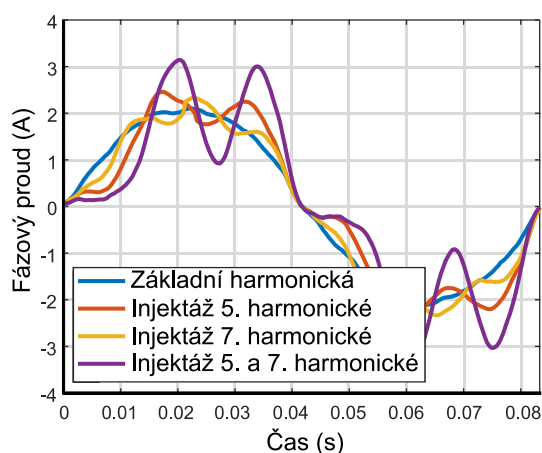


(a) Příklad injektáž 5. a 7. harmonické

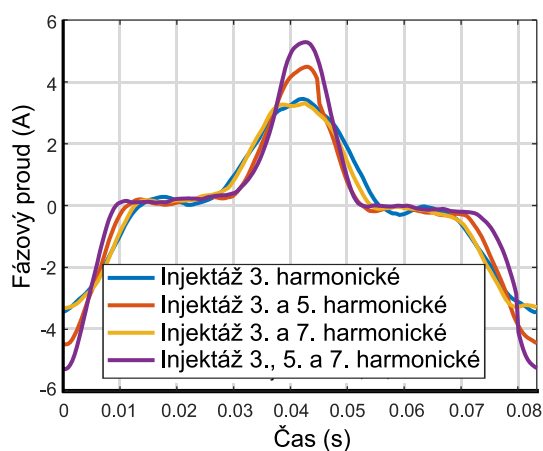


(b) Příklad injektáž 3., 5. a 7. harmonické

Obr. 3.2: Modulační napětí při injektáži vyšších harmonických



(a) Příklad injektáž 5. a 7. harmonické



(b) Příklad injektáž 3., 5. a 7. harmonické

Obr. 3.3: Měřené fázové proudy při injektáži vyšších harmonických

Měření bylo provedeno na nezatíženém motoru při statorové frekvenci 12 Hz a napětí v meziobvodu bylo 200 V. Konstanta U/f pro určení napětí byla 7,6. Průběhy napětí a proudu při injektáži jsou ukázány na obrázcích 3.2a, 3.3a pro injektáž 5. a 7. harmonické a na obrázcích 3.3b, 3.2b pro injektáž 3., 5. a 7. harmonické. Maximální a efektivní hodnoty napětí a proudu pro uvedené průběhy jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Cílem měření bylo ověřit teoretické předpoklady o zvyšování magnetického toku v zubu a pólu při injektáži vyšších harmonických. Magnetické toky, které jsou zde prezentovány v obrázcích 3.4 a 3.5, jsou určeny prostřednictvím indukovaného napětí, které je měřeno na cívkách v motoru. Umístění cívek je ilustračně znázorněno na obrázcích 2.4a pro pól a na 2.4b pro zub. Při určování magnetického toku je uvažován předpoklad, že stroj je tzv. ideální s plným vinutím, a proto je možné využít rovnice 2 pro určení magnetického toku Φ z indukovaného napětí u_i , kde N označuje počet závitů cívky.

Tab. 3.2: Změřené hodnoty fázového napětí a proudu

Kombinace harmonických	$U_{\max}$ (V)	U_{rms} (V)	$I_{\max}$ (A)	I_{rms} (A)
1.	92,27	64,75	2,11	1,52
1.+3.	92,88	77,26	3,46	1,88
1.+5.	92,66	68,72	2,49	1,63
1.+7.	92,79	66,88	2,35	1,56
1.+3.+5.	93,00	81,83	4,5	2,12
1.+3.+7	92,90	78,02	3,33	1,915
1.+5.+7.	82,88	71,61	3,15	1,79
1.+3.+5.+7.	93,20	83,76	5,28	2,38

$$\Phi = N \cdot \int u_i dt \quad (2)$$

Porovnání magnetického toku Φ_p , který je určen z měřeného napětí na pólu pomocí cívky (viz. obrázek 2.4a), a toku ze simulace, je provedeno v tabulce 3.3, která ukazuje maximální hodnoty toku, a v tabulce 3.4, ve které jsou průměrné hodnoty toku $\Phi_{p\text{avg}}$ z půl periody. V obou těchto tabulkách je uveden procentuální nárůst toku v porovnání s případem bez injektáže to znamená jen základní harmonická. Průběhy toku zachycují obrázky 3.4a a 3.4b. Dále byly sledovány změny toku v zubu Φ_T . Tento tok byl opět určen na základě napětí na měřicí cívkce (viz. obrázek 2.4b). Porovnání magnetického toku na zubu z měření a ze simulace je rovněž provedeno ve dvou tabulkách. V tabulce 3.5 jsou ukázány maximální hodnoty toku v zubu a v tabulce 3.6 jsou průměrné hodnoty toku v zubu $\Phi_{T\text{avg}}$. I zde je uveden procentuální nárůst vůči případu se základní harmonickou. Jednotlivé průběhy toku v zubu zobrazují obrázky 3.5a a 3.5b.

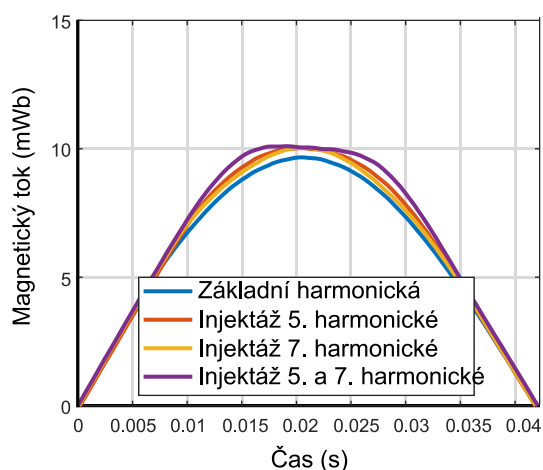
V měření byly potvrzeny teoretické předpoklady o zvyšování toku při injektáži vyšších harmonických. Nárůst magnetického toku při injektáži vůči toku jen se základní harmonickou se téměř shoduje s výsledky ze simulace, respektive výsledky z měření a ze simulace se liší v řádech jednotek procent. Významné zvýšení toku lze pozorovat při injektáži 3. a 5. harmonické, kdy dochází ke zvýšení o 35 % ve srovnání s případem bez injektáže, a při injektáži všech harmonických (3., 5., a 7.), výsledný tok se zde dokonce zvýší o 40 % ve srovnání s případem bez injektáže.

Tab. 3.3: Magnetický tok v jednom pólu - maximální hodnoty

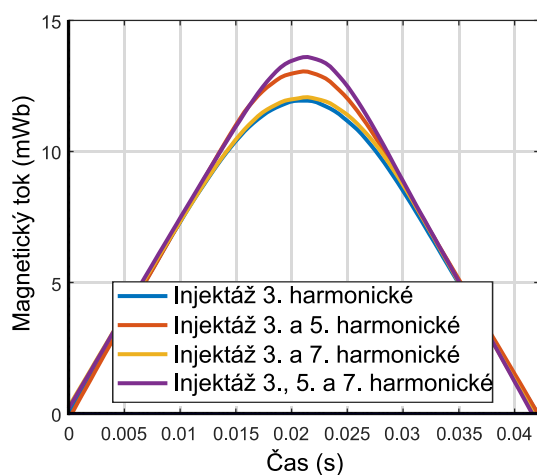
Kombinace harmonických	Měřeno		Simulace	
	Φ_p (mWb)	$\frac{\Phi_p}{\Phi_1} \cdot 100$ (%)	Φ_p (-)	$\frac{\Phi_p}{\Phi_1} \cdot 100$ (%)
1.	9,664	100	1,000	100
1.+3.	11,940	123,554	1,219	121,920
1.+5.	10,028	103,765	1,038	103,800
1.+7.	10,040	103,893	1,030	103,000
1.+3.+5.	13,053	135,893	1,314	131,420
1.+ 3.+7.	12,069	124,889	1,232	123,180
1.+5.+7.	10,096	104,472	1,042	104,190
1.+3.+5.+7.	13,602	140,756	1,371	137,090

Tab. 3.4: Magnetický tok v jednom pólu - průměrné hodnoty jedné půl periody

Kombinace harmonických	Měření		Simulace	
	$\Phi_{p\,avg}$ (mWb)	$\frac{\Phi_{p\,avg}}{\Phi_1} \cdot 100$ (%)	$\Phi_{p\,avg}$ (-)	$\frac{\Phi_{p\,avg}}{\Phi_1} \cdot 100$ (%)
1.	6,113	100	0.637	100
1.+3.	7,080	115,808	0.722	121,609
1.+5.	6,414	104,911	0.668	103,978
1.+7.	6,335	103,622	0.653	102,893
1.+3.+5.	7,491	122,541	0.751	130,832
1.+3.+7.	7,184	117,519	0.732	122,966
1.+5.+7.	6,576	107,564	0.683	104,702
1.+3.+5.+7.	7,606	124,412	0.763	136,166



(a) Injektáž kombinací základní, 5. a 7. harmonické



(b) Injektáž kombinací základní, 3. 5. a 7. harmonické

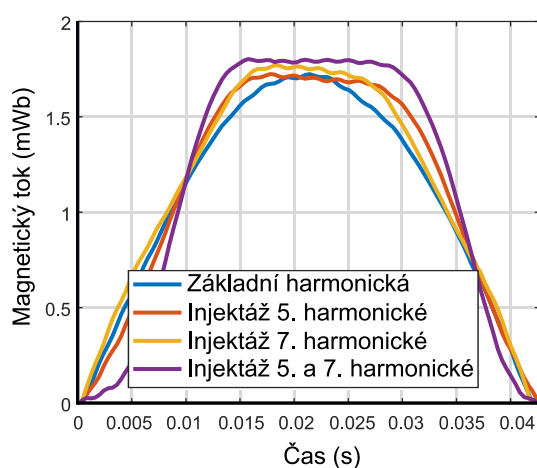
Obr. 3.4: Magnetický tok na pólu při injektáži vyšších harmonických

Tab. 3.5: Magnetický tok v zubu - maximální hodnoty

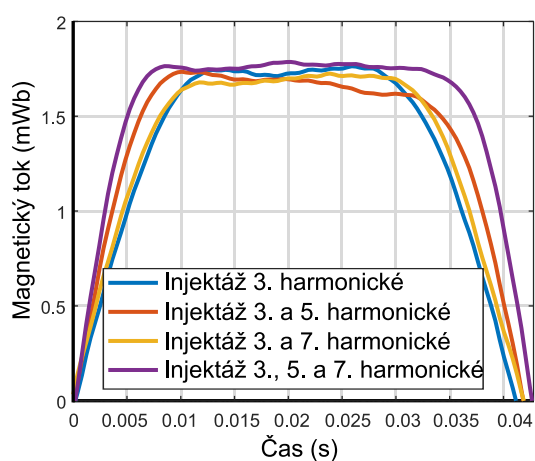
Kombinace harmonických	Měření		Simulace	
	Φ_T (mWb)	$\frac{\Phi_T}{\Phi_{T1}} \cdot 100$ (%)	Φ_T (-)	$\frac{\Phi_T}{\Phi_{T1}} \cdot 100$ (%)
1.	1,721	100	0,174	100
1.+3.	1,764	102,332	0,174	100
1.+5.	1,725	100,062	0,174	100
1.+7.	1,770	102,708	0,174	100
1.+3.+5.	1,735	100,642	0,174	100
1.+3.+7.	1,725	100,093	0,174	100
1.+5.+7.	1,803	104,611	0,174	100
1.+3.+5.+7.	1,787	103.660	0,174	100

Tab. 3.6: Magnetický tok v zubu - průměrné hodnoty jedné půl periody

Kombinace harmonických	Měření		Simulace	
	$\Phi_{T\,avg}$ (mWb)	$\frac{\Phi_{T\,avg}}{\Phi_{T\,avg1}} \cdot 100$ (%)	$\Phi_{T\,avg}$ (-)	$\frac{\Phi_{T\,avg}}{\Phi_{T\,avg1}} \cdot 100$ (%)
1.	1,106	100	0,110	100
1.+3.	1,356	122,599	0,135	121,609
1.+5.	1,137	102,773	0,115	103,978
1.+7.	1,156	104,569	0,114	102,893
1.+3.+5.	1,395	126,120	0,145	130,832
1.+3.+7.	1,328	120,092	0,136	122,966
1.+5.+7.	1,188	107,403	0,116	104,702
1.+3.+5.+7.	1,528	138,146	0,151	136,166



(a) Kombinace základní, 5. a 7. harmonické



(b) Kombinace základní, 3., 5. a 7. harmonické

Obr. 3.5: Magnetický tok v zubu - injektáž vyšších harmonických

4 Měření momentových charakteristik při injektáži

Cílem měření momentových charakteristik bylo ověřit teoretické předpoklady o zvyšování momentu při injektáži vyšších harmonických a zda samotné vyšší harmonické vytvářejí moment. Měření je provedeno na experimentálním devíti fázovém motoru, jehož parametry jsou uvedeny na v tabulce 2.1. Motor byl napájen z napěťového střídače se spínací frekvencí 7 kHz a napětí v stejnosměrném meziobvodu bylo 550 V. Konstanty V , které určují vliv jednotlivých harmonických podle rovnice 1, jsou opět použity z tabulky 3.1, ale v tomto případě jsou použity pro injektáž jen 3. a 5. harmonické a jejich kombinace. 7. harmonická není v tomto případě použita pro injektáž, jelikož se shoduje počet tyčí rotoru s počtem virtuálních pólů a z tohoto důvodu není vhodná pro injektáž. Pokud je experimentální motor napájen 7. harmonickou dochází u něj ke kmitům. Tyto kmity se mohou projevit i v případě kombinací s ostatními harmonickými. Samotný vliv 7. harmonické je minimální pokud jsou využity poměry harmonických pro injektáž podle tabulky 3.1.

Tab. 4.1: Změřené hodnoty fázového napětí a proudu - motor naprázdno, ustálený stav

U/f	3	3.25	3.5	3.75	4
U_{rms} (V)	99	104	113	121	130
I_{rms} (A)	0.81	0.84	0.87	0.90	0.91

(a) Základní harmonická

U/f	3	3.25	3.5	3.75	4
U_{rms} (V)	112	121	131	142	152
I_{rms} (A)	0.89	0.97	0.98	1.0	1.1

(b) Kombinace základní 3. harmonické

U/f	3	3.25	3.5	3.75	4
U_{rms} (V)	102	110	119	128	138
I_{rms} (A)	0.71	0.74	0.77	0.81	0.84

(c) Kombinace základní 5. harmonické

U/f	3	3.25	3.5	3.75	4
U_{rms} (V)	119	123	140	150	162
I_{rms} (A)	0.85	0.89	0.85	1.0	1.05

(d) Kombinace základní 3. a 5. harmonické

U/f	4	4.25	4.5	4.75	5	5.5
U_{rms} (V)	43.7	46.4	49.2	52	54.7	60.5
I_{rms} (A)	1.65	1.77	1.98	2.1	2.2	2.45

(e) 3. harmonická

U/f	6	6.5	7	7.5
U_{rms} (V)	34.9	38.1	41.3	44.5
I_{rms} (A)	2.32	2.33	2.34	2.36

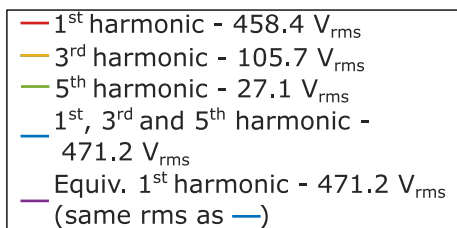
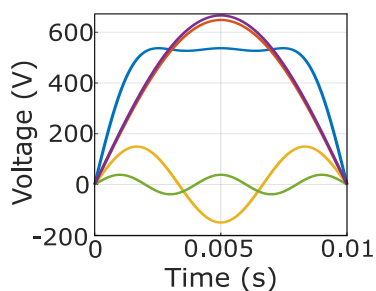
(f) 5. harmonická

Tab. 4.2: Výsledné hodnoty z měření momentových charakteristik při injektáži 3. a 5. harmonické

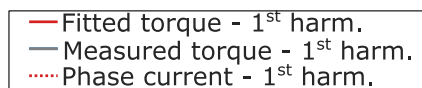
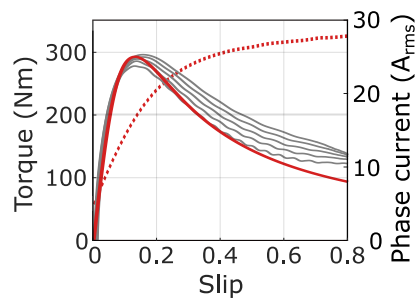
	1. harm.	3. harm.	5. harm.	1., 3. a 5. harm.	1., 3. a 5. harm. ¹	Ekviv. 1. harm. ²
Maximální moment (Nm)	285.4 (92.2 %)	30.58 (9.9 %)	1.9 (0.6 %)	309.2 (100 %)	315.6 (102.1 %)	301.18 (97.4 %)
kritický skluz	0.1245	0.1089	0.1236	0.1189	0.1229	0.1245
U_{rms} (V)	458.4 (97.3 %)	105.7 (22.4 %)	27.1 (5.8 %)	471.2 (100 %)	-	471.2 (100 %)
U_{max} (V)	648.3 (120.7 %)	149.5 (27.8 %)	38.3 (7.14 %)	537 (100 %)	-	666.4 (124.1 %)

Tvary napětí, které byly použity při tomto měření, jsou ukázány na obrázcích 4.1a, 4.2a a 4.3a. Momentové charakteristiky byly změřeny pro několik hodnot U/f , tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 4.2a - 4.2f pro jednotlivé harmonické a i jejich kombinace.

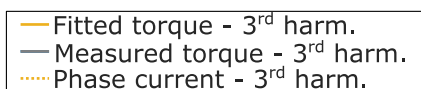
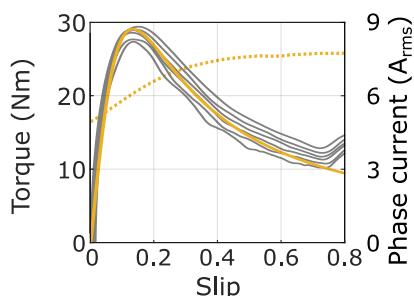
Měření momentových charakteristik je založeno na akcelerační metodě, která je více popsána v [1]. Tato metoda spočívá ve změření zrychlení motoru z nulových otáček na jmenovité a tím je získána závislost otáček na čase ($\omega = f(t)$). Při znalosti momentu setrvačnosti (J) daného stroje je možné získat průběh momentu v závislosti na otáčkách ($M = f(\omega)$) případně skluzu ($M = f(skluz)$) jako časovou derivaci průběhu otáček ($M = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$) [1]. Obrázky. 4.1b - 4.1e, 4.2b a 4.3b (šedé křivky na obrázcích) znázorňují momentové charakteristiky, které byly změřeny touto metodou, pro napájení jen základním, 3. nebo 5. harmonický nebo jejich kombinacemi. Výsledné charakteristiky točivého momentu (viz obr. 8b - 8e, 9b a 10b, barevné) byly fitovány na změřené křivky (šedá) pomocí Klosovo vztahu. Hodnoty maximálního točivého momentu a kritického skluzu byly rovněž identifikovány pomocí této rovnice (viz tabulky 4.2, 4.3 a 4.4). V tabulkách jsou i hodnoty momentové charakteristiky, která byla získána jako sumace jednotlivých momentových charakteristik, v tabulce je označena jako ¹. Dále jsou zde hodnoty z momentové charakteristiky tzv. ekvivalentní 1. harmonická (označena jako ²), ta odpovídá napájení motoru jen samotnou 1. harmonickou o stejné efektivní hodnotě napětí jako v případě injektáže.



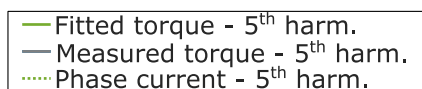
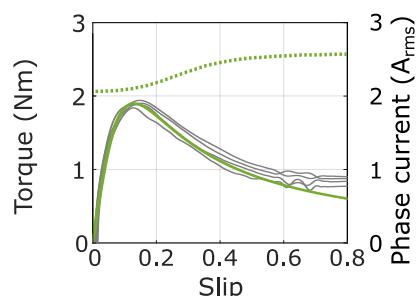
(a) Průběhy fázové napětí



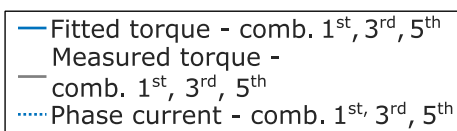
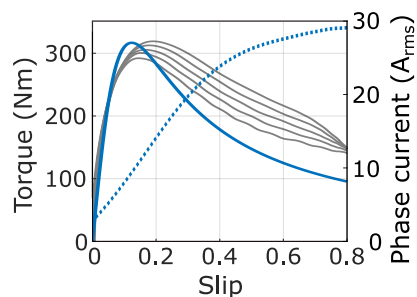
(b) Momentové a proudové charakteristiky pro základní harmonickou (červená křivka na obr. 4.1a) přepočítaná na jmenovité napětí (458.4 V_{rms})



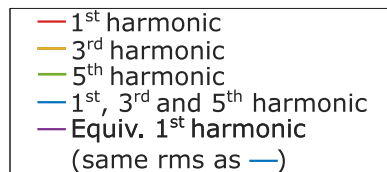
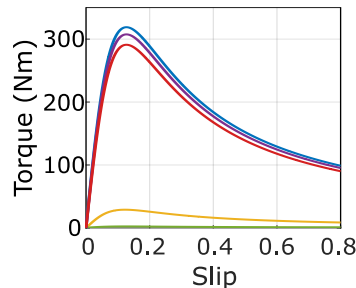
(c) Momentové a proudové charakteristiky pro fázové napětí jen 3. harmonická (žlutá křivka na obr. 4.1a) přepočítaná na jmenovité napětí (105.7 V_{rms})



(d) Momentové a proudové charakteristiky pro fázové napětí 5. harmonická (zelená křivka na obr. 4.1a) přepočítaná na jmenovité napětí (27.1 V_{rms})



(e) Momentové a proudové charakteristiky pro fázové napětí s kombinací 1., 3. a 5. harmonické (modrá křivka na obr. 4.1a) přepočítaná na jmenovité napětí (471.2 V_{rms})

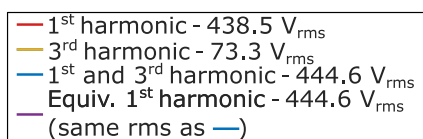
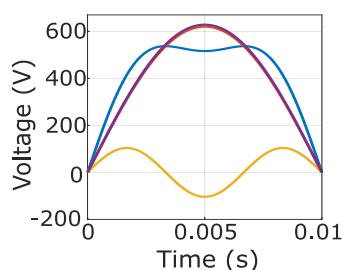


(f) Momentové charakteristiky odpovídající fázovým napětím na obr. 4.1a a ekvivalentní charakteristik pro 1., 3. a 5. harmonickou

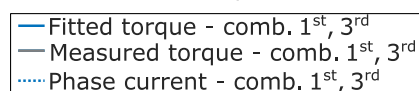
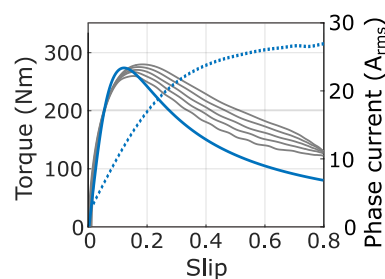
Obr. 4.1: Charakteristiky devítifázového stroje pro případ napájení základní, 3. a 5. harmonickou a jejich kombinace

Tab. 4.3: Výsledné hodnoty z měření momentových charakteristik při injektáži 3. harmonické

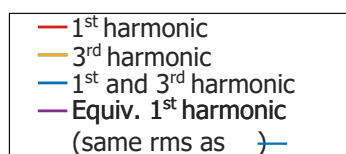
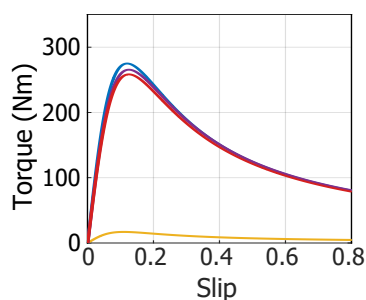
	1. harm.	3. harm.	1. a 3. harm.	1. a 3. harm. ¹	Ekv. 1. harm. ²
Maximální moment (Nm)	260.5 (93.8 %)	14.8 (5.3 %)	277.6 (100 %)	275.5 (99.2 %)	268.1 (96.6 %)
kritický skluz	0.1245	0.1089	0.1192	0.1236	0.1245
U_{rms} (V)	438.5 (98.6 %)	73.3 (16.5 %)	444.6 (100 %)	-	444.6 (100 %)
U_{max} (V)	620.1 (115.5 %)	103.9 (13.6 %)	537 (100 %)	-	628.8 (117.1 %)



(a) Průběhy fázové napětí



(b) Momentové a proudové charakteristiky pro fázové napětí s kombinací 1. a 3. harmonické (modrá na obr. 4.2a) přepočteno na jmenovité napětí (444.5 V_{rms})

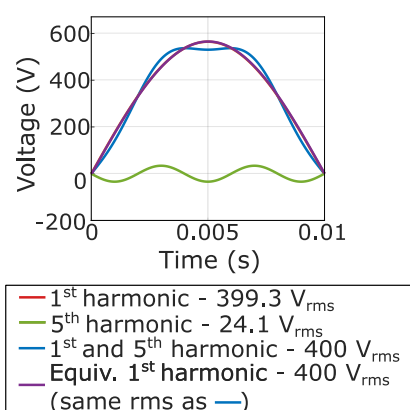


(c) Momentové charakteristiky odpovídající fázovým napětovým na obr. 4.2a a ekvivalentní charakteristiky pro 1. a 3. harmonickou .

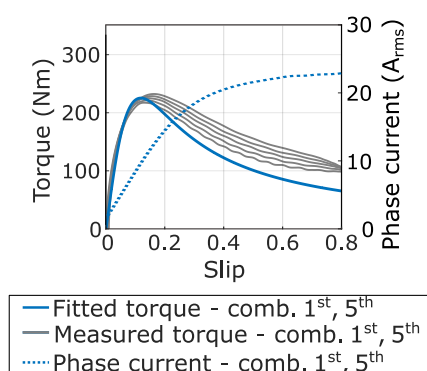
Fig. 4.2: Charakteristiky devítifázového stroje pro případ napájení základní a 3. harmonické a jejich kombinace

Tab. 4.4: Výsledné hodnoty z měření momentových charakteristik při injektáži 5 harmonické

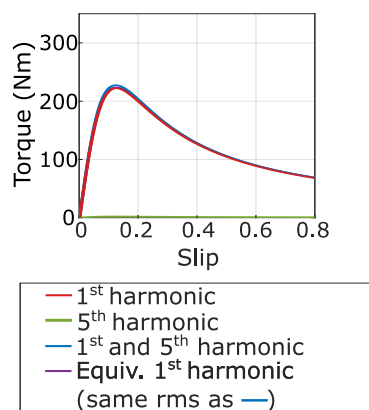
	1. harm.	5. harm.	1. a 5. harm.	1. a 5. harm. ¹	Ekviv. 1. harm. ²
Maximální moment (Nm)	216.3 (97.1 %)	1.5 (0.7 %)	222.8 (100 %)	217 (97.4 %)	217.8 (97.8 %)
kritický skluz	0.1245	0.1236	0.1184	0.1245	0.1245
U_{rms} (V)	399.3 (99.8 %)	24.1 (5.1 %)	400 (100 %)	-	400 (100 %)
U_{max} (V)	564.7 (105.2 %)	34.1 (6.3 %)	537 (100 %)	-	564.7 (105.2 %)



(a) Průběhy fázové napětí



(b) Momentové a proudové charakteristiky pro fázové napětí s kombinací s 1. a 5. harmonickou (modrá na obr. 4.3a) přepočteno na jmenovité napětí. (400 V_{rms})



(c) Momentové charakteristiky odpovídající fázovým napěťovým na obr.4.3a a ekvivalentní charakteristik pro 1. a 5. harmonickou

Fig. 4.3: Charakteristiky devítifázového stroje pro případ napájení základní a 5. harmonické a jejich kombinace

5 Závěr

V této zprávě byly popsány experimentální měření na prototypu asynchronního devítifázového motoru o výkonu 15 kW. Při napájení je využita injektáž vyšších harmonických složek, v tomto případě se jednalo o 3., 5., a 7. harmonickou. U 7. harmonické se vyskytl jev, při němž docházelo ke kmitům na momentu. To je způsobeno shodným počtem tyčí rotoru s počtem virtuálních pólů.

Na tomto stroji bylo provedeno měření magnetického toku prostřednictvím měřících cívek ve statoru s cílem ověřit zvyšování toku při injektáži vyšších harmonických. Nárůst magnetického toku při injektáži vůči toku jen se základní harmonickou lze označit za významný obzvláště při injektáži 3. a 5. harmonické, kdy dochází ke zvýšení o 35 % ve srovnání s případem bez injektáže, a při injektáži všech lichých harmonických (3., 5., a 7.), výsledný tok je zde dokonce výšší o 40 % ve srovnání s případem bez injektáže.

Bylo ověřeno předpoklad, že vícefázový stroj lze provozovat při napájení jen samostatnými vyššími harmonickými, stroj vytváří tzv. virtuální stroje s vyšším počtem pólů. Jak pro napájení samostatnými harmonickými tak i pro jejich kombinace bylo provedeno měření momentových charakteristik. U kombinace harmonických (1.+3.; 1.+5.; 1.+3.+5.) je patrné navýšení maximálního momentu, jak je patrné z tabulek 4.2, 4.3, 4.4 a charakteristik. Injektáží 3. a 5. harmonické vedlo pro daný stroj k navýšení točivému momentu o 6,5% a 3%, jejich kombinace zvýšilo točivý moment o 8,3%.

References

- [1] Radoslav Cipin, Miroslav Patocka, and Jiri Vondrus. "Acceleration method of the IM torque-speed characteristics measurement". In: *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. 2011, pp. 1–5.
- [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] E. Levi. "Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications". In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55.5 (2008), pp. 1893–1909.
- [4] 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.
- [5] 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.

List of Figures

2.1	Experimentální devítifázový asynchronní motor s osazený otáčkovým čidlem	6
2.2	Střídače a řídicí jednotka (MLC) pro devítifázový asynchronní motor	6
2.3	Schéma zapojení devítifázového střídače	8
2.4	Schématické zobrazení umístění měřících cívek ve statoru	9
3.1	Teoretické průběhy fázového napětí při injektáži vyšších harmonických	10
3.2	Modulační napětí při injektáži vyšších harmonických	11
3.3	Měřené fázové proudy při injektáži vyšších harmonických	11
3.4	Magnetický tok na pólu při injektáži vyšších harmonických	14
3.5	Magnetický tok v zubu - injektáž vyšších harmonických	15
4.1	Charakteristiky devítifázového stroje pro případ napájení základní, 3. a 5. harmonickou a jejich kombinace	18
4.2	Charakteristiky devítifázového stroje pro případ napájení základní a 3. harmonické a jejich kombinace	19
4.3	Charakteristiky devítifázového stroje pro případ napájení základní a 5. harmonické a jejich kombinace	20

List of Tables

2.1	Parametry devítifázového asynchronního motor	7
3.1	Konstanty V pro kombinace první a ostatních harmonických pro dosažení lichoběžníkového tvaru	10
3.2	Změřené hodnoty fázového napětí a proudu	12
3.3	Magnetický tok v jednom pólu - maximální hodnoty	13
3.4	Magnetický tok v jednom pólu - průměrné hodnoty jedné půl periody	13
3.5	Magnetický tok v zubu - maximální hodnoty	14
3.6	Magnetický tok v zubu - průměrné hodnoty jedné půl periody	15
4.1	Změřené hodnoty fázového napětí a proudu - motor naprázdno, ustálený stav	16
4.2	Výsledné hodnoty z měření momentových charakteristik při injektáži 3. a 5. harmonické	17
4.3	Výsledné hodnoty z měření momentových charakteristik při injektáži 3. harmonické	19
4.4	Výsledné hodnoty z měření momentových charakteristik při injektáži 5 harmonické	20

Historie revizí

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