České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Czech Technical University in Prague
Faculty of Electrical Engineering

Ing. Miroslav Chomát, CSc.

Elektrické pohony s jednofázovými asynchronními stroji s proměnnými otáčkami

Electric Variable-Speed Drives with Single-Phase Induction Machines

Summary

There are two types of single-phase induction machines that can be commonly found in practice. They are the single-phase induction machines with start capacitors and the single-phase induction machines with run capacitors. In either of these cases, the capacitor in the electric circuit serves to introduce a phase shift between the current flowing through the main and auxiliary stator windings. This results in forming an elliptic or circular magnetic field in the machine. The current progress in power electronics enables the single-phase induction machines to be used in variable-speed drives at present. As such machines are quite widely used, this approach can represent a rather attractive way to modernize some older applications.

Souhrn

Jednofázové asynchronní stroje se v praxi vyskytují nejčastěji ve dvou variantách. Jedná se o jednofázové asynchronní stroje s rozběhovým kondenzátorem a jednofázové asynchronní stroje s běhovým kondenzátorem. V obou těchto případech slouží kondenzátor k vytvoření fázového posuvu mezi proudem protékajícím hlavním a pomocným statorovým vinutím a tím k vytvoření eliptického či kruhového magnetického pole ve stroji. Kondenzátor je však v každém z těchto případů dimenzován jiným způsobem. Existují však i jiné způsoby vytvoření točivého magnetického pole ve stroji. Současný stupeň rozvoje výkonové elektroniky umožňuje využít jednofázové asynchronní stroje i v pohonech s proměnnými otáčkami. Vzhledem k velkému rozšíření těchto elektrických strojů se tak může jednat o atraktivní způsob modernizace některých starších aplikací.

Klíčová slova

Jednofázové asynchronní stroje; elektrické pohony s proměnnými otáčkami; rozběhový kondenzátor; běhový kondenzátor; napěťový měnič.

Key Words

Single-phase induction machines; electric variable-speed drives; start capacitor; run capacitor; voltage-source invertor.

Obsah

1 Úvod 1

2 Typy jednofázových asynchronních strojů 1

3 Matematický model jednofázového asynchronního stroje 3

4 Momentová charakteristika jednofázového asynchronního stroje 4

5 Pohon s jednofázovým asynchronním motorem s proměnnými otáčkami 7

5.1 Režim plné rychlosti 8

5.2 Režim proměnné rychlosti 11

6 Experimentální výsledky 15

7 Závěr 19

Literatura 20

Ing. Miroslav Chomát, CSc 21

1 Úvod

Historie elektrických strojů založených na elektromagnetickém principu se datuje již od počátku devatenáctého století [1]. Od té doby hrají elektrické stroje významnou úlohu v průmyslu i v běžném životě. Tvoří nepostradatelnou součást různých zařízení v téměř všech oblastech lidské činnosti, jako jsou průmysl nebo doprava. V současné době se elektrické motory celosvětově podílejí na celkové spotřebě elektrické energie asi z 60% a podíl elektrických strojů na výrobě elektrické energie je ještě vyšší. Také současný rozvoj řady perspektivních oborů, jako je například elektromobilita, je těsně spojen s využitím elektrických strojů.

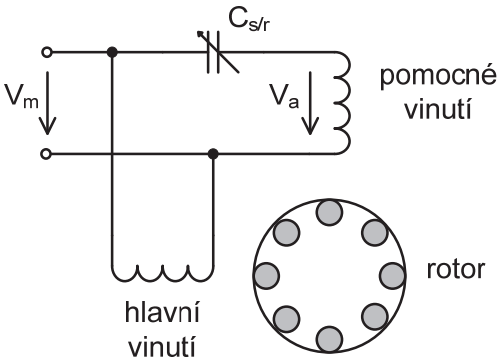
Možnosti elektrických pohonů a generátorů využívajících elektrické točivé stroje v posledních desetiletích značně vzrostly zejména díky pokroku v oblasti výkonové elektroniky, výpočetní a řídicí techniky. Tento vývoj umožňuje konstruovat elektrická zařízení, která mnohem lépe splňují požadavky konkrétních aplikací v oblasti elektromechanické přeměny energie [2, 3].

2 Typy jednofázových asynchronních strojů

Jednofázový asynchronní stroj má ve své základní podobě pouze jedno statorové vinutí napájené z jednofázového zdroje napětí. Konstrukční uspořádání rotoru je v tomto případě stejné jako u třífázového asynchronního stroje. V klidovém stavu se v elektrickém stroji vytvoří vlivem elektrického proudu protékajícího statorovým vinutím pulsující magnetické pole. Z tohoto důvodu neprodukuje jednofázový stroj žádný záběrný moment a k jeho roztočení je třeba vnějšího momentového impulsu. Jakmile se začne rotor vůči statoru otáčet, změní se elektromagnetické poměry ve stroji a magnetické pole získá rotační složku, která stroji umožní vyvinout pracovní moment [4, 5]. Nemožnost autonomního startu prakticky vylučuje uplatnění takového jednofázového stroje ve

většině aplikací. Z tohoto důvodu byla navržena řada konstrukčních modifikací, které umožňují tento nedostatek do značné míry odstranit.

Nejběžnější variantou jednofázového stroje je asynchronní motor se dvěma statorovými vinutími rozdílného uspořádání, obr. 1. První vinutí je nazýváno hlavní a je základním zdrojem magnetického pole ve stroji [6]. Toto vinutí je přímo připojeno k elektrické síti. Druhé vinutí je nazýváno pomocné a je protékáno elektrickým proudem, který je fázově posunutý oproti proudu v hlavním statorovém vinutí. Tím dojde k vytvoření eliptického, nebo v ideálním případě kruhového, magnetického pole ve stroji. Fázového posuvu mezi proudy v hlavním a pomocném vinutím je obvykle dosahováno sériovým zapojením kondenzátoru. Pomocné vinutí může být využíváno buď trvale, nebo pouze při rozběhu elektrického stroje. V druhém případě je pomocné vinutí odpojováno většinou při dosažení určitých otáček. Tyto dvě varianty jsou nazývány jednofázový asynchronní stroj s běhovým kondenzátorem a jednofázový asynchronní stroj s rozběhovým kondenzátorem [7, 8]. V některých případech jsou použity dva paralelně zapojené kondenzátory s odlišnou kapacitou, z nichž jeden je připnut pouze při rozběhu stroje.



Obr. 1. Jednofázový asynchronní stroj s běhovým nebo s rozběhovým kondenzátorem.

Existují také další způsoby vytvoření eliptického magnetického pole ve stroji. Ty jsou založeny například na rozdílném poměru induktivní reaktance a odporu v hlavním a pomocném vinutí. Další možností je použití přídavného vinutí zapojeného do krátka a vhodně umístěného do magnetického obvodu stroje [7].

Dále je v práci uvažován jednofázový asynchronní stroj se dvěma statorovými vinutími odlišných parametrů. Tento typ elektrického stroje je poměrně běžný a například v USA je vyráběn ve velkých sériích, což má za důsledek nízké výrobní náklady. Často se využívá v aplikacích jako je vytápění, větrání a klimatizace. V těchto případech pracuje většinou s konstantními otáčkami a potřebné regulace výkonu se dosahuje omezováním průtoku provozního média. Tento způsob regulace však není zdaleka optimální z hlediska energetické účinnosti a tak se prosazuje tendence nahrazovat tyto systémy pohony s proměnnými otáčkami.

3 Matematický model jednofázového asynchronního stroje

Jednofázový asynchronní stroj lze popsat dále uvedenou soustavou obyčejných lineárních diferenciálních rovnic prvního řádu, které byly odvozeny za zjednodušujících podmínek běžně přijímaných v teorii elektrických strojů. Jedná se o matematický model stroje ve statorové souřadné soustavě založený na teorii prostorových fázorů [9].

$$u_{S\alpha} = R_{S\alpha} i_{S\alpha} + L_{S\alpha} \frac{di_{S\alpha}}{dt} + L_{M\alpha} \frac{di_{R\alpha}}{dt}, \tag{1}$$

$$u_{S\beta} = R_{S\beta} i_{S\beta} + L_{S\beta} \frac{di_{S\beta}}{dt} + L_{M\beta} \frac{di_{R\beta}}{dt}, \tag{2}$$

$$0 = R_{R\alpha} i_{R\alpha} + L_{R\alpha} \frac{di_{R\alpha}}{dt} + L_{M\alpha} \frac{di_{S\alpha}}{dt} + \frac{1}{a} \omega_m \left(L_{R\beta} i_{R\beta} + L_{M\beta} i_{S\beta} \right), \tag{3}$$

$$0 = R_{R\beta} i_{R\beta} + L_{R\beta} \frac{di_{R\beta}}{dt} + L_{M\beta} \frac{di_{S\beta}}{dt} - a\omega_m \left(L_{R\alpha} i_{R\alpha} + L_{M\alpha} i_{S\alpha} \right), \qquad (4)$$

kde

$$a = \frac{N_{S\beta}}{N_{S\alpha}} \qquad (5)$$

je poměr mezi efektivním počtem závitů v pomocném a hlavním statorovém vinutí. Index α značí veličiny v ose hlavního a index β v ose pomocného statorového vinutí. Indexy *S* a *R* označují statorové, respektive rotorové, parametry a veličiny. Mechanická úhlová rychlost ω_m je uvažována v elektrických stupních.

Okamžitá hodnota elektromagnetického momentu je potom dána vztahem

$$T_e = p\left[a\left(L_{M\alpha} i_{S\alpha} + L_{R\alpha} i_{R\alpha} \right) i_{R\beta} - \frac{1}{a} \left(L_{M\beta} i_{S\beta} + L_{R\beta} i_{R\beta} \right) i_{R\alpha} \right], \qquad (6)$$

kde *p* je počet pólových dvojic.

4 Momentová charakteristika jednofázového asynchronního stroje

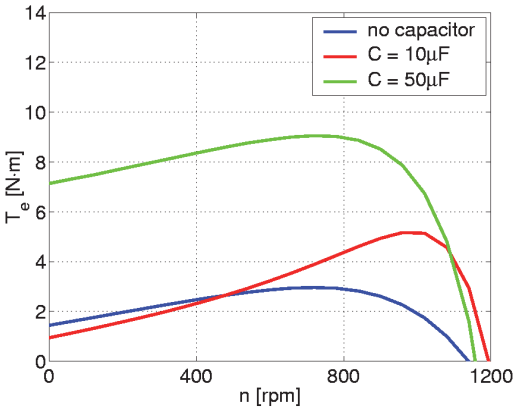
Amplituda a fázový posuv napětí na pomocném vinutí jednofázového asynchronního stroje závisejí na kapacitě sériově zapojeného kondenzátoru a elektromagnetických poměrech ve stroji.

Vlastnosti jednofázového asynchronního stroje, jehož parametry jsou uvedeny v Tabulce I, byly vyšetřovány pomocí numerických simulací. Byly určeny momentové charakteristiky pro různé hodnoty běhového kondenzátoru a byla také určena optimální hodnota jeho kapacity pro různé hodnoty skluzu [10].

Tabulka I

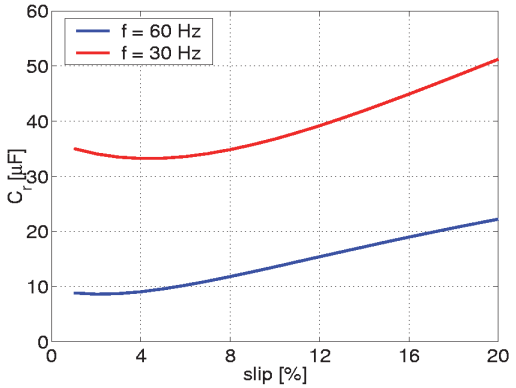
Parametry zkoumaného motoru	
jmenovitý výkon	560 W
jmenovité napětí	230 V
jmenovitý kmitočet	60 Hz
jmenovité otáčky	1110 ot/min
poměr efektivního počtu závitů pomocného a hlavního statorového vinutí	1,37
kapacita běhového kondenzátoru	10 μF
odpor hlavního statorového vinutí	9 Ω
odpor pomocného statorového vinutí	22 Ω
indukčnost hlavního statorového vinutí	390 mH
indukčnost pomocného statorového vinutí	730 mH
odpor pomocného statorového vinutí	10 Ω
počet pólových dvojic	3

Momentové charakteristiky zkoumaného stroje bez běhového kondenzátoru a s běhovým kondenzátorem o kapacitě 10 μF a 50 μF jsou ukázány na obr. 2. Nenulový záběrný moment stroje bez běhového kondenzátoru je způsoben tím, že pomocné vinutí má větší efektivní počet závitů a je navinuto vodičem o nižším průměru. Tím je poměr mezi odporem a induktivní reaktancí jiný než u hlavního vinutí a dochází tedy k fázovému posuvu mezi proudy v obou těchto vinutích i při nulových otáčkách. Z obrázku je vidět značný rozdíl mezi těmito charakteristikami, z čehož je zřejmá důležitost určení správné kapacity běhového kondenzátoru pro dosažení požadovaných vlastností pohonu.



Obr. 2. Momentové charakteristiky vyšetřovaného jednofázového asynchronního stroje bez běhového kondenzátoru a s běhovým kondenzátorem o kapacitě 10 μF a 50 μF.

Obrázek 3 ukazuje závislost optimální kapacity běhového kondenzátoru na skluzu stroje pro kmitočet napájecího napětí 60 Hz a 30 Hz. Kritériem bylo dosažení fázového posuvu 90° mezi proudy protékajícími hlavním a pomocným vinutím. Je však nutno poznamenat, že ani splnění tohoto kritéria není postačující podmínkou pro vytvoření kruhového magnetického pole ve stroji. To je způsobeno rozdílnou velikostí magnetomotorického napětí vytvářeného jednotlivými statorovými vinutími.

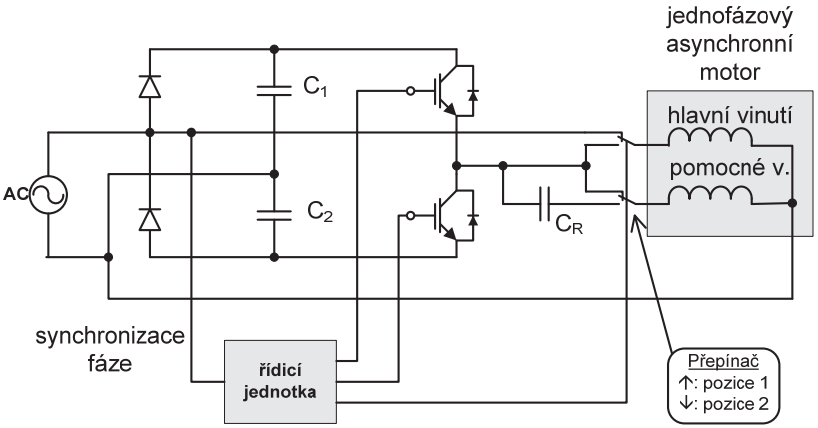


Obr. 3. Optimální velikost kapacity běhového kondenzátoru jednofázového asynchronního stroje při kmitočtu napájecího napětí 60 Hz a 30 Hz.

5 Pohon s jednofázovým asynchronním motorem s proměnnými otáčkami

Bylo navrženo uspořádání elektrického pohonu s proměnnými otáčkami, který využívá jednofázový asynchronní motor [11, 12]. Uvažovanou aplikací byl ventilátor a nebyly tedy kladeny příliš vysoké nároky na dynamické vlastnosti pohonu. Důležité naopak bylo, aby výrobní cena výsledného zařízení byla co nejnižší. Z tohoto důvodu byl navržen systém s co nejmenším počtem spínacích prvků.

Zjednodušené schéma uvažovaného zařízení je ukázáno na obr. 4. Stejnosměrný obvod měniče je napájen z diodového usměrňovače a napětí ve stejnosměrném meziobvodu je vyhlazováno dvěma sériově zapojenými kondenzátory. Výstupní měnič je tvořen dvěma spínacími prvky typu MOSFET nebo IGBT. Požadované výstupní napětí je generováno pomocí pulsně šířkové modulace. V závislosti na poloze spínače se tímto napětím napájí jedno nebo obě statorová vinutí elektrického motoru.

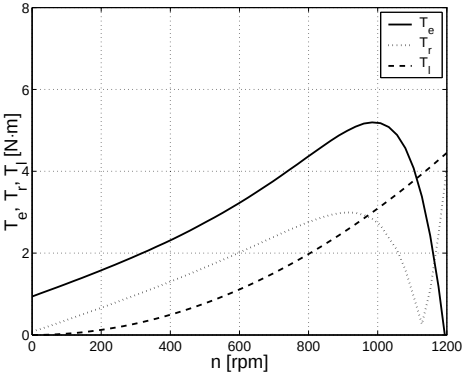


Obr. 4. Zjednodušené schéma navrženého systému.

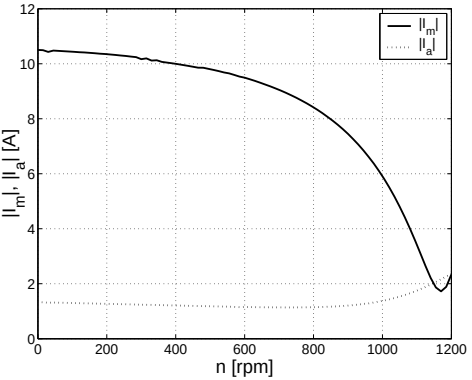
5.1 Režim plné rychlosti

V tomto režimu je spínač v poloze označené číslem 1. Hlavní vinutí je tedy přímo připojeno k elektrické síti. Pomocné vinutí je napájeno z polovodičového měniče napětím o stejném kmitočtu základní harmonické. Amplituda a fázový posuv základní harmonické tohoto napětí vůči napětí v síti jsou nastaveny tak, aby vznikl fázový posuv 90° mezi proudem protékajícím hlavním a pomocným vinutím elektrického stroje a dosáhlo se tak magnetického pole, které je pokud možno blízké kruhovému.

Nejprve byla provedena simulace chodu jednofázového asynchronního motoru s běhovým kondenzátorem o kapacitě 10 μF, pro který byl motor navržen. Tyto výsledky posloužily k porovnání vlastností navrženého pohonu. Motor byl v tomto případě napájen z elektrické sítě o napětí 220 V a kmitočtu 60 Hz. Obrázek 5 ukazuje momentovou charakteristiku (plná čára) a závislost amplitudy momentových pulzací na otáčkách (přerušovaná čára). Dále je v obrázku ukázána uvažovaná charakteristika zátěže. Jedná se o kvadratickou závislost odpovídající například ventilátoru. Na obr. 6 je pak ukázána závislost amplitudy proudu hlavního a pomocného vinutí stroje na otáčkách.



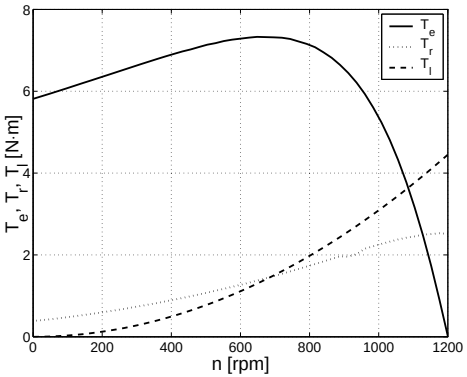
Obr. 5. Závislost elektromagnetického (T_e) a zátěžného (T_l) momentu a amplitudy momentových pulzací (T_r) na otáčkách pro motor s běhovým kondenzátorem.



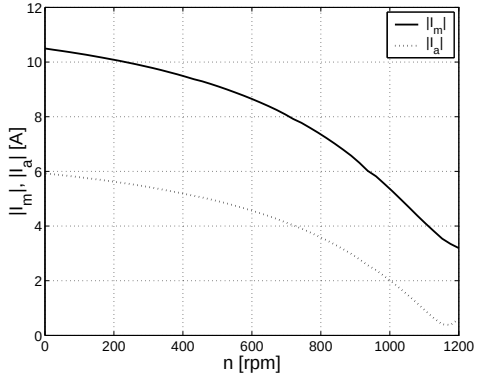
Obr. 6. Závislost amplitudy proudu hlavního (I_m) a pomocného (I_a) vinutí na otáčkách pro motor s běhovým kondenzátorem.

Na obr. 7 je ukázána závislost elektromagnetického momentu a amplitudy momentových pulzací na otáčkách pro navržený pohon v režimu plné rychlosti. Z momentové charakteristiky je vidět, že záběrný moment je značně větší než v předchozím případě. Poměrně výrazné pulzace v blízkosti jmenovité rychlosti jsou způsobeny tím, že maximální napětí generované měničem je

přibližně o 30% nižší, než by bylo potřeba pro vytvoření ideálního kruhového magnetického pole ve stroji. Závislost amplitud proudů hlavního a pomocného vinutí na otáčkách je pak vynesena v obr. 8. Za pozornost stojí poměrně malá hodnota proudu pomocného vinutí v celém rozsahu otáček.



Obr. 7. Závislost elektromagnetického (T_e) a zátěžného (T_l) momentu a amplitudy momentových pulzací (T_r) na otáčkách pro uvažovaný pohon v režimu plné rychlosti.



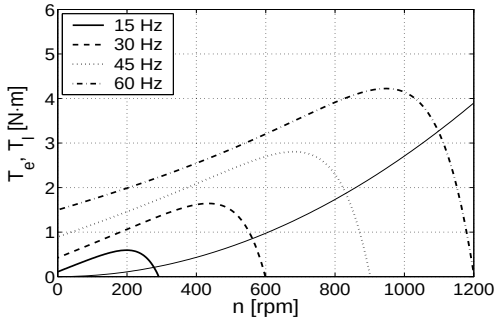
Obr. 8. Závislost amplitudy proudu hlavního (I_m) a pomocného (I_a) vinutí na otáčkách pro uvažovaný pohon v režimu plné rychlosti.

Z porovnání obr. 5 a 6 a obr. 7 a 8 je vidět, že při napájení pomocného vinutí z měniče je elektrický motor schopen vyvinout větší elektromagnetický moment v celém rozsahu otáček než při napájení přes běhový kondenzátor. Na druhé straně však vznikají také větší momentové pulzace. Velikost statorových proudů je v obou případech srovnatelná.

5.2 Režim proměnné rychlosti

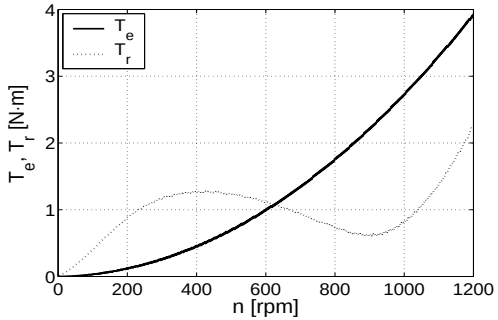
V režimu proměnné rychlosti jsou obě vinutí stroje napájena z polovodičového měniče. Fázový posuv mezi oběma proudy je dosažen zapojením kondenzátoru v sérii s pomocným vinutím. Frekvence a amplituda výstupního měniče je řízena v závislosti na kmitočtu. Vzhledem k tomu, že kapacita kondenzátoru je optimalizována pro konkrétní pracovní bod elektrického stroje, není v ostatních pracovních bodech dosažen požadovaný fázový posun mezi oběma proudy. Tato skutečnost má za důsledek zvýšení momentových pulzací při kmitočtech výrazně odlišných od kmitočtu, pro který je kondenzátor navržen.

Na základě analýzy výsledků numerických simulací byla určena optimální kapacita běhového kondenzátoru 20 μF, která dává uspokojivé výsledky v celém uvažovaném rozsahu otáček. Momentové charakteristiky pohonu pracujícího v tomto režimu jsou pro různé napájecí kmitočty uvedeny na obr. 9. Je zřejmé, že pohon je schopen pohánět uvažovanou zátěž v celém požadovaném rozsahu otáček.

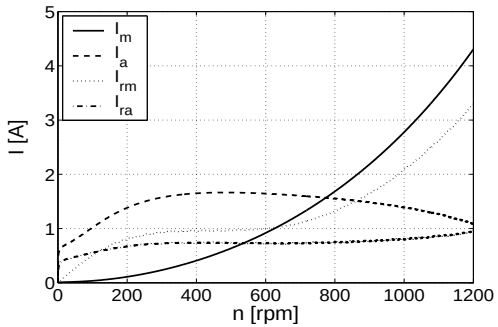


Obr. 9. Momentové charakteristiky pro vybrané napájecí kmitočty (15 Hz, 30 Hz, 45 Hz a 60 Hz) pro uvažovaný pohon v režimu proměnné rychlosti.

V režimu proměnné rychlosti se velikost mechanických otáček nastaví tak, aby při ní došlo k rovnováze mezi vyvíjeným momentem a zátěžným momentem při aktuálním napájecím kmitočtu. Na obr. 10 je ukázána velikost momentových pulzací, které vznikají v tomto režimu při postupném zvyšování otáček. Průběh momentových pulzací má minimum při 900 ot/min. Hodnota skluzu se při otáčkách nad 300 ot/min příliš nemění a pohybuje se mezi 7% a 10%. Průběhy amplitud statorových a rotorových proudů jsou ukázány na obr. 11.



Obr. 10. Elektromagnetický moment (T_e) a amplituda momentových pulzací (T_r) v režimu proměnné rychlosti.

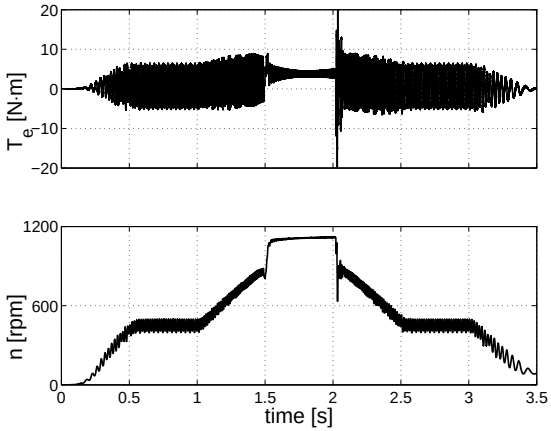


Obr. 11. Statorové (I_m, I_a) a rotorové (I_{rm}, I_{ra}) proudy v režimu proměnné rychlosti.

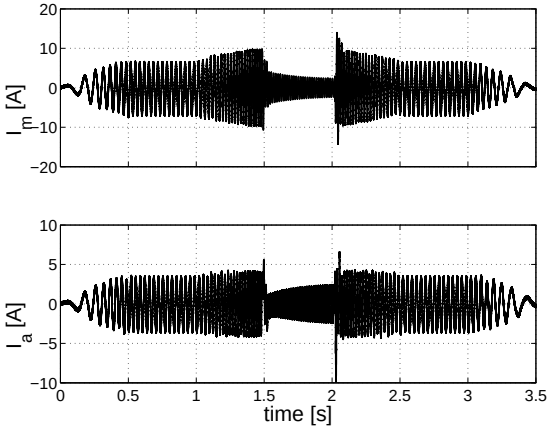
Vytvořený matematický model byl využit k numerické simulaci chování pohonu v různých přechodných stavech. Na obr. 12 a 13 jsou uvedeny výsledky simulace řízení otáček. Napájecí kmitočet byl nejprve po dobu 0,5 s lineárně zvyšován z 0 Hz na 30 Hz, po dalších 0,5 s byl konstantní a poté byl zvýšen na 57 Hz, což představuje 95% jmenovitého kmitočtu. V tu chvíli byl pohon přepnut do režimu plné rychlosti, ve kterém byl provozován po dalších 0,5 s. Stejná sekvence ale v opačném pořadí byla použita k uvedení pohonu do

klidového stavu. Při simulaci byl uvažován běhový kondenzátor o kapacitě 30 μF.

Průběhy elektromagnetického momentu a otáček při tomto přechodném ději jsou uvedeny na obr. 12. Na obr. 13 jsou pak ukázány průběhy odpovídajících statorových proudů. Pulzace elektromagnetického momentu jsou do značné míry tlumeny momentem setrvačnosti rotoru a poháněného zařízení a nepředstavují tak závažnou překážku pro uvažované aplikace. Okamžitý přechod z režimu proměnné rychlosti do režimu plné rychlosti a opačně vyvolal poměrně rychle odeznívající přechodné proudy a momenty, které by však bylo možno omezit propracovanější metodou přepínání.



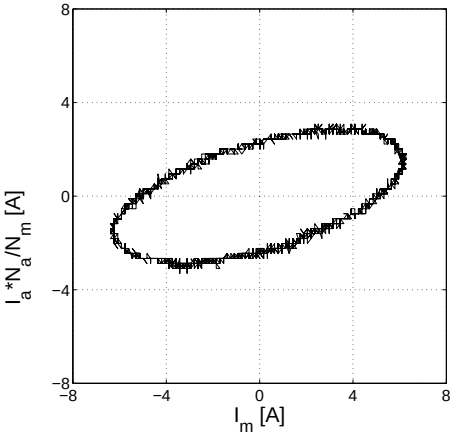
Obr. 12. Vyvíjený moment (T_e) a mechanické otáčky (n) během řízení otáček pohonu.



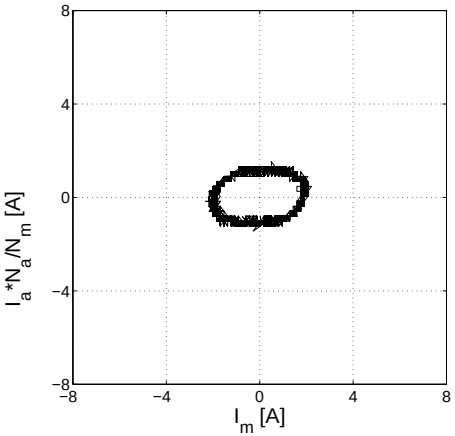
Obr. 13. Statorové proudy hlavního (I_m) a pomocného (I_a) vinutí během řízení otáček pohonu.

6 Experimentální výsledky

Pro ověření dosažených teoretických výsledků a praktické využitelnosti navržené koncepce byl postaven experimentální pohon. Řídicí algoritmus byl implementován v číslicovém signálovém procesoru TMS320C240. Ten vytvářel pomocí pulsně šířkové modulace napětí sinusového průběhu s proměnnou amplitudou a kmitočtem, které bylo možno synchronizovat s napájecím napětím ze sítě. Byla provedena řada měření k ověření teoretických výsledků a chování reálného pohonu v praxi. Byl vyšetřován chod pohonu v režimu plné i proměnné rychlosti při různých zátěžných momentech. Na obr. 14 a 15 jsou uvedeny průběhy statorových proudů naměřené v režimu plné a proměnné rychlosti. Hodnota proudu v pomocném vinutí byla vynásobena poměrem závitů pomocného a hlavnímu vinutí, aby vynesená trajektorie odpovídala rozložení magnetického pole v prostoru stroje. Tyto experimenty potvrdily praktickou využitelnost navrženého pohonu pro uvažované aplikace.



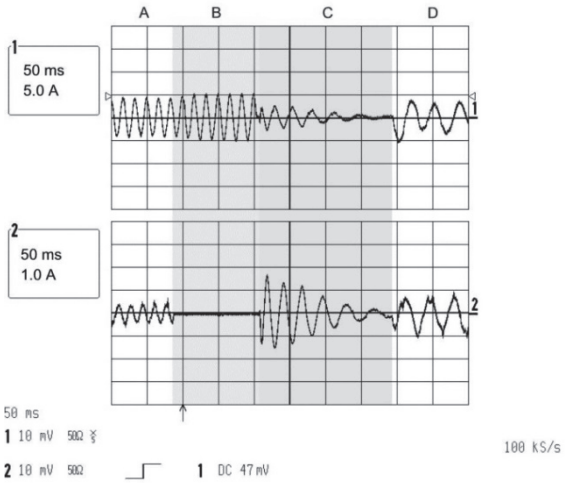
Obr. 14. Trajektorie experimentálně zjištěných statorových proudů v režimu plné rychlosti.



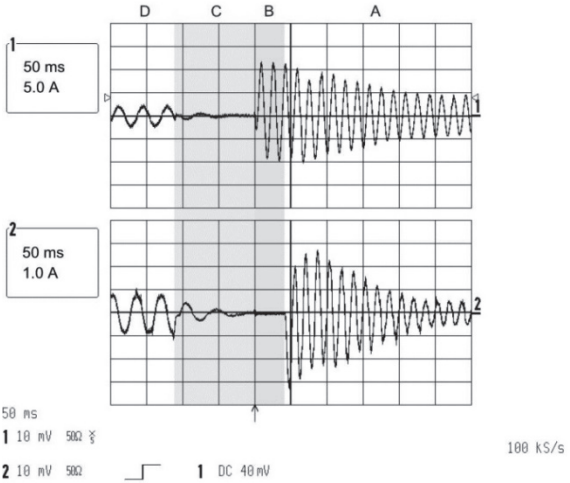
Obr. 15. Trajektorie experimentálně zjištěných statorových proudů v režimu proměnné rychlosti při napájecím kmitočtu 30 Hz.

Pro omezení amplitudy statorových proudů a momentu při přechodných dějích vyvolaných přepnutím mezi oběma režimy pohonu byly do časové sekvence přepínání vloženy časové úseky, během nichž dochází k odeznění přechodových dějů a tím i omezení

proudových a momentových špiček. Přechody mezi oběma režimy jsou ukázány na obr. 16 a 17. Průběh proudu hlavního vinutí je zachycen ve stopě 1 (horní část obrázku) a proud pomocného vinutí ve stopě 2 (dolní část obrázku). Obrázek 16 ilustruje přechod z režimu plné rychlosti (interval A) do režimu proměnné rychlosti (interval D). V intervalu B je napájeno pouze hlavní vinutí, zatímco pomocné vinutí je připojeno k neaktivnímu polovodičovému měniči a proud se může uzavírat pouze přes zpětné diody. Na začátku intervalu C dojde k odpojení i hlavního vinutí, čímž je vyvolán přechodný proud v pomocném vinutí. Délka trvání tohoto intervalu je postačující pro odeznění přechodného proudu. Podobný přístup je aplikován i v případě přechodu z režimu proměnné rychlosti do režimu plné rychlosti, obr. 17. Celý proces je synchronizován s fází napájecího napětí v elektrické síti. Vzhledem k tomu, že během tohoto děje se část setrvačné energie systému přemění na elektrickou energii a je absorbována stejnosměrným meziobvodem, je třeba věnovat pozornost také ochraně stejnosměrného meziobvodu proti nebezpečnému přepětí.



Obr. 16. Experimentálně zjištěné statorové proudy hlavního (stopa 1) a pomocného (stopa 2) vinutí při přechodu z režimu plné rychlosti do režimu proměnné rychlosti.



Obr. 17. Experimentálně zjištěné statorové proudy hlavního (stopa 1) a pomocného (stopa 2) vinutí při přechodu z režimu proměnné rychlosti do režimu plné rychlosti.

7 Závěr

Uvedené teoretické i experimentální výsledky ukazují, že navrhovaný pohon je schopen správné funkce jak v režimu plné rychlosti, tak v režimu proměnné rychlosti. Činnost pohonu není zcela optimální v celém požadovaném rozsahu otáček a v určitých pracovních bodech vznikají výrazné momentové pulzace. Pro většinu aplikací malého a středního výkonu to však nepředstavuje vážnou překážku. Značnou výhodou navrhovaného pohonu je jeho robustnost a poměrně nízké výrobní náklady. Lze odůvodněně předpokládat, že zvýšená energetická účinnost tohoto pohonu zajistí ekonomickou návratnost zvýšených investičních nákladů ve srovnání s pohonem s konstantními otáčkami. Byl vytvořen experimentální pohon, na kterém byly teoretické výsledky ověřeny.

Literatura

[1] D. W. Novotny, T. A. Lipo, and T. M. Jahns, *Introduction to Electric Machines and Drives.* Madison, USA: Wisconsin Power Electronics Research Center, 2009.

[2] B. Drury, *The Control Techniques – Drives and Controls Handbook*. London, UK: the IEE, 2001.

[3] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*. Berlin, Germany: Springer, 1996.

[4] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley jr., and S. D. Umans, *Electric Machinery*. New York, USA: McGraw-Hill, 2003.

[5] P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery*. New York, USA: IEEE Press, 1994.

[6] P. C. Krause, "Simulation of Unsymmetrical 2-Phase Induction Machines," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, pp. 1025 – 1037, 1965.

[7] J. Štěpina, *Single-Phase Induction Motors.* Prague, Czech Republic: SNTL, 1957 (in Czech).

[8] J. Štěpina, *Single-Phase Induction Motors – Construction, Theory and Calculation.* Lebanon, USA: Magna Physics Publishing Division of Motorsoft, 2004.

[9] J. Štěpina, *Symmetrical Components in the Theory of Rotating Electrical Machines*. Prague, Czech Republic: Academia, 1969 (in Czech).

[10] M. Chomát and T. A. Lipo, "Two Switch Adjustable-Speed Drive with Single Phase Induction Machine," in *2000 CPES Power Electronics Seminar*, Blacksburg, USA, 2000, str. 381 - 385.

[11] M. Chomát and T. A. Lipo, "Adjustable-Speed Single-Phase IM Drive with Reduced Number of Switches," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 39, no. 3, str. 819 – 825, 2003.

[12] T. A. Lipo and M. Chomát, "Adjustable Speed Drive for Single-Phase Induction Motors," U.S. Patent 6 570 778, 2003.

Ing. Miroslav Chomát, CSc

NAROZEN

10. dubna 1965, Praha

VZDĚLÁNÍ

1994 **CSc. - Elektrické stroje a přístroje**
Ústav pro elektrotechniku, AV ČR, Praha

1988 **Ing. – Elektroenergetika**
Fakulta elektrotechnická, ČVUT, Praha

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

2006 ⇨ ***Ústav termomechaniky, AV ČR, v.v.i.,*** *Praha*
2013 ⇨ zástupce ředitele
2008 ⇨ vedoucí oddělení
2006 ▫ 2008 vedoucí laboratoře
2006 ⇨ vedoucí vědecký pracovník

2003 ⇨ ***Fakulta elektrotechnická, ČVUT,*** *Praha*
odborný asistent (částečný úvazek)

1988 ▫ 2005 ***Ústav pro elektrotechniku, AV ČR,*** *Praha*
2003 ▫ 2005 vedoucí vědecký pracovník
2002 ▫ 2005 zástupce ředitele
1994 ▫ 2003 vědecký pracovník
1988 ▫ 1994 odborný pracovník

1999 ▫ 2000 ***University of Wisconsin – Madison,*** *USA*
"Honorary Research Fellow"

VÝZKUMNÁ ČINNOST

- hlavní řešitel 8 grantových projektů GAČR, GA AVČR a MŠMT
- účast na řešení 15 grantových projektů GAČR, GA AVČR a NSF
- účast na řešení projektů aplikovaného výzkumu

PEDAGOGICKÁ ČINNOST

- přednášky na FEL ČVUT v předmětech Elektrické stroje II, Struktura a architektura počítačů, Algoritmizace, Aplikace výpočetní techniky
- cvičení na FEL ČVUT v předmětech Programování, Struktura a architektura počítačů, Aplikace výpočetní techniky, Algoritmizace
- vedení diplomových a bakalářských prací

HODNOCENÍ PROJEKTŮ

- odborný posuzovatel EU projektů FP6, FP7 a H2020
- člen hodnotícího panelu GAČR (2009 - 2013)
- odborný posuzovatel projektů TAČR, MPO, MŠMT, Fraunhofer-Gesellschaft, Portuguese Foundation for Science and Technology, Jihomoravské centrum pro mezinárodní mobilitu

PRACOVNÍ A ODBORNÁ OCENĚNÍ

2002	Prémie Otto Wichterleho pro mladé vědecké pracovníky v Akademii věd ČR
1994	První místo v "Soutěži mladých elektrotechniků" Českého centra IEE

ODBORNÉ ZAMĚŘENÍ

- Řízení elektrických pohonů (elektronické měniče, mikroprocesorové řízení, numerické simulace)
- Elektrické stroje
- Využití obnovitelných zdrojů energie (větrné a vodní elektrárny)
- Modelování rozložení magnetického pole v elektrických strojích
- Výkonová elektronika
- Výpočetní technika (Java, C/C++, síťové technologie)

JAZYKOVÉ SCHOPNOSTI

- Angličtina – velmi dobrá pracovní znalost (zkoušky: TOEFL, CAE, všeobecná státní jazyková zkouška)
- Němčina, francouzština, ruština - částečná pasivní znalost

DALŠÍ INFORMACE

- člen (senior member) IEEE
- člen (member) IET
- CEng. – autorizovaný inženýr (Chartered Engineer), Engineering Council, Velká Británie
- spoluautor US patentu z oblasti elektrických pohonů
- autor nebo spoluautor více než 100 publikací (články ve vědeckých a odborných časopisech, konferenční příspěvky, atd.)
- recenzent odborných publikací (IEEE, IET, Acta Technica CSAV, Journal of Power Electronics, atd.)
- H-index: 4

VYBRANÉ PUBLIKACE

[1] L. Schreier, J. Bendl, and M. Chomát, "Effect of Higher Spatial Harmonics on Properties of Six-Phase Induction Machine Fed by Unbalanced Voltages," Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik-Springer), 2014, pp. 1 – 10, ISSN 1432-0487.

[2] M. Chomát, L. Schreier, and J. Bendl, "Control of Active Front-End Rectifier in Electric Drive under Unbalanced Voltage Supply in Transient States," *Przeglad Elektrotechniczny*, 2012, vol. 88, no. 1A, pp. 177 – 180, ISSN 0033-2097.

[3] M. Chomát, "Operation of Active Front-End Rectifier in Electric Drive under Unbalanced Voltage Supply," pp. 195 - 216. In M. Chomát, (Ed.). *Electric Machines and Drives.* Rijeka: InTech, 2011. ISBN 978-953-307-548-8.

[4] L. Schreier, J. Bendl, and M. Chomát, "Comparison of Selected Properties of Three- and Five-Phase Induction Motors," *Maszyny elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 2010, no. 88, pp. 169-174, ISSN 0239-3646.

[5] J. Klíma, M. Chomát, and L. Schreier, "Analytical Closed-Form Investigation of PWM Inverter Induction-Motor Drive Performance Under DC-Bus Voltage Pulsation," *IET Electric Power Applications*, vol. 2, no. 6, 2008, pp. 341 – 352, ISSN 1751-8660.

[6] M. Chomát and L. Schreier, "Control Method for DC-Link Voltage Ripple Cancellation in Voltage Source Inverter under

Unbalanced Three-Phase Voltage Supply," *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, vol. 152, no. 3, 2005, pp. 494 – 500.

[7] J. Bendl, M. Chomát, and L. Schreier, "Independent Control of Positive- and Negative-Sequence Current Components in a Doubly Fed Machine," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 15, no. 3, 2005, pp. 191 – 202, ISSN 1430-144X.

[8] M. Chomát and T. A. Lipo, "Adjustable-Speed Single-Phase IM Drive with Reduced Number of Switches," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 39, no. 3, 2003, pp. 819 – 825, ISSN 0093-9994.

[9] L. Schreier, M. Chomát, and I. Doležel, "Effect of Machine Geometry on Higher Harmonics Content in Air-Gap Magnetic Field of Synchronous Reluctance Machine," *Scientific Letters of Silesian University of Technology*, vol. 176, 2001, pp. 259 – 266.

[10] I. Doležel, M. Chomát, and L. Schreier, "Method of Determining Input Parameters for Basic Equations of Synchronous Reluctance Machine," *COMPEL - International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 19, no. 2, 2000, pp. 411 – 419, ISSN 0332-1649.