

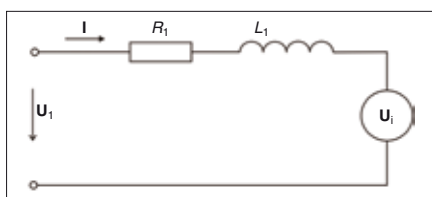
Regulace synchronního motoru pro lehkou kolejovou trakci

doc. Ing. Jaroslav Novák, CSc., ČVUT Praha, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky, Ing. Ondřej Černý a Ing. Jiří Šimánek, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

V první části článku jsou prezentovány principy zpětnovazební regulace momentu synchronního motoru s permanentními magnety, zejména s ohledem na aplikaci v trakčním pohonu kolejového vozidla. V druhé části je uveden popis speciálního experimentálního pracoviště s kolovým pohonem pro tramvaj se synchronním motorem s permanentními magnety, které je instalováno na Dopravní fakultě Univerzity Pardubice. V článku jsou obsaženy výsledky zkoušek na tomto experimentálním pracovišti s vyvinutou a implementovanou strukturou regulace.

1. Úvod

Synchronní motor s permanentními magnety (PMSM – *Permanent Magnet Synchronous Motor*) je v trakční oblasti relativně novou hnací jednotkou. Použití tohoto typu mo-



Obr. 1. Náhradní schéma satoru synchronního stroje

toru pro pohon dopravních prostředků bylo umožněno především zdokonalením vlastností permanentních magnetů ze speciálních slitin (SmCo, NdFeB) s magnetickou indukcí kolem 1 T. Aplikace PMSM se začaly v trakci objevovat ve větší míře v průběhu posledních přibližně deseti let, nejprve převážně v elektrických a hybridních pohonech silničních vozidel. V současné době se použití PMSM stále rozšiřuje i v oblasti kolejových vozidel, a to jak ve vozidlech městské dopravy, tak i ve vozidlech určených pro železniční provoz. Pro železniční vozidla jsou k dispozici PMSM s výkony přibližně do 300 kW.

Konstrukční řešení PMSM pro trakci lze rozdělit do dvou skupin:

- motory s vnitřním rotorem (klasická koncepce), kde se rotor otáčí uvnitř satoru,
- motory s vnějším rotorem, kde rotor s magnety obepíná stator.

PMSM s vnitřním rotorem se uplatňují především v pohonech náprav železničních vozidel. Příkladem vozidla s touto koncepcí motorů je japonský příměstský vlak e@train s PMSM s trvalým výkonem 160 kW.

Motory s vnějším rotorem se uplatňují v kolových pohonech silničních vozidel nebo pohonech některých tramvají. Konstrukce motoru je v těchto případech integrována do konstrukce kola. Příkladem použití této koncepce motoru jsou např. plně nízkopodlažní tramvaje Variobahn od firmy Bombardier, které jsou provozovány např. ve městech Chemnitz, Mannheim, Sydney nebo Helsinky. Stejná koncepce motorů se uplatnila i v dodávce vozů metra na pneumatikách od firmy Siemens pro francouzského zákazníka.

Výhody PMSM vycházejí z aplikace rotorových magnetů ze speciálních slitin s velkou remanencí. U PMSM se dosahuje více než dvojnásobného zmenšení rozměrů a hmotnosti oproti asynchronnímu motoru se stejným výkonem a otáčkami. Tato výhoda vynikne především u nízkopodlažních kolejových vozidel. Zmenšení rozměrů a hmotnosti motoru předurčuje PMSM pro bezpřevodkové pohony. PMSM je potom konstruován jako stroj pomaluběžný, mnohapólový (až přes 40 pólů). Další výhodou bezpřevodkového pohonu s PMSM oproti pohonu s rychloběžným asynchronním motorem je větší účinnost daná neexistencí jouleových ztrát v rotoru a ztrát v převodovce.

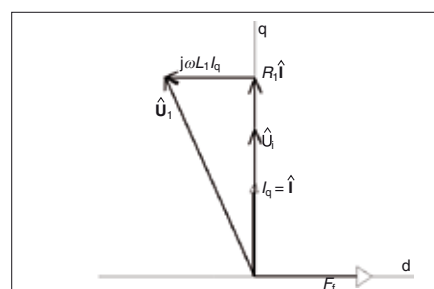
Trakční pohony s PMSM však mají oproti pohonům s asynchronními motory některé nevýhody. Jde především o složitější a dražší konstrukci a o problematictější řešení havarijních stavů, dané nemožností odbuzení stroje. I přes tyto dílčí nevýhody se použití PMSM, zejména v lehké trakci, stále rozšiřuje.

2. Princip zpětnovazební regulace momentu synchronního stroje

Výkonová část elektronického napáječe pro PMSM je stejná jako u pohonu s asynchronním motorem: PMSM je standardně napájen z třífázového můstkového střídače IGBT s napětovým vstupem. Výstupní napětí střídače je formováno šířkově pulzní modulací. Z důvodů, které vyplývají z dalšího textu, je při regulaci momentu PMSM třeba snímat úhlové natočení jeho rotoru. Vlivem této skutečnosti je nutné individuální napájení každého PMSM z vlastního střídače. Není tedy možné skupinové napájení PMSM, které se někdy používá u pohonů s asynchronními motory.

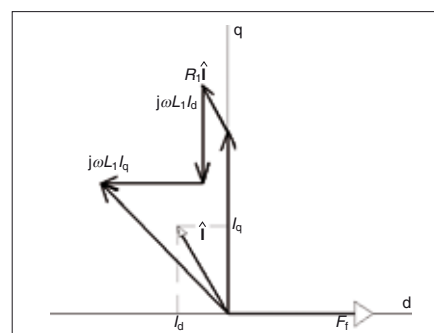
V regulovaných pohonech v dopravní technice se nejčastěji využívá synchronní stroj s permanentními magnety s lineární regulač-

ní strukturou. V případě lineární regulace momentu PMSM se okamžitá hodnota proudu satoru reguluje ve vazbě na okamžitou polohu rotoru, aby se dosáhlo lineární závislosti momentu na velikosti celkového proudu satoru. Na obr. 1 je náhradní schéma satoru, ze kterého vychází fázorový diagram (obr. 2), který znázorňuje situaci v režimu provozu s plným



Obr. 2. Fázorový diagram satorového obvodu synchronního stroje při vektorové regulaci

magnetickým tokem (U_1 je fázor svorkového satorového napětí, R_1 je odpor fáze satorového vinutí, L_1 je indukčnost satorového vinutí, I je fázor proudu satoru, ω je úhlová frekvence satorového napětí a U_1 je napětí indukované magnetickým tokem rotoru ve satorovém vinutí). Situace, která je zřejmá z obr. 1 a obr. 2, bylo dosaženo strukturou tzv. vektorové regu-



Obr. 3. Fázorový diagram synchronního motoru v režimu odbuzování

lace a znázorňuje i analogii se stejnosměrným strojem, u kterého je rovněž proud kotvy kolmý na buďcí magnetický tok a vnitřní moment je úměrný proudu kotvy.

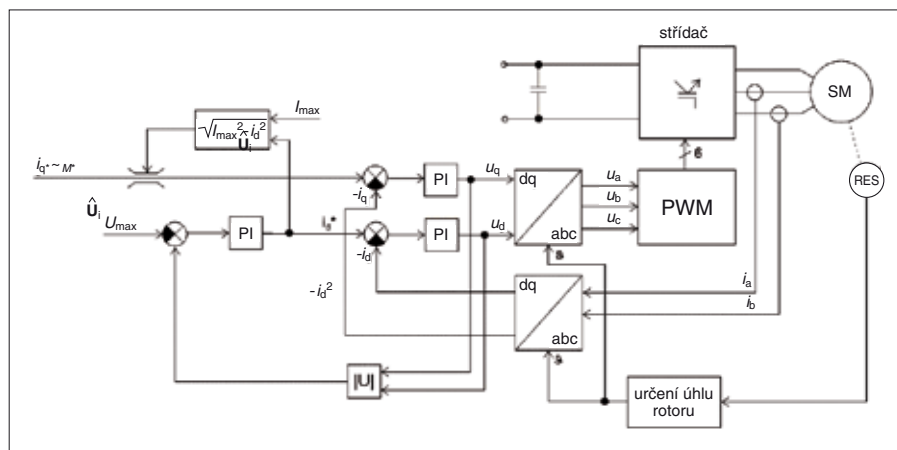
Pro matematický popis střídavých elektrických strojů a při aplikaci jejich regulačních struktur je charakteristické použití transformovaných souřadnicových soustav, ve kterých se znázorňují průběhy proudů, napětí a magnetických toků. U synchronního stro-

je se používá pravoúhlá soustava souřadnic d, q . Poloha osy d je dána osou zdroje magnetického toku, tj. rotoru. Potom rychlost otáčení soustavy d, q je rovna rychlosti rotoru, tj. rychlosti synchronní. Při přepočtech hodnot veličin stroje (proudů, napětí a magnetických toků) mezi reálnou třífázovou soustavou statoru a transformovanou soustavou d, q , ve které probíhají algoritmy regulace, se používají odpovídající transformační vztahy. Vzhledem k tomu, že soustava d, q je svázána s polohou rotoru, závisí transformační pře-

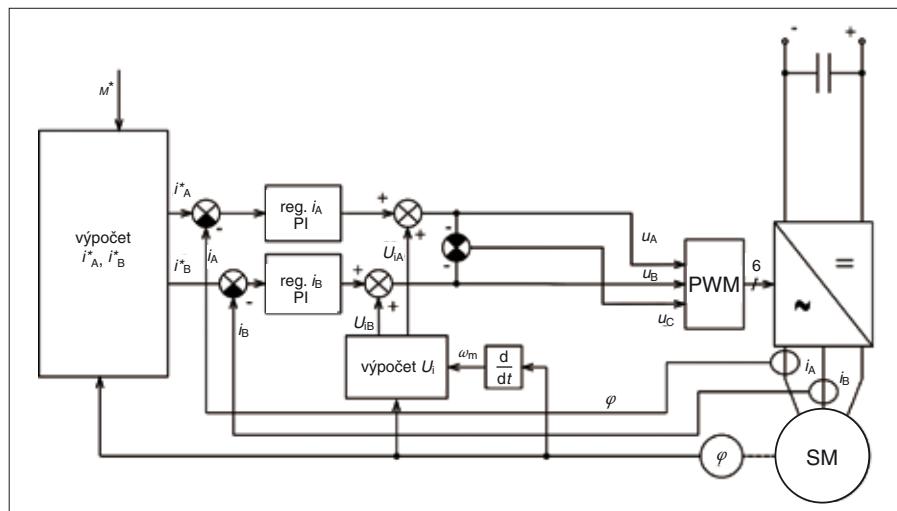
Jsou-li při řízení synchronního stroje zachovány poměry dané předchozím fázorovým diagramem na obr. 2, je složka proudu i_d nulová, celkový proud I statoru se ztotožňuje se složkou i_q a pro moment platí vztah:

$$M = 1,5 p_p F_f i_q \quad (2)$$

kde F_f je magnetický tok permanentních magnetů, který je v případě nulové složky i_d tožný s tokem F_d .



Obr. 4. Struktura regulace momentu v transformované souřadnicové soustavě d, q



Obr. 5. Struktura regulace proudů ve fázích statoru

počty i na okamžité hodnotě úhlu rotoru proti statoru. Tento úhel je nutné měřit snímačem úhlového natočení. Mnoho výzkumných prací je v současnosti věnováno i možnostem bez-senzorového vyhodnocování úhlu rotoru.

Matematický model synchronního stroje, sestavený v souřadnicové soustavě d, q , poskytuje obecný vztah pro moment:

$$M = 1,5 p_p (F_d i_q - F_q i_d) \quad (1)$$

kde

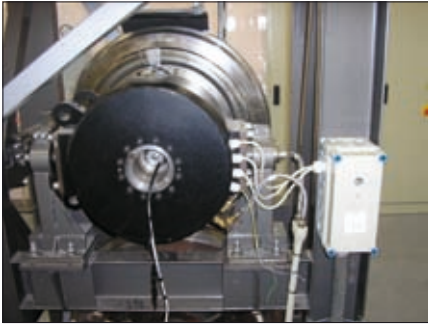
p_p je počet pólpárů stroje,
 F_d a F_q složky magnetického toku ve stroji,
 i_d a i_q složky proudu statoru.

Moment je tedy určen pouze velikostí (tj. efektivní hodnotou, popř. amplitudou) statorového proudu. Podmínkou je zachování kolmosti prostorového vektoru statorového proudu na magnetický tok.

Obdobně jako asynchronní stroje je možné provozovat i PMSM v oblasti nad jmenovitými otáčkami, kdy se již nezvyšuje napětí zdroje, ale řízení se v principu vykonává jen změnou frekvence. I u PMSM jde o odbuzování a cílem je omezovat při vysokých otáčkách indukované napětí převyšující napětí napájecího zdroje. V tomto režimu již není možné udržovat kolmou polohu magnetického toku a statorového proudu. Stroj proto pra-

Nová...





Obr. 6. Synchronní trakční motor na zkušebním pracovišti



Obr. 7. Zkušební pracoviště se synchronním trakčním motorem a asynchronním zatěžovacím strojem

cuje s nenulovou magnetizační složkou prostorového vektoru proudu i_d . Tato složka má obdobné účinky jako reakce kotvy u stejnosměrného stroje – působí proti magnetickému toku permanentních magnetů a její magnetický tok zmenšuje výsledný tok stroje. Efekt odbuzování PMSM je stejný jako u stejnosměrného či asynchronního stroje – s rostoucí rychlostí klesá maximální dosažitelný moment. V případě trakčních pohonů s PMSM se odbuzování uplatňuje nejen v oblastech rychlostí vyšších než jmenovitá rychlost, ale i při poklesu napětí trolejové sítě.

Momentové vlastnosti synchronního motoru v režimu odbuzování lze odvodit opět z obecného vztahu pro moment podle (1), který lze dosazením z rovnic matematického modelu upravit do tvaru:

$$M = 1,5 p_p [(F_r + L_d i_d) i_q - L_q i_q i_d] = 1,5 p_p i_q (F_r + L_d i_d - L_q i_d) \quad (3)$$

kde

L_d je podélná indukčnost statorového vinutí, L_q příčná indukčnost statorového vinutí.

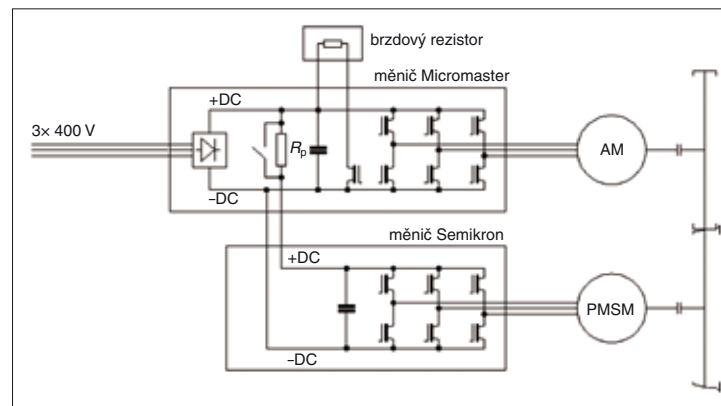
L_d je indukčnost, která se naměří na statorovém vinutí reálného stroje v případě natočení rotoru do polohy, kdy osa rotoru a osa sledovaného vinutí splývají. L_q je indukčnost, která se naměří na statorovém vinutí reálného stroje v případě, že osa sledovaného vinutí a osa rotoru jsou vzájemně kolmé. Ze vztahu (3) je zřejmé, že bude-li mít stroj magneticky souměrný rotor (bude-li tedy platit $L_d = L_q = L_1$), bude vztah pro moment stejný v režimu s plným magne-

tickým tokem i v režimu odbuzování. Požadavek magnetické symetrie rotoru bývá u PMSM přibližně splněn, a proto je v obou režimech moment dán magnetickým tokem permanentních magnetů a složkou proudu i_q , tj. složkou momentotvornou podle vztahu (2). Fázorový diagram statoru motoru pro režim odbuzování je na obr. 3.

3. Struktura regulace momentu v souřadnicové soustavě d, q

Nejjednodušší forma této regulační struktury je na obr. 4. V této struktuře jsou regulovanými veličinami složky prostorového vektoru proudu statoru i_d a i_q v reprezentaci podle fázorových diagramů na obr. 2 a obr. 3. Popsaná struktura je založena na použití lineárních

Na obr. 4 je znázorněna struktura odbuzování navazující na základní strukturu vektorové regulace v souřadnicové soustavě d, q. Navržená a použitá metoda odbuzování je výhodná tím, že bez jakýchkoliv nespojitých přechodů plynule navazuje na regulaci při plném magnetickém toku a udržuje výstupní napětí střídače na zadané, v daném případě nejvhodnější, tedy mezní hodnotě. Použitá metoda odbuzování pracuje na principu regulace amplitudy poměrného napětí, které je zadáváno v jednotlivých fázích na vstup širkové pulzního modulátoru. Cílem tedy je udržet při odbuzování stálou poměrnou hodnotu modulu prostorového vektoru napětí statoru, které je formováno střídačem. V případě konstantního vstupního napětí střídače je konstantní amplituda a efektivní hodnota svorkového napětí



Obr. 8. Výkonová část pracoviště s trakčním PMSM

PI regulátorů pro obě složky proudu statoru. Zvlnění regulovaných veličin je v ustáleném stavu dáno principiální činností akčního členu – střídače, který pracuje se širkově pulzní modulací. S rostoucí frekvencí první harmonické výstupního napětí při stálé frekvenci širkově pulzní modulace bude růst i zvlnění regulovaných veličin v ustáleném stavu.

V režimu s plným magnetickým tokem je žádaná hodnota složky i_d nulová a žádané hodnotě složky i_q je úměrný moment stroje podle vztahu (2). Od žádaných hodnot složek proudů jsou odečteny skutečné hodnoty a regulační odchylky jsou zavedeny do PI regulátorů. Výstupy regulátorů složek proudů i_d a i_q představují v této struktuře přímo složky napětí u_d a u_q , principiálně však lze metodu zdokonalit korekcí hodnot u_d a u_q podle velikosti indukovaného napětí.

Pro výše popsanou strukturu je charakteristická nutnost použití dvou transformačních bloků, a to transformačního bloku pro přepočtení naměřených okamžitých hodnot fázových proudů stroje na skutečné hodnoty složek i_d a i_q a transformačního bloku pro přepočtení složek napětí u_d a u_q na tři referenční hodnoty napětí ve fázích statoru, které jsou zadávány do širkově pulzního modulátoru. Jak bylo uvedeno výše, využívá se pro výpočet transformací hodnota okamžitého úhlového natočení rotoru ν , která je měřena snímačem.



Obr. 9. Měnič Semikron a odporníky realizující rezistor R_p s odpojovací

statoru. V případě kolísání vstupního napětí střídače kolísá odpovídajícím způsobem amplituda a efektivní hodnota svorkového napětí statoru, avšak požadovaná poměrná napětí zadávaná pro jednotlivé fáze na vstupy širkově pulzního modulátoru mají amplitudy konstantní, rovné žádané hodnotě U_{MAX} a na principu metody se nic nemění.

4. Regulace okamžitých hodnot proudů ve fázích statoru

Pro prvotní ověření vlastností trakčního motoru na experimentálním pracovišti byla sestavena a implementována jednoduchá regulační struktura, která zabezpečuje regulaci momentu podle fázorového diagramu na obr. 2 regulací okamžitých hodnot proudů ve fázích statoru. Generování žádaných hodnot je synchronizováno s polohou rotoru tak, že amplituda proudu v dané fázi nastává tehdy, je-li rotor v kolmém postavení na osu tohoto fázového vinutí. Je tedy udržován stálý úhel 90° , o který předbíhá prostorový vektor proudu statoru polohu rotoru. Struktura regulace proudů ve fázích statoru byla doplněna o korekci vlivu indukovaného napětí a je znázorněna na obr. 5.

Popsaná struktura byla testována při frekvenci šířkově pulzní modulace 5 kHz do maximální frekvence statorového napětí a proudu 130 Hz, tj. mírně přes polovinu jmenovité frekvence motoru. Do této frekvence měla regulační struktura poměrně dobré vlastnosti, avšak při vyšších rychlostech již nestačily proudové regulátory dostatečně rychle reagovat na rychlé změny žádaných hodnot fázových proudů a docházelo k přílišnému zvýšení regulačních odchylek. Vzhledem k omezenému otáčkovému rozsahu při použití této metody a vzhledem k obtížnější vazbě této struktury na algoritmus odbuzování není tato metoda pro sledovaný trakční pohon zcela vhodná. Experimenty s touto strukturou však poskytly důležité výchozí poznatky, které byly využity při návrhu a implementaci struktury definitivní.

5. Zkušební pracoviště

Pro potřeby výzkumu je na Dopravní fakultu Jana Pernera Univerzity Pardubice dlouhodobě zapůjčen speciální zkušební stav s trakčním čtyřicetičtyřpólovým synchronním motorem (obr. 6) s permanentními magnety 58 kW, 238 Hz, 650 min^{-1} . Motor je chlazený vodou. Na tomto zkušebním stavu je realizována pohonná kolová jednotka, jejíž konstrukce vychází z koncepce možného pohonu nízkopodlažní tramvaje. Je zvoleno uspořádání s částečně odpruženým motorem pohánějícím kolo přes souběžný kuličkový kloub. Při jmenovitých otáčkách motoru je obvodová rychlost kola $86 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Motor je uložen v silentblocích, umožňujících jeho výkyv v horizontálním směru. Kolo je uloženo na kyvném ramenu přitlačovaném pneumatickým válcem k protiběžnému kolu, které je spojeno se zatěžovacím asynchronním strojem simulujícím kolejnič. Válcem se vyvodí tlak v rozmezí 4 až 50 kN.

Aby bylo možné uskutečnit výzkum, bylo nutné tento tramvajový stav doplnit potřebnou výkonovou a řídicí elektronikou a zatěžným strojem pro testování pohonu a navrženého řízení minimálně do jmenovitého zatížení. Jako zatěžný stroj byl použit asynchronní

motor, který byl přes pružnou spojku spojen s hřídelí protiběžného kola zkušebního stavu. V současnosti se do tohoto spojení instaluje snímač momentu. Jako zatěžný stroj se používá desetipólový asynchronní elektromotor 55 kW, 589 min^{-1} . Celkový pohled na pracoviště je na obr. 7.

Schéma výkonové elektrické části pracoviště je na obr. 8. Zatěžovací asynchronní stroj je napájen z nepřímého měniče frek-



Obr. 10. Měnič Micromaster s brzdným odpor-níkem a nabíjecími rezistory

vence Micromaster 440 ze sítě $3 \times 400 \text{ V}$. Ze stejnosměrného meziobvodu tohoto měniče je přes odpor R_p napájen střídač Semikron pro PMSM. Odpor R_p je připraven z důvodu eventuálního změkčení zdroje napětí pro střídač PMSM pro možnost testů trakčního pohonu s proměnným vstupním napětím. Společný stejnosměrný meziobvod je doplněn o brzdou jednotku s brzdým rezistorem. Vzhledem k tomu, že v ustálených stavech dochází mezi oběma stroji ke vzájemné rekuraci přes stejnosměrný meziobvod, uplatní se brzdny obvod jen při některých přechodných nebo havarijních stavech. Konfigurace výkonového obvodu a jeho klíčové komponenty jsou na obr. 8, obr. 9 a obr. 10.

Pro snímání úhlového natočení rotoru PMSM byl použit čtyřpólový rezolver s vyvinutou výhodnocovací elektronickou jednotkou. Umístění rezolveru u motoru je zřejmé z obr. 7.

Obě verze regulačního programu – regulace v souřadnicích d, q i regulace okamžitých hodnot proudů ve fázích statoru – byly implementovány v DSP regulátoru TPP1 firmy Unicontrols a. s. Regulační struktura momentu v souřadnicích d, q generuje šířkově pulzní modulaci s frekvencí 4 kHz. U struktury s regulací proudů ve fázích statoru je použita frekvence 5 kHz.

Nová tvář...



6. Výsledky experimentů s vyvinutými a implementovanými strukturami regulace

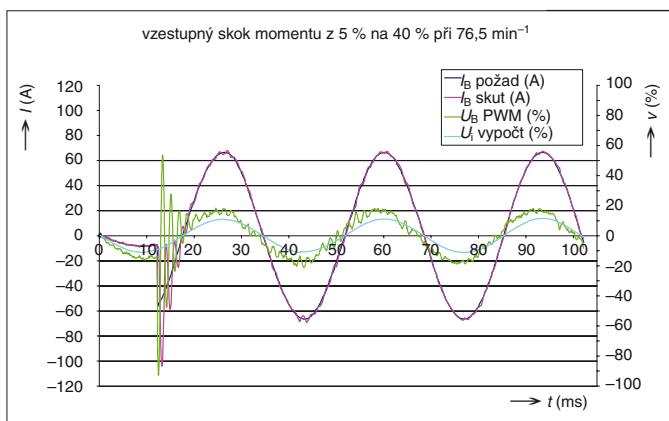
V následujících odstavcích je prezentováno několik výsledků měření na sledovaném trakčním pohonu se strukturou regulace v souřadnicové soustavě d, q (kromě obr. 11), kterou považujeme za perspektivní. Vlastností obou struktur byly před jejich implementací v DSP studovány na počítačových modelech.

Na obr. 11 jsou znázorněny průběhy požadované hodnoty proudu ve fázi (tmavě modře), skutečné hodnoty proudu ve fázi (fialově), napětí zadávaného do šířkově pulzního modulátoru (zeleně) a vypočítaného indukovaného napětí (světle modře) při skoku požadované hodnoty proudu (tj. i momentu) z 5 % na 40 % při 76,5 min⁻¹. Z průběhů jsou zřejmé poměry vycházející z fázorového diagramu na obr. 2. Proud je ve fázi s indukovaným napětím, modul napětí zadávaného do modulátoru ($\approx U_1$) předbíhá indukované napětí a jejich rozdíl je úbytkem na statorové impedanci R_1 a L_1 .

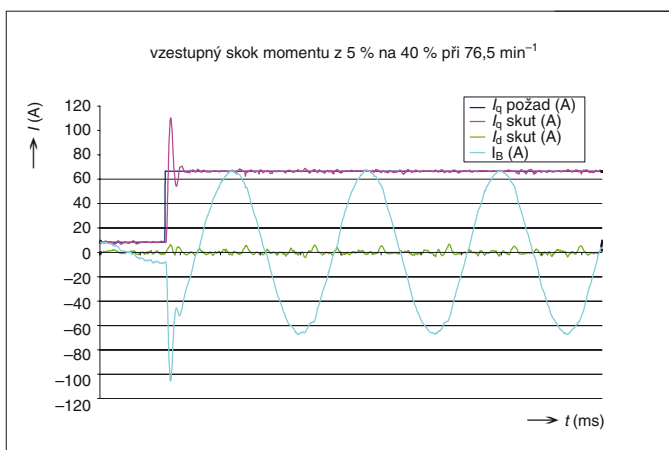
Na obr. 12 je analogický přechodný jev naměřený při regulaci v souřadnicové soustavě d, q. Požadovaná hodnota momentotvorné složky proudu i_q je znázorněna tmavě modře, skutečná hodnota této složky fialově, skutečná hodnota složky proudu i_d je zeleně (požadovaná hodnota je nulová), průběh okamžité hodnoty proudu ve fázi je znázorněn světle modře. Přechodný jev vyvolaný skokovou změnou požadované hodnoty momentu vyvolá podle obr. 11 a obr. 12 rozkmitání soustavy. U reálného trakčního pohonu se však toto rozkmitání nevyskytuje, neboť změny požadovaných hodnot regulovaných veličin jsou zadávány vždy po rampách. Poměry při takovémto přechodném jevu jsou znázorněny na obr. 13. Při tomto měření došlo ke změně požadované hodnoty momentu z +50 % na -50 %, tj. došlo k přechodu z motorického režimu do generátorického režimu. Požadovaná hodnota momentotvorné složky proudu i_q je znázorněna tmavě modře, skutečná hodnota této složky fialově, skutečná hodnota složky proudu i_d je žlutá (požadovaná hodnota je nulová), světle modře je znázorněna v procentech hodnota modulu napětí zadávaného do šířkově pulzního modulátoru. Je zřejmé, že při změně požadované hodnoty po rampě ke kmitání regulačního obvodu nedochází.

Na obr. 14 je znázorněn detail rozběhu motoru naprázdno se zadaným momentem 10 %. Tato hodnota se opět zvyšuje po rampě. Na obr. 14 je fialově znázorněn průběh skutečné hodnoty složky proudu i_q , zeleně otáčky, světle modře modul napětí zadávaného do modulátoru a tmavě modře okamžitá hodnota proudu ve fázi motoru, jehož frekvence roste s rostoucími otáčkami.

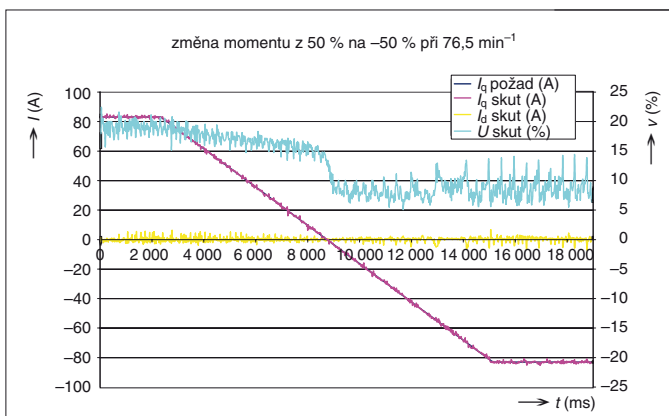
Z obr. 15 jsou zřejmé vlastnosti pohonu v režimu odbuzování. Jde o rozběh motoru naprázdno z nulových otáček na otáčky jmenovité. Fialově jsou znázorněny otáčky, tmavě modře je modul napětí zadávaného do modulátoru, světle modře je okamžitá hodnota proudu ve fázi motoru, jehož frekvence roste s rostoucími otáčkami.



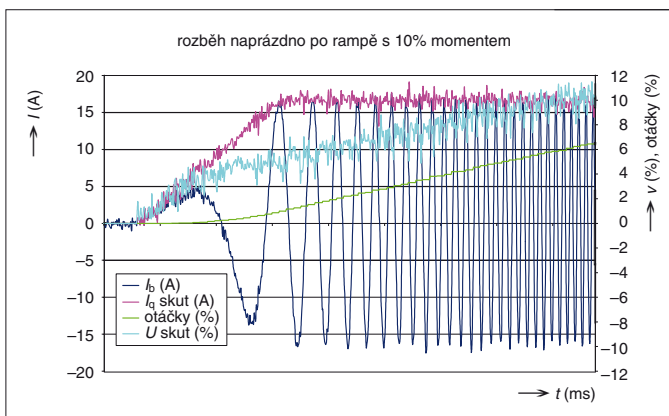
Obr. 11. Časové průběhy veličin pohonu při regulaci okamžitých hodnot proudů ve fázích



Obr. 12. Časové průběhy veličin pohonu při regulaci v soustavě d, q

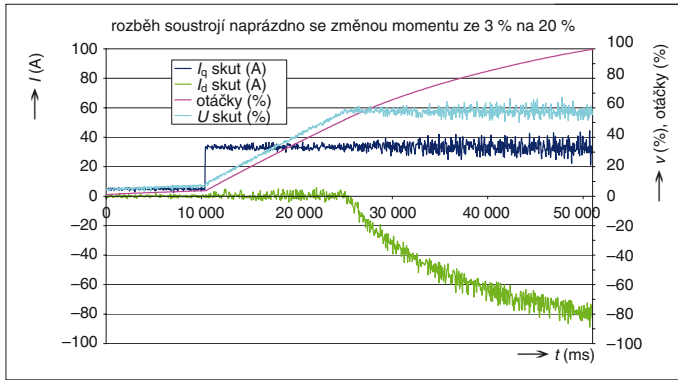


Obr. 13. Změna žádané hodnoty momentu po rampě - přechod z motorického do generátorického režimu

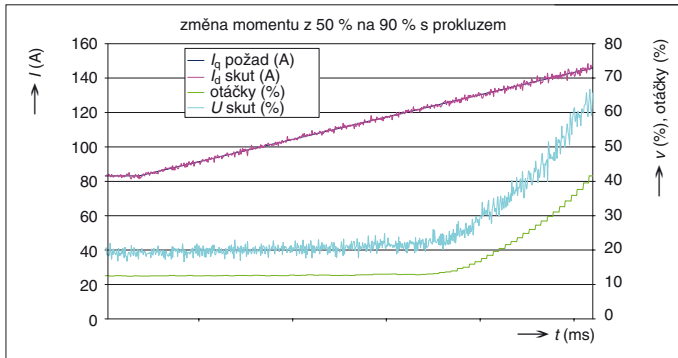


Obr. 14. Detail rozběhu motoru

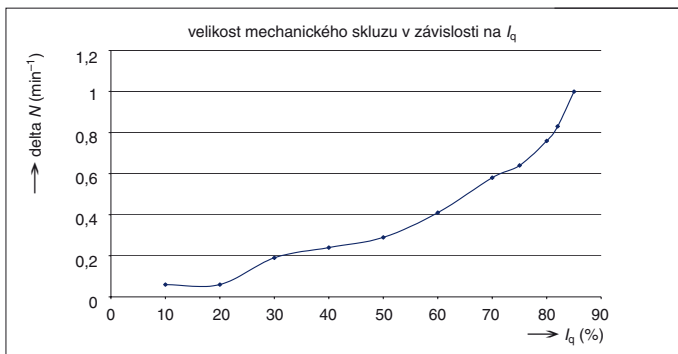
Nová tvář modulárních přístrojů MINIA



Obr. 15. Rozběh PMSM z otáček nulových na otáčky jmenovité



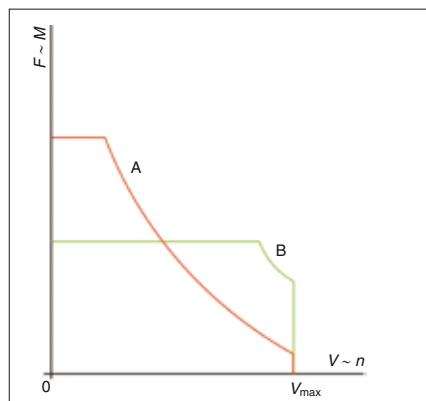
Obr. 16. Překročení meze adheze



Obr. 17. Prokluz kola v závislosti na momentotvorné složce při přenosu tažné síly

vě modře skutečná hodnota momentotvorné složky proudu i_q , zeleně skutečná hodnota složky proudu i_d a světle modře modul napětí zadávaný do modulátoru. Při měření byla nastavena hodnota omezení modulu napětí zadávaného do modulátoru na 57 % maximální hodnoty. Přibližně do 50 % otáček pracuje pohon s plným magnetickým tokem bez odbuzování s nulovou složkou proudu i_d . Do této hodnoty roste spolu s otáčkami i napětí. V režimu odbuzování zůstává napětí na konstantní hodnotě dané omezením a s rostoucími otáčkami roste velikost složky i_d statorového proudu v záporné polaritě, což odpovídá fázorovému diagramu na obr. 3.

Na obr. 16 je znázorněn změněný detail situace, kdy byl po rampě zvyšován moment a momentotvorná složka i_q (v obrázku tmavě modrá). Při proudu i_q přibližně 120 A však již byla překročena mez adheze a došlo k prokluzu kola – otáčky motoru a napětí začala rychle narůstat. Skutečná hodnota proudu i_q je znázorněna fialově, mo-



Obr. 18. Trakční charakteristiky

dul napětí na vstupu modulátoru světle modře a otáčky zeleně.

Na obr. 17 je vynesena závislost prokluzu kola spojeného s trakčním PMSM po protiběžném kole spojeném se zatěžovacím asynchronním strojem na velikosti momentotvorné

Modulární
Inovované
Nadstandardní
Inspirující
Avždy usměvavé přístroje!

OEZ

složky proudu i_q při otáčkách $76,4 \text{ min}^{-1}$. Prokluz byl určován z rozdílu otáček kola spojeného s PMSM a kola spojeného se zatěžovacím strojem. Podle teorie roste tento prokluz s rostoucím momentem a složkou i_q .

7. Specifika návrhu trakční charakteristiky vozidla s PMSM

Trakční charakteristika vozidla je závislost tažné síly na rychlosti vozidla. Průběhu trakční charakteristiky stanovené projektem a vycházející z technických podmínek vozidla odpovídá i dimenzování a způsob řízení pohonu. Typický požadovaný průběh této charakteristiky odpovídá křivce A na obr. 18. V převážné části rychlostního rozsahu by mělo být vozidlo provozováno přibližně po tzv. trakční hyperbole, tj. s konstantním výkonem. Tento průběh je pro trakci obecně výhodný, neboť i při nízkých rychlostech se dobře využije výkon pohonu pro dosažení velké tažné síly. U pohonů se stejnosměrnými motory s cizím buzením a s asynchronními motory odpovídá provozu na přibližné trakční hyperbole režim odbuzování.

Pohony s PMSM lze takto rovněž v principu provozovat, avšak režim odbuzování je pro PMSM nevýhodný. Hlavní důvody jsou dva. Prvním důvodem je skutečnost, že při odbuzování PMSM se potlačuje složkou proudu i_d , tj. reakcí kotvy, vliv s otáčkami rostoucího indukovaného napětí. Díky této reakci kotvy je možné prostřednictvím regulačních smyček protlačovat motorem momentotvorný proud i_q s předepsanou polaritou. Nebyť této reakce kotvy, indukované napětí by v oblasti nad jmenovitými otáčkami převýšilo maximální hodnotu napětí, kterou může generovat střídač, a nebylo by možné řídit proud ani moment. V bezporuchovém provozu by z pohledu růstu indukovaného napětí nebylo odbuzování problematické. V případě možného a v provozu reálného zablokování činnosti střídače (např. z důvodu činnosti nadproudové ochrany) by přestalo být indukované napětí potlačováno složkou proudu i_d – reakcí kotvy – a toto indukované napětí by se objevilo v plné velikosti na svorkách střídače. Uvážíme-li, že na vozidlech se stejnosměrnými a asynchronními trakčními motory dosahují maximální rychlosti dvoj- až trojnásobku rychlosti přechodu do odbuzování, znamenalo by to, že u vozidla s PMSM by se při maximální rychlosti a zablokování střídače objevil až trojnásobek jmenovité hodnoty napětí na těchto svorkách. Tato skutečnost vyžaduje proto u vozidel s PMSM a trakční charakteristikou podle křivky A velké napěťové předimenzování střídače.

Druhá nevýhoda vozidla s PMSM a trakční charakteristikou podle křivky A spočívá v nutnosti zvýšení maximálního dosažitelného momentu zpravidla při snaze o zachování malých rozměrů motoru. Znamená to tedy nutnost zvýšení počtu závitů statorových vinutí. S tím je spojen nárůst hodnoty odporu statorového vinutí a ztrát v tomto odporu. Přechod do režimu

The first part of this paper analyses control algorithm for permanent magnet synchronous traction motor (traction PMSM) usable for light rail vehicle. The algorithm is based on linear field oriented control in d, q coordinates. The field oriented control and carrier based pulse width modulation allow simple microprocessor implementation of flux weakening control algorithm with the continuous transients. The flux weakening provides wider speed operation of traction drive with PMSM. Experimental results are given. For experiments we have used a special experimental stand with a prototype of tram traction PMSM on the University of Pardubice, Jan Perner Transport Faculty. Power of the PMSM is 58 kW, speed 650 min^{-1} . The mechanical connection of the traction motor and tram wheel is direct, without gear-box. The load for tram drive is frequency controlled asynchronous machine on the experimental stand. Detailed description of the stand is given in the paper too.



Doc. Ing. Jaroslav Novák, CSc., ukončil studium na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze v oboru silnoproudá elektrotechnika v roce 1989. V roce 1992 ukončil studium ve vědecké výchově na téže fakultě na Katedře elektrických pohonů a trakce. Od roku 1992 pracoval jako odborný asistent, od roku 2003 jako docent v Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. V letech 1995 až 2001 úzce spolupracoval s firmou Elektrosystém Praha, s. r. o., v oblasti vývoje a využití elektrických pohonů a řídicích systémů v průmyslových aplikacích. Od roku 1998 úzce spolupracuje s Dopravní fakultou Jana Pernera Univerzity Pardubice v oblasti elektrických pohonů a mikroprocesorového řízení v dopravní technice. Svou odbornou činností zaměřuje zejména do oblastí elektrických pohonů, výkonové elektroniky, testování elektromechanických soustav a mikroprocesorového řízení.



Ing. Ondřej Černý studoval v letech 1999 až 2004 obor elektrická zařízení v dopravě na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice. Od roku 2004 je studentem doktorandského studia v oboru dopravní infrastruktura – elektrotechnika. Od roku 2006 je asistentem na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky Dopravní fakulty Jana Pernera. V současnosti se věnuje výzkumu v oblasti regulace pohonů se synchronními motory s permanentními magnety.



Ing. Jiří Šimánek studoval v letech 1998 až 2003 obor elektrická zařízení v dopravě na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice. Od roku 2003 je studentem doktorandského studia v oboru dopravní infrastruktura – elektrotechnika. Od roku 2006 je asistentem na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky Dopravní fakulty Jana Pernera. V současnosti se věnuje výzkumu v oblasti regulace pohonů se synchronními motory s permanentními magnety.

mu odbuzování navíc přináší nárůst celkového proudu vlivem vzrůstu složky i_d , a tím i další nárůst ztrát. Může tedy vzniknout paradoxní situace, kdy je pořízen drahý PMSM (vyšší cena je dána zejména cenou permanentních magnetů ze speciálních slitin) a v převážné části otáčkového rozsahu bude účinek dražích magnetů potlačován reakcí kotvy při zvýšených ztrátách a snížené účinnosti. Pokles účinnosti se může pohybovat až v jednotkách procent v závislosti na provedení pohonu a pracovním bodu. Z hlediska PMSM by proto bylo velmi výhodné provozovat jej podle charakteristiky B z obr. 18. Z výše uvedeného vyplývá, že při návrhu trakčního pohonu s PMSM je nutné vždy volit určitý kompromis mezi charakteristikou A a B z obr. 18, a to v závislosti na požadavcích na konkrétní vozidlo.

8. Závěr

Článek měl za cíl seznámit čtenáře se základními principy a problémy regulace momentu trakčních PMSM, jejichž použí-

tí se v současné době velmi rychle rozšiřuje. Popsané principy byly uplatněny ve výzkumných pracích, které se uskutečnily na unikátním pracovišti pardubické univerzity. Popsaná, v podstatě obecná struktura je v průběhu výzkumu doplňována o další algoritmy řešící specifické problémy trakčního pohonu kolejového vozidla, např. rychlé kolísání vstupního napětí střídače v širokých mezích, řešení regulačního systému ve vazbě na adhezní vlastnosti pohonu, spouštění a zastavování pohonu ve specifických situacích atd. Rozsáhlé práce představuje rovněž řešení bezsenzorového vyhodnocování úhlového natočení rotoru. V případě individuálního tramvajového pohonu kola přistupují další problémy, zejména řešení elektronického diferenciálu a řešení elektronické tuhé nápravy.

Vzhledem k rostoucímu počtu aplikací s trakčními PMSM ve světě lze očekávat rostoucí aktuálnost řešení naznačených problémů.

☒