

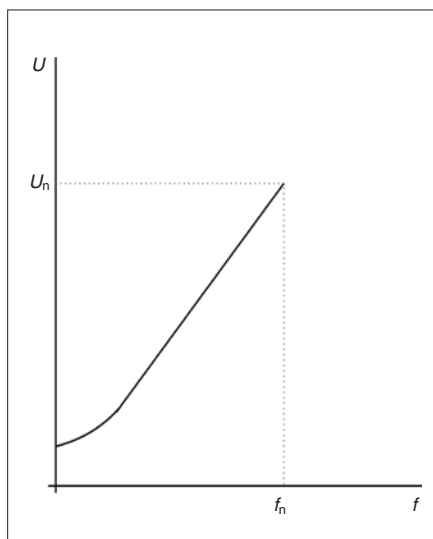
# Řízení vysokootáčkových synchronních strojů (1. část)

Jaroslav Novák, Martin Novák, Jan Chyský, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky

V článku je věnována pozornost specifikům vysokootáčkových pohonů se synchronními motory s permanentními magnety a principům používaným při jejich řízení. V první části článku jsou prezentovány charakteristické vlastnosti vysokootáčkových pohonů a různé koncepce řídicích struktur. Ve druhé části jsou uvedeny informace o výzkumných činnostech v této oblasti na ČVUT, Fakultě strojní, včetně prezentace nejvýznamnějších výsledků.

## 1. Úvod

Elektromotor je tradičně velmi výhodnou hnací jednotkou díky jednoduché konstrukci, příznivé ceně a ekologickým ukazatelům, dobré říditelnosti a hospodárnosti, související s velkou účinností a možností rekuperace brzdné energie. Jednou z nevý-



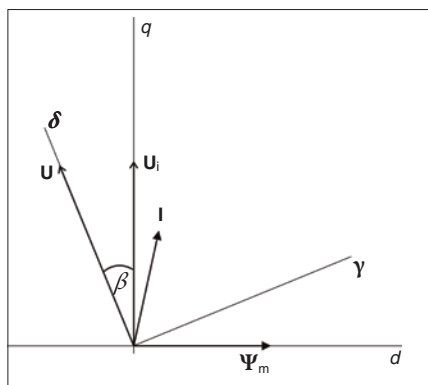
Obr. 1. Příklad závislosti  $U = f(f)$  pro řízení asynchronních a synchronních strojů

hod elektrických strojů ve srovnání např. s hydromotory je jejich velikost úměrná momentu a vyšší hmotnost, daná nutností použití magnetického obvodu z feromagnetického materiálu. Dosažitelný točivý moment je u elektrického stroje úměrný velikosti magnetického toku. Parametry obvodu pro vedení magnetického toku určují rozměry a hmotnost celého stroje.

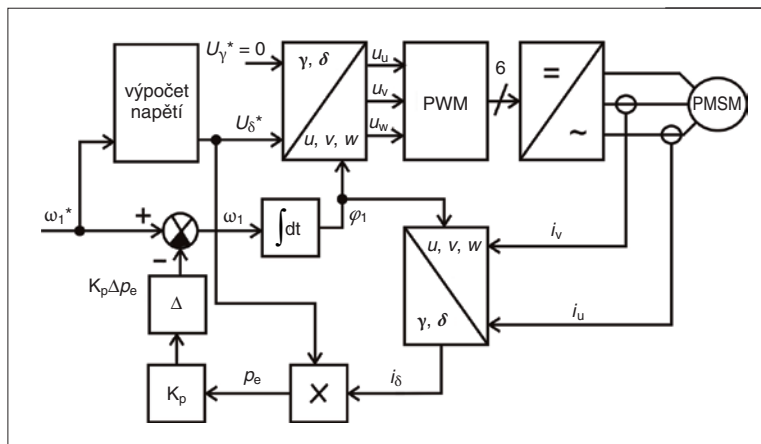
Při návrhu elektrického pohonu je standardně respektován vztah, který vzájemně váže výkon elektromotoru a jeho otáčky. Tento vztah lze psát ve tvaru:

$$P \approx A \cdot B_{stif} \cdot D^2 \cdot l \cdot n \quad (1)$$

(W;  $A \cdot m^{-2}$ , T, mm, mm,  $min^{-1}$ )



Obr. 2. Souřadnicová soustava  $\gamma, \delta$  svázaná s fázorem svorkového napětí statoru



Obr. 3. Struktura řízení vysokootáčkového motoru v souřadnicové soustavě  $\gamma, \delta$  bez zpětnovazební regulace proudu

kde  
 $P$  je jmenovitý výkon elektromotoru,  
 $A$  proudová hustota,  
 $B_{stif}$  střední hodnota magnetické indukce,  
 $D$  průměr rotoru,  
 $l$  délka rotoru,  
 $n$  hodnota jmenovitých otáček rotoru.

Ze vztahu (1) je zřejmé, že geometrické rozměry motoru, a tím i jeho hmotnost, souvisejí pro daný jmenovitý výkon s velikostí jmenovitých otáček a magnetickou indukcí. Moderní technologie výroby elektromotorů umožňují zmenšovat jejich rozměry a hmotnost nejen využitím výsledků výzkumu v ma-

teriálovém inženýrství, ale i přímým použitím vztahu (1), tedy zvyšováním hodnot provozních otáček. Tato cesta se uplatňuje nejen v oblasti elektromotorů, ale i vysokootáčkových generátorů. Vysokootáčkové energetické jednotky s pohonem generátoru turbínou jsou v současnosti velmi perspektivním řešením.

Moderní magneticky tvrdé materiály ze speciálních slitin (nejčastěji NdFeB nebo SmCo) s magnetickou indukcí přibližně 1 T jsou v současnosti standardně využívány v synchronních strojích s výkony od miliwattů až do 1 MW. Díky použití uvedených materiálů pro výrobu budících permanentních magnetů synchronních strojů vykazují tyto stroje výrazné zmenšení rozměrů např. oproti strojům asynchronním pro stejný výkon a stejné otáčky. Toto zmenšení je až trojnásobné.

Optimálním řešením pro minimalizaci rozměrů a hmotnosti elektromotoru je, na základě uvedených skutečností, vysokootáčkový synchronní stroj s permanentními mag-

nety. Díky dostupnosti a možnostem výkonové a řídicí elektroniky lze v současnosti tyto stroje napájet napětím s vysokou frekvencí první harmonické složky – řádově stovky až tisíce hertzů.

Kromě minimalizace rozměrů a hmotnosti stroje je potřeba vysokých otáček v některých případech dána i požadavky konkrétní technologie. Jedním z nejtypičtějším použití vysokootáčkových motorů jsou zařízení na úpravu materiálů, zejména brusná vřetena. V případě těchto zařízení jsou využívány vysokootáčkové elektromotory, neboť použití převodovek dorychla je nevhodné z hlediska momentových vlastností pohonu. Z pohybo-

vé rovnice pohonu totiž plyne vztah pro přepočet momentu zátěže přes převodovku na hřídel motoru:

$$M = \frac{M_z}{i_p \cdot \eta_p} \quad (\text{N}\cdot\text{m}; \text{N}\cdot\text{m}, -) \quad (2)$$

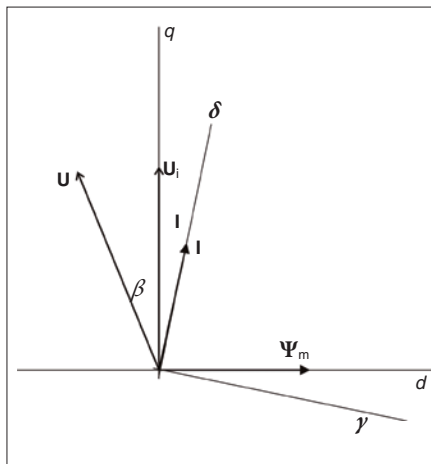
kde

$M$  je moment na hřídeli motoru,

$M_z$  moment zátěže,

$i_p$  převod převodovky (počítaný jako poměr otáček motoru a zátěže),

$\eta_p$  účinnost převodovky.



Obr. 4. Orientace souřadnicové soustavy  $\gamma, \delta$  při použití struktury s regulací proudu

Kromě snížení účinnosti pohonu představuje převodovka dorychla člen zmenšující moment. V důsledku toho je třeba větší moment motoru, což zvyšuje nároky na rozměry a hmotnost elektromotoru. Kromě zmenšení momentu motoru způsobuje převodovka dorychla výrazné zvětšení momentu setrvačnosti, který působí na hřídeli elektromotoru, podle vztahu:

$$J = \frac{J_z}{i_p^2 \cdot \eta_p} \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^2; \text{kg}\cdot\text{m}^2, -) \quad (3)$$

kde

$J$  je moment setrvačnosti zátěže působící na hřídeli elektromotoru přes převodovku,

$J_z$  moment setrvačnosti zátěže,

$i_p$  převod převodovky (počítaný jako poměr otáček motoru a zátěže),

$\eta_p$  účinnost převodovky.

Vzhledem k závislosti působícího momentu setrvačnosti na druhé mocnině převodu převodovky se při použití převodovky dorychla zhoršují dynamické vlastnosti pohonu.

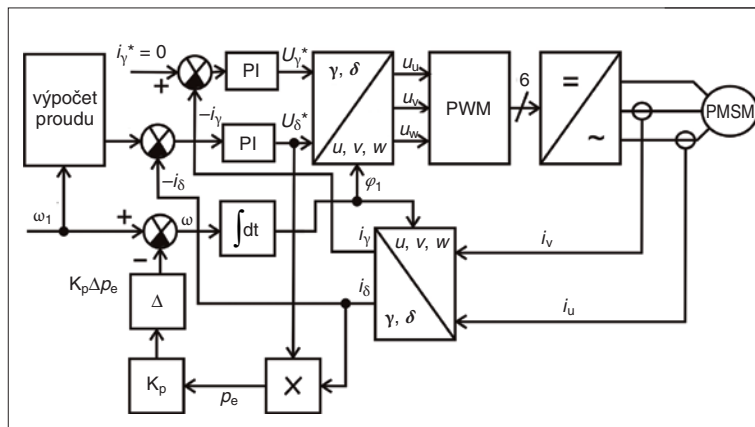
## 2. Specifika vysokootáčkových elektromotorů

Hovoří-li se o vysokootáčkových elektromotorech, jde o pohonné jednotky, které mohou být konstruovány pro velmi rozdílné

provozní podmínky. Běžné asynchronní motory pro síťové i měničové napájení jsou zpravidla dodávány pro maximální otáčky 4 000 až 6 000  $\text{min}^{-1}$ . Pro dosažení a překročení synchronních otáček je podmínkou měničové napájení. Synchronní servomotory s permanentními magnety jsou dodávány pro měničové napájení pro výkony jednotek až desítek kilowattů mnohdy pro otáčky přibližně 10 000  $\text{min}^{-1}$ . Jednofázové komutátorové sériově buzené motory se používají pro otáčky i v okolí 20 000  $\text{min}^{-1}$ . Následně je obtížné jednoznačně stanovit hranici rychlosti, od které je vhodné označovat motor jako vysokootáčkový. Do kategorie vysokootáčkových strojů lze zpravidla řadit motory pro otáčky nad 10 000  $\text{min}^{-1}$ . Horní hranice rychlostí, pro které jsou elektromotory používány, leží v oblasti řádů stovek tisíc  $\text{min}^{-1}$ .

S výjimkou jednofázových komutátorových sériových motorů, které se používají pro rychlosti maximálně do 30 000  $\text{min}^{-1}$ , se

- vysokootáčkové motory, zejména asynchronní, pro otáčky nad 50 000  $\text{min}^{-1}$  jsou často dodávány v tzv. vestavném provedení – rotor a stator se dodávají zvlášť, i bez hřídele, motor se montuje jako uživatelská integrace do konkrétního poháněného zařízení (včetně řešení ložisek),
- u vysokootáčkových pohonů je vždy problémem provedení mechanických vazeb, proto je systém často řešen se společnou hřídelí, na které je umístěn rotor motoru i pracovní stroj, např. kompresor,
- čím větší jsou jmenovité otáčky motoru, tím menší je jmenovitý moment, motory pro otáčky řádově desítek tisíc  $\text{min}^{-1}$  pracují s momenty desetin až jednotek newtonmetrů – výkony jednotky až desítky kilowattů, motory pro otáčky až do stovek tisíc  $\text{min}^{-1}$  pracují s momenty mnohdy pouze jednotek milinewtonmetrů,
- čím větší jsou maximální otáčky motoru, tím více specifík vykazuje výkonová bilan-



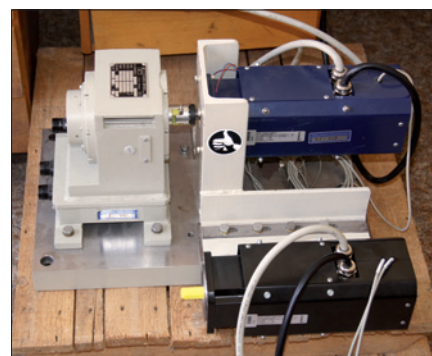
Obr. 5. Struktura řízení vysokootáčkového motoru s regulací proudu

ve vysokootáčkových pohonech lze setkat téměř výhradně s měničově napájenými asynchronními motory nebo se synchronními motory s permanentními magnety.

Konstrukce a specifiky vysokootáčkových elektromotorů jsou dále členěny podle způsobu použití a podle konkrétních maximálních otáček. Prvky klasické konstrukce motorů a klasických metod řízení se uplatňují u pohonů do rychlostí přibližně 40 000 až 70 000  $\text{min}^{-1}$ . Pro pohony s vyššími rychlostmi – pro maximální otáčky 200 000 až 300 000  $\text{min}^{-1}$ , kdy se frekvence základní harmonické napětí a proudu pohybují v řádech kilohertzů, je nutné uplatňovat specifický přístup jak při konstrukci motoru, tak při jeho regulaci.

Nejvýznamnější specifiky konstrukce a vlastností pohonů s vysokootáčkovými asynchronními a synchronními motory lze stručně charakterizovat v těchto bodech:

- extrémní požadavky na mechanickou pevnost a vyvážení rotoru – u synchronních motorů s permanentními magnety je situace komplikována problémem uchycení rotorových magnetů, které je třeba bandážovat,



Obr. 6. Vysokootáčkové motory používané při experimentech na ČVUT v Praze

- rostoucími otáčkami a frekvencí výrazně rostou magnetizační i mechanické ztráty, u pohonů pro rychlosti řádově stovek tisíc  $\text{min}^{-1}$  představuje výkon zátěže mnohdy velmi malé procento příkonu (i pouze jednotky procent), u pohonů pro rychlosti řádově desítek tisíc  $\text{min}^{-1}$  jsou účinnosti srovnatelné s hodnotami u standardních pohonů,
- vysokootáčkové motory mají malou napěťovou konstantu vinutí, vinutí mají relativ-

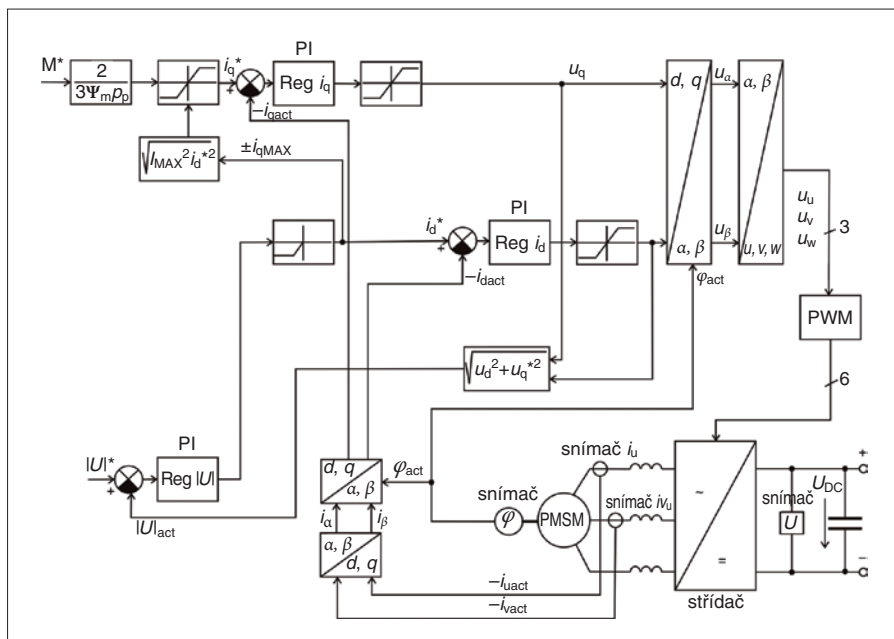
ně malý počet závitů a malou indukčnost, ve spojení s vysokootáčkovými motory je často nutné používat předřadné vyhlazovací tlumivky, aby průběh proudů nevykazoval příliš velké zvlnění,

- používají se vysoké spínací frekvence širkově pulzní modulace měniče – řádově desítky kilohertzů,
- zásadním problémem vysokootáčkových motorů je provedení ložisek – pro motory s maximálními otáčkami do 100 000 min<sup>-1</sup> lze používat zapouzdřená keramická kuličková ložiska s mazacím tukem, pro motory s maximálními otáčkami od přibližně 50 000 min<sup>-1</sup> do stovek tisíc min<sup>-1</sup> existují speciální řešení s dal-

šou výrazně preferovány bezsenzorové metody řízení s měřením pouze elektrických veličin.

### 3. Metody řízení synchronních strojů pro rychlosti řádově desítek tisíc min<sup>-1</sup>

Pro soustavy se synchronními stroji s permanentními magnety, které pracují s maximálními otáčkami přibližně do 60 000 až 70 000 min<sup>-1</sup>, lze použít metody vycházející ze standardních principů řízení synchronních strojů. V jednodušších případech jde o metody elektronické komutace používané u tzv. bezkomutátorových stejnosměrných pohonů, které vycházejí z vyhodnocování šesti poloh



Obr. 7. Struktura regulace experimentálního pohonu na ČVUT v Praze

ším technologickým vybavením – mazání tlakovou olejovou mlhou, vzduchová nebo magnetická ložiska,

- pro vysokootáčkové pohony s maximálními otáčkami do přibližně 60 000 min<sup>-1</sup> lze využívat zpětnovazební struktury regulace založené na principech standardních metod – např. vektorová regulace momentu, pro pohony s větším otáčkovým rozsahem je nutné používat řídicí struktury s minimálními nároky na výpočetní čas pracující mnohdy v otevřené smyčce,
- u pohonů s maximálními otáčkami do přibližně 60 000 min<sup>-1</sup> lze používat snímače pracující na standardním principu – otáčky, úhlové natočení hřídele, moment; u pohonů pracujících s většími otáčkami

rotoru stroje za jednu otáčku ve spojení s obdélníkovým formováním napětí a proudů ve fázích. Metody pro elektronickou komutaci bezkomutátorových stejnosměrných motorů v některých případech využívají bezsenzorové vyhodnocování polohy rotoru na základě indikace průchodu indukovaného napětí nulou. Tyto metody využívají speciální formy širkově pulzních modulací. Více informací o řízení bezkomutátorových stejnosměrných motorů lze nalézt např. v [2].

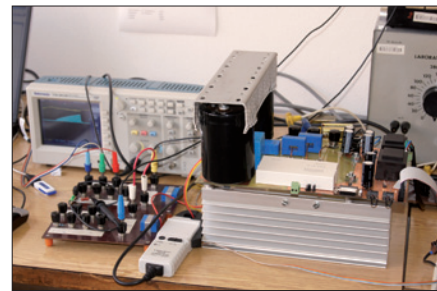
V případě větších požadavků na kvalitu řízení v rozsahu otáček do přibližně 60 000 až 70 000 min<sup>-1</sup> lze používat metody založené na principu vektorové regulace momentu se sinusovou širkově pulzní modulací. Přestože se zvyšujícími se otáčkami pohonu rostou požadavky na výpočetní výkonnost mik-

roprocesorového regulátoru, neboť je nutné používat širkově pulzní modulaci s dostatečnou frekvencí a výpočet regulačního algoritmu provádět několikrát za jednu otáčku stroje, je struktura vektorové regulace momentu synchronního stroje pro otáčky řádově desítek tisíc min<sup>-1</sup> realizovatelná s periodou výpočtu řádově desítek mikrosekund. Oproti asynchronnímu stroji je struktura vektorové regulace synchronního stroje jednodušší a méně časově kritická zejména díky absenci výpočtu on-line matematického modelu. U synchronního stroje s řízením na principu vektorové regulace je však nutné určovat okamžité úhlové natočení rotoru pro orientaci souřadnicové soustavy, ve které je prováděn regulační algoritmus. Zjišťování této informace pomocí postupů bezsenzorového vyhodnocování se u vysokootáčkových strojů stává časově kritickým. U synchronních strojů pro otáčky řádově desítek tisíc min<sup>-1</sup> je však možné využívat standardní metody vyhodnocení polohy rotoru pomocí rezolveru<sup>\*)</sup> nebo inkrementálního čidla.

Principy vektorové regulace synchronních strojů byly dostatečně publikovány, např. v [2]. V odstavci 5 tohoto článku jsou uvedeny informace o implementaci vektorové regulace momentu na vysokootáčkovém motoru.

### 4. Metody řízení synchronních strojů pro rychlosti řádově stovek tisíc min<sup>-1</sup>

Při řízení synchronních motorů v oblasti otáček řádově stovek tisíc min<sup>-1</sup> již není mož-

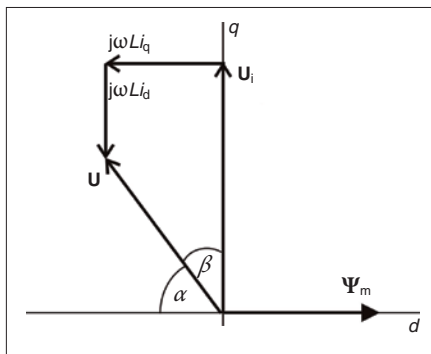


Obr. 8. Experimentální střídač IGBT s měřicí technikou na ČVUT v Praze

né, vzhledem k velmi krátké periodě výpočtu regulačního algoritmu a vysoké frekvenci širkově pulzní modulace, používat regulační algoritmy běžné u standardních pohonů. Navíc je při řízení těchto pohonů, obsahuje-li struktura jakoukoliv zpětnou vazbu, nutné omezit se na měření elektrických veličin; měření a vyhodnocování on-line mechanických veličin způsobuje při těchto rychlostech velké problémy.

<sup>\*)</sup> **Rezolver** – převodník úhlového natočení osy motoru na střídavé elektrické napětí. Základem je magnetický obvod kruhového tvaru složený ze vzájemně izolovaných plechů. Na pevné (statorové) části a pohyblivé (rotorové) části jsou navinuta dvě vinutí, jejichž magnetické toky vyvolané průchodem elektrického proudu jsou navzájem kolmé. V základním zapojení je na jedno statorové vinutí připojeno střídavé harmonické napájecí napětí. Amplitudy elektrického napětí na rotorových vinutích jsou potom úměrné sinu, resp. kosinu úhlu natočení rotoru.

Nejjednodušší metodou frekvenčního řízení je řízení bez zpětné vazby podle kritéria  $U/f = \text{konst.}$  Při této metodě frekvenci generuje výstupní napětí se zadanou frekvencí, efektivní hodnota napětí je dána pevným funkčním vztahem k frekvenci, nejčastěji přibližně lineárním. Tato metoda se často používá u jednodušších pohonů s asynchronními motory. Metoda je principiálně použitelná i u synchronních strojů, neboť i zde indukované napětí roste přímo úměrně s otáčkami a frekvenci statorového napětí. Tato jednoduchá metoda však při řízení synchronních strojů přináší komplikace. U synchronních strojů, zejména s permanentními magnety, které nemají tlumicí vinutí, představuje magnetická vazba mezi statorovým točivým magnetickým polem a magnetickým polem rotorových permanentních magnetů vazbu velmi pružnou. I při nepatrných výkyvech zatížení nebo při změnách frekvence statorového napětí vznikají vlivem této pružné vazby ve stroji mnohdy velmi výrazné kmity rotoru okolo rovnovážné polohy vázané na polohu statorového točivého pole. Důsledkem těchto kmitů je mnohdy vypnutí stroje ze synchronismu a jeho zastavení. Uvedený jev se může vyskytovat i při velmi malých zatíženích stroje. Přestože není tato metoda pro řízení synchronních strojů příliš vhodná, je snaha ji v některých případech využívat u vysokootáčkových motorů pro její jednoduchost a proto, že při ní není nutné měřit rychlost ani úhlové natočení rotoru. I u vysokootáčkových strojů se však projevují její nevýhody. Příklad možné závislosti  $U = f(f)$  je na obr. 1., zvýšení napětí



Obr. 9. K principu omezení zátěžného úhlu  $\beta$

oproti lineární závislosti v oblasti nízkých frekvencí je vyvoláno potřebou kompenzace úbytku napětí na odporu statorového vinutí. Z uvedených důvodů je snaha zavést určité jednoduché stabilizující zpětné vazby i u synchronních strojů pro největší rychlosti. Zpětnovazební struktury těchto pohonů jsou založeny na měření výhradně elektrických veličin a jsou algoritmičtě maximálně zjednodušené. Při otáčkách řádově několika set tisíc  $\text{min}^{-1}$ , kdy je stále nutné provedení řídicího algoritmu několikrát za otáčku, je mnohdy v řídicím procesoru na výpočet regulační struktury k dispozici několik set, maximálně několik jednotek tisíc instrukcí

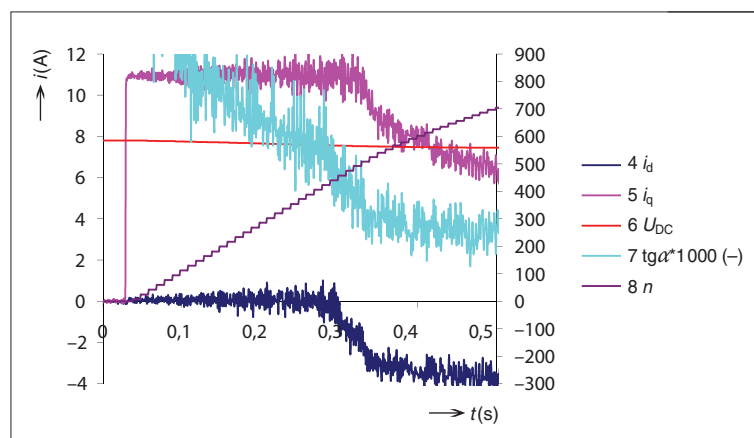
ních cyklů. Při takto kritických podmínkách výpočtu musí být výpočetní algoritmy maximálně optimalizovány, zároveň zbývá velmi malá časová rezerva pro realizaci podpůrných programových bloků – např. komunikace s nadřazeným systémem, vývojová, měřicí a diagnostická podpora atd.

Příkladem zjednodušené struktury řízení vysokootáčkového pohonu s implementovanou stabilizací je metoda využívající informace o činném příkonu stroje. Tato metoda může být použita ve dvou variantách – bez zpětnovazební regulace proudu a se zpětnovazební regulací proudu.

Standardní struktury vektorové regulace momentu synchronních strojů jsou orientovány na použití souřadnicové soustavy  $\mathbf{d}, \mathbf{q}$ , která je osou  $\mathbf{d}$  vázána na polohu magnetic

(obr. 2). U regulačních struktur orientovaných na souřadnicovou soustavu  $\mathbf{d}, \mathbf{q}$  je překročení mezního zátěžného úhlu  $90^\circ$  zamezeno vyhodnocováním úhlové polohy rotoru. V případě zvětšování tohoto úhlu v důsledku zvyšování zatěžovacího momentu a výkonu stroje reaguje regulační struktura přirozeným snížením statorové frekvence a rychlosti točivého magnetického pole tak, že mezní hodnota úhlu  $\beta$  není překročena, avšak snižuje se rychlost otáčení rotoru. Tato reakce synchronního stroje ve spojení s regulační strukturou je analogická k chování stejnosměrného stroje s cizím buzením při zvýšení zatěžovacího momentu.

Má-li se při regulaci vysokootáčkového synchronního stroje zamezit překročení mezní hodnoty zátěžného úhlu  $\beta$  i bez znalosti



Obr. 10. Rozběh vysokootáčkového motoru PMSM 2 s omezením zátěžného úhlu  $\beta$  – tvrdý zdroj napětí střídače

kého toku permanentních magnetů rotoru, tj. na polohu rotoru. Zároveň leží v této soustavě fázor indukovaného napětí ve směru osy  $\mathbf{q}$ . Tento princip vyžaduje vyhodnocování on-line aktuální polohy souřadnicové soustavy, tj. polohy rotoru buď měřením, nebo výpočtem. U pohonů pro nejvyšší rychlosti je cílem obějit při regulaci nutnost zjišťovat polohu rotoru, regulační struktura tedy nemůže být orientována na souřadnicovou soustavu  $\mathbf{d}, \mathbf{q}$ . U jednodušší metody bez zpětnovazební regulace proudu se pracuje v rotující souřadnicové soustavě  $\gamma, \delta$ . Tato rotující souřadnicová soustava je osou  $\delta$  vázána na polohu fázoru svorkového napětí statoru podle obr. 2.

V obr. 2 je  $\mathbf{U}$  fázor svorkového napětí,  $\mathbf{U}_i$  je fázor indukovaného napětí,  $\mathbf{I}$  je fázor proudu statoru a  $\mathbf{\Psi}_m$  je fázor reprezentující magnetický tok rotoru. Z obr. 2 je zároveň zřejmá relace mezi souřadnicovými soustavami  $\gamma, \delta$  a  $\mathbf{d}, \mathbf{q}$ . Struktura řízení bez regulace proudu je znázorněna na obr. 3.

Tato struktura vychází z metody řízení založené na použití kritéria  $U/f = \text{konst.}$  Pohon se synchronním strojem je tedy při použití této metody náchylný k nestabilitám a vypnutí ze synchronismu, což je v principu způsobeno překročením mezní hodnoty zátěžného úhlu  $\beta$  mezi fázorem magnetického toku statoru a rotoru, resp. mezi svorkovým a indukovaným napětím statoru

aktuálního úhlového natočení rotoru, je nutné informaci o zátěžném úhlu  $\beta$  zjistit jiným způsobem, nepřímo, pouze na základě znalosti elektrických veličin stroje. Veličinou, která v sobě nese informaci o zatěžovacím momentu stroje, a tím i o zátěžném úhlu, která je zároveň snadno zjistitelná, je elektrický příkon motoru. Elektrický příkon stroje je svázán s jeho mechanickým výkonem, při známé hodnotě mechanických otáček je výkonu úměrný momentu, který v nejjednodušším případě závisí na úhlu  $\beta$  sinusově.

Elektrický příkon ve struktuře na obr. 3 je vyhodnocován v souřadnicové soustavě  $\gamma, \delta$  a vychází ze vztahu:

$$p_e \approx u_\gamma \cdot i_\gamma + u_\delta \cdot i_\delta \quad (\text{W; V, A}) \quad (4)$$

kde

$p_e$  je příkon motoru,

$u_\gamma, u_\delta$  složky fázorů napětí v souřadnicové soustavě  $\gamma, \delta$ ,

$i_\gamma, i_\delta$  složky fázorů proudu v souřadnicové soustavě  $\gamma, \delta$ .

Vzhledem k orientaci souřadnicové soustavy na fázor svorkového napětí statoru platí  $u_\gamma = 0$  a vztah (4) se zjednoduší do tvaru:

$$p_e \approx u_\delta \cdot i_\delta \quad (\text{W; V, A}) \quad (5)$$

(dokončení příště)