

MOTORY S ELEKTRONICKOU KOMUTACÍ (EC MOTORY) PRO MECHATRONICKÉ APLIKACE

Autor: Doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.

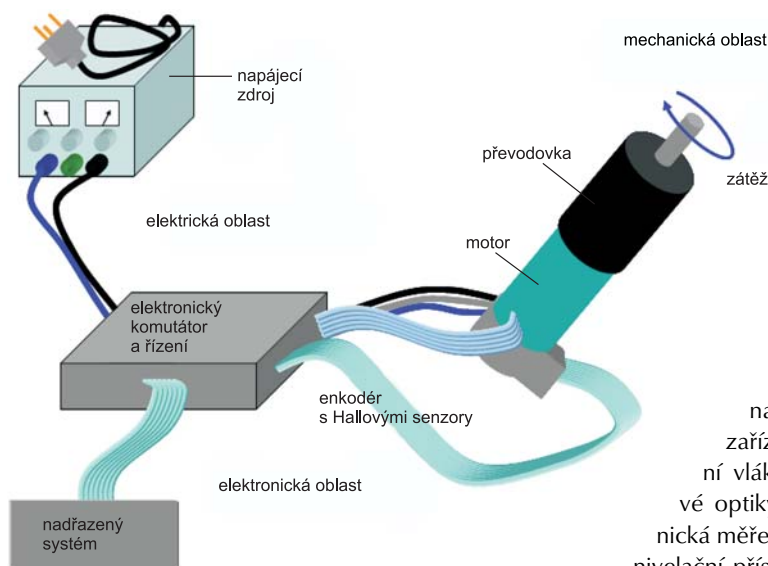
EC motory (někdy též nazývané BLDC motory) napájené bezpečným napětím jsou velmi často využívány jako akční členy elektrických mikropohonů. Tyto mikropohony slouží pro řízení pohybu nejrůznějších mechatronických systémů. Jejich implementace je trvale doprovázena zlepšováním funkčních vlastností všech členů struktury, tj. motorů, převodovek, snímačů polohy nebo rychlosti otáčení, včetně řídicí a výkonové elektroniky s cílem dosažení maximálního uživatelského komfortu. Tento příspěvek má za cíl stručně popsat různé konstrukční varianty EC motorů a porovnat jejich základní uživatelské vlastnosti. Za výkonovou hranici těchto motorů je obvykle považován výkon 400 W.

umělých vláken, navíjecí technika, šicí stroje, řezačky a vysekávačky materiálu,

- kancelářská, komunikační a bezpečnostní technika, tj. bankomaty, etiketovací stroje, frankovací stroje, řezačky papíru, stroje na počítání bankovek, psací stroje, bezpečnostní a kontrolní zařízení na letištích, v metru, obchodech a bankách, jízdenkové a prodejní automaty, automaty na prodej drobného zboží,
- hobby technika, např. modely železnic, lodí, letadel, automobilů, hrací automaty, robotický fotbal.

Struktura pohonu s EC motorem

Protože napájení motorů s elektronickou komutací je stejnosměrné, musí být mechanická komutace nahrazena vhodnými elektronickými spínacími obvody. Tyto motory proto integrují výhodu stejnosměrného napájení s bezkontaktním přenosem energie mezi statorem a rotorem, která je vlastní synchronním motorům s permanentními magnety a asynchronním motorům. Točivý moment motoru vzniká vzájemným působením magnetického pole otočného permanentního magnetu (buzení) a proudu v nepohyblivém vinutí statoru (kotva). Pro vznik točivého momentu je však nutné, aby nepohyblivé vinutí vytvářelo točivé magnetické pole, takže je třeba toto vinutí realizovat nejméně ve třech sekcích neboli fázích. Pro zajištění správného napájení konkrétní sekce (fáze) vinutí je ale nutné znát relativní polohu rotoru vůči poli statoru. Za tím účelem se u EC mikromotorů nejčastěji používají tři Hallovy senzory rozložené po 120 stupních na obvodu statoru. Tyto senzory jsou obvykle integrovány do pláště motoru. Existují



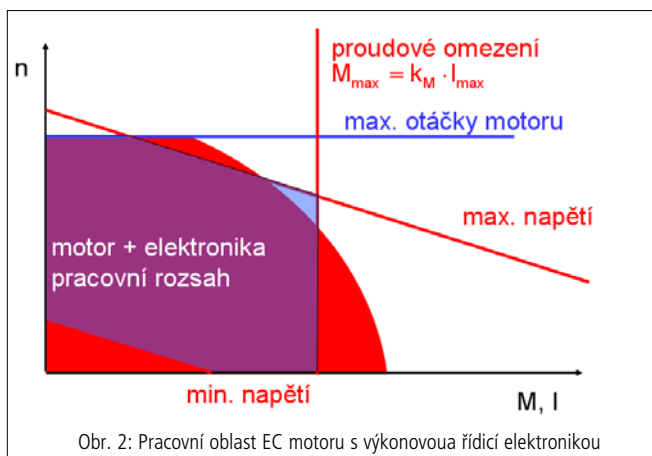
Obr. 1: Uspořádání komponent EC motoru

Aplikační oblasti

Rozsah aplikačních oblastí mikromotorů malého napětí je v současnosti velmi široký. Do rozhodujících oblastí patří zejména:

- letecká a kosmonautika, tj. letecké přístroje, kamery, antény radarů, pohony kosmických sond,
- automobilová technika, např. zlepšení jízdního komfortu, přestavování polohy sedaček, reflektorů, zpětných zrcátek, systémy aktivní a pasivní bezpečnosti v dopravních prostředcích,
- lékařská technika, tj. krevní čerpadla, dentální zařízení, elektrokardiografy, elektroencefalografy, mamografy, ortopedická zařízení, dávkovače léků, umělé končetiny,

- přístrojová technika, např. vážicí zařízení, splétání vláken vláknové optiky, geotechnická měření, laserové nivelační přístroje, měřicí zařízení včetně záznamové techniky, mikrometry, ovládání ventilů, souřadnicové zapisovače, skenery, polohování solárních kolektorů, fotospektrometry, profiloměry,
- průmyslová automatizace a robotika, zejména manipulátory a koncové efekty robotů, stroje na osazování plošných spojů, výroba CD-ROM, laserové značkovače, výměníky nástrojů, stroje pro laserové řezání a svařování,
- papírenská a polygrafická zařízení, textilní stroje, výroba



Obr. 2: Pracovní oblast EC motoru s výkonovou řídicí elektronikou

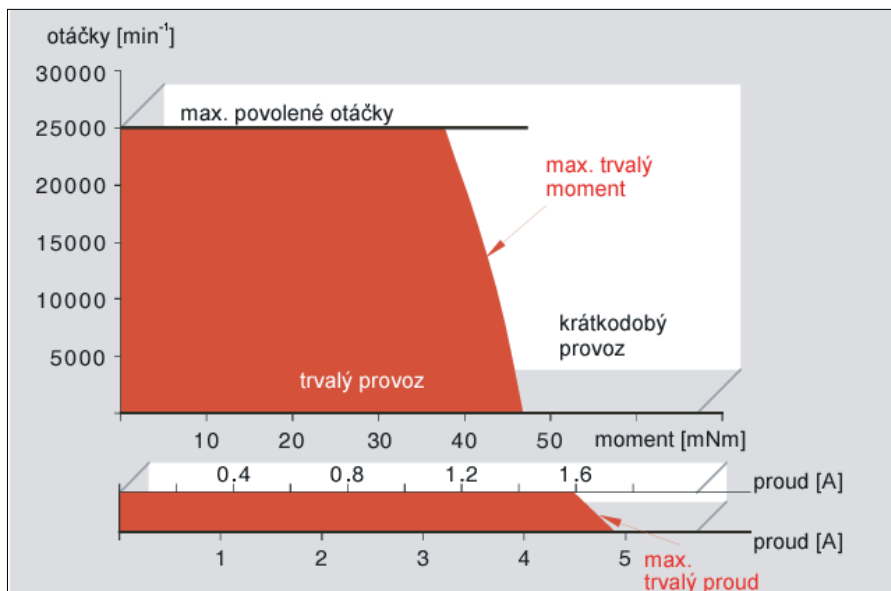
však i bezsenzorové způsoby zjišťování polohy rotoru a pro tyto aplikace se vyrábí motory bez Hallových senzorů.

Z uvedeného je zřejmé, že pohon s EC motorem musí vždy obsahovat čtyři základní komponenty, a to DC napájecí zdroj, elektronický komutátor s řídicí elektronikou a snímače polohy rotoru. Vzájemné propojení komponent tohoto pohonu je zřejmé z obr. 1. Důsledkem toho je, že pro návrh pohonu nelze pracovat jen s katalogovými údaji vlastního motoru, nýbrž musíme vzít v úvahu omezení, vyplývající z vlastností všech komponent pohonu, zejména elektroniky. Vliv těchto omezení na pracovní oblast motoru je obecně znázorněn na obr. 2.

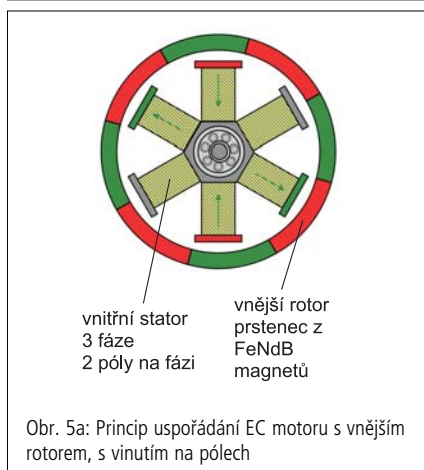
Konstrukční varianty EC motoru

Konstrukční uspořádání EC motoru v podstatě odpovídá uspořádání motoru synchronního s trojfázovým vinutím na statoru a permanentními magnety na rotoru. Chování je však obdobné jako u motoru stejnosměrného. V nabídce výrobců EC motorů lze nalézt dvě základní konstrukční provedení těchto motorů, a to motory s homogenním vinutím a motory se soustředným vinutím umístěným na pólech statoru. Obě tyto koncepce mají svoje přednosti a nedostatky a z toho plynoucí oblasti použití.

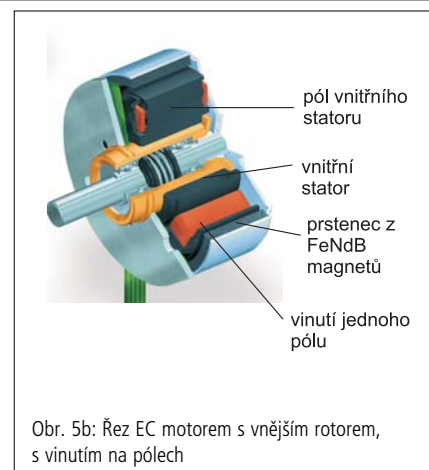
Výhodou motorů EC oproti všem motorům DC je vyšší životnost, dosažitelnost vyšších otáček, řádově desítek tisíc, přičemž trvalé maximální otáčky jsou omezeny spíše konstrukcí a životností ložisek. Naproti tomu však maximální trvalý moment s otáčkami klesá. To je způsobeno tím, že magnetický tok ve statoru se cyklicky mění s otáčením permanentního magnetu na rotoru. Tento magnetický tok vyvolává ztráty v železe, které pochopitelně s rostoucími otáčkami také rostou. Pro omezení těchto ztrát jsou plechy paketu statoru vyráběny ze speciálních slitin. Podstatnou výhodou celé aplikace je



Obr. 4: Pracovní rozsah motoru Maxon řady EC-powermax



Obr. 5a: Princip uspořádání EC motoru s vnějším rotorem, s vinutím na pólech



Obr. 5b: Řez EC motorem s vnějším rotorem, s vinutím na pólech

nižší cena a menší rozměry elektroniky než u pohonu s motorem DC.

EC motory s homogenním vinutím

Design těchto motorů je prakticky stejný jako u standardních motorů synchronních - motor má trojfázové vinutí umístěné na vnějším statoru a permanentní magnety jsou umístěny na vnitřním rotoru. Statorové vinutí je umístěno buď v drážkách paketu

statoru, nebo je provedeno jako samonosné spletané vinutí a je umístěno pod paketem statoru.

Motory s trojfázovým vinutím se vyrábí jak pro zapojení do hvězdy, tak i do trojúhelníku. Obě zapojení mají své specifické vlastnosti. Zapojení do hvězdy má větší činný odpor, protože platí:

$$R_Y = 3 \cdot R_{\Delta}$$

s tím souvisí menší proudy a větší momentová konstanta, tedy:

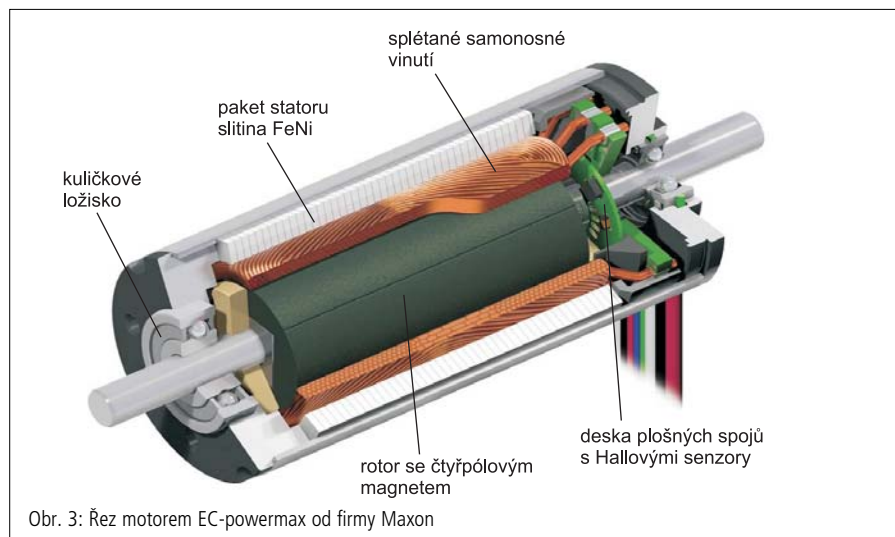
$$k_{MY} = \sqrt{3} \cdot k_{M\Delta}$$

Naproti tomu zapojení do trojúhelníku pracuje s nižším napětím a má větší napěťovou konstantu podle vztahu:

V aplikacích bývá preferováno zapojení do hvězdy, které dovoluje použití men-

$$k_{nY} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot k_{n\Delta}$$

ších průřezů vodičů vlastního vinutí i propojovacích vodičů z důvodu menších proudů. Aby nebyla překročena přípustná teplota motoru, je nutno s rostoucími otáčkami snižovat proud ve vinutí kotvy a tím i trvalý zatěžovací moment. To se projeví i na snížení výkonu motoru oproti



Obr. 3: Řez motorem EC-powermax od firmy Maxon

srovnatelnému DC motoru. Pro snížení ztrát v železe je magnetický obvod statoru tvořen paketem složeným z velmi tenkých plechů ve tvaru mezikružní a tyto plechy jsou vyráběny ze speciálních slitin.

Pro mikropohony v mechatronických aplikacích je převážně používáno provedení se samonosným vinutím. Příklad provedení tohoto motoru je uveden na obr. 3 a typický pracovní rozsah tohoto

DC mikromotoru „bez železa“, je zřejmé, že rotor motoru EC má nutně větší moment setrvačnosti. To znamená, že dynamické vlastnosti samotného motoru jsou poněkud horší. Přesto však je dosahováno elektromechanických konstant v rozmezí 3 až 10 ms, což pro většinu i náročných aplikací postačuje.

Při použití v servopohonech jsou motory EC určeny pro vysoce dynamická zařízení

Výhodou motorů EC oproti všem motorům DC je vyšší životnost a dosažitelnost vyšších otáček řádově desítek tisíc

typu motoru je uveden na obr. 4. Zde je třeba si uvědomit, že rychlostní charakteristika EC motoru je přibližně o 30 procent strmější než u ekvivalentního motoru DC, což je dáno hlavně tím, že motor EC má při zapojení do hvězdy mnohem nižší využití vinutí (v daném časovém okamžiku aktivně přispívají ke vzniku točivého momentu pouze 2/3 všech závitů vinutí kotvy). Určitým nedostatkem je existence velké vzduchové mezery mezi železem statoru a rotoru. Vrstva samonosného vinutí kotvy významně zvětšuje reluktanci magnetického obvodu stroje, důsledkem je menší magnetická indukce ve vzduchové mezeře a tudíž menší dosažitelný moment.

Po stránce zástavbových rozměrů by se vzhledem k existenci ztrát v železe statoru mohlo vyvozovat, že situace bude horší než u srovnatelných DC motorů. Praxe však ukazuje, že při použití špičkových technologií tomu může být i naopak - například jedno z provedení motorů řady EC-powermax firmy Maxon má měrné rozměry $3,4 \text{ W/cm}^3$. Ztráty v železe statoru se však nevyhnutelně projevují na nižší účinnosti, která typicky je jen o málo větší než 80 %.

Porovnáme-li dynamické vlastnosti těchto EC mikromotorů se srovnatelnými

s dlouhou životností a malými rozměry. Provedení s permanentními magnety na bázi vzácných zemin jsou vhodná pro vysoká zrychlení a elektronická komutace s Hallovými sondami zaručuje široký rozsah otáček a přesné polohování. Důležitou předností motorů s rozloženým vinutím je plynulý chod bez zvlnění momentu, motory nemají zubový (cogging) moment a nejsou tedy zdrojem chvění či vibrací. Vhodnými aplikacemi těchto motorů jsou přenosná ruční zařízení pro medicínské použití a robotika, k čemuž je předurčuje jejich malá měrná hmotnost. Dále naleznou využití ve výrobních zařízeních, kde je lze použít bez převodovky, například pro pohon vysokootáčkových kuličkových šroubů.

EC motory s vinutím na pólech statoru

Design těchto motorů vykazuje určité znaky designu hybridních krokových motorů, protože obě funkční části motoru - stator i rotor - jsou elektromagneticky aktivní, rotor je tvořen permanentním magnetem a vinutí statoru je provedeno jako soustředné cívky, které jsou umístěny na vyniklých pólech. Uživatelské vlastnosti jsou však zcela odlišné. Krokové motory

jsou určeny pro přímé polohování s definovanou (obvykle velmi malou) velikostí kroku a jmenovitý (maximální provozní) moment jsou schopny poskytovat pouze v úzkém rozmezí nízkých otáček. EC motory s vinutím na pólech statoru jsou určeny pro aplikace, kde je požadován velký moment v celém rozsahu otáček. Maximální otáčky jsou však menší než u motorů s homogenním vinutím. Tyto motory se obvykle konstruují v plochém provedení s vnitřním statorem a vnějším rotorem. Principiální uspořádání je zřejmé z obr. 5 a skutečné provedení pak z obr. 5b.

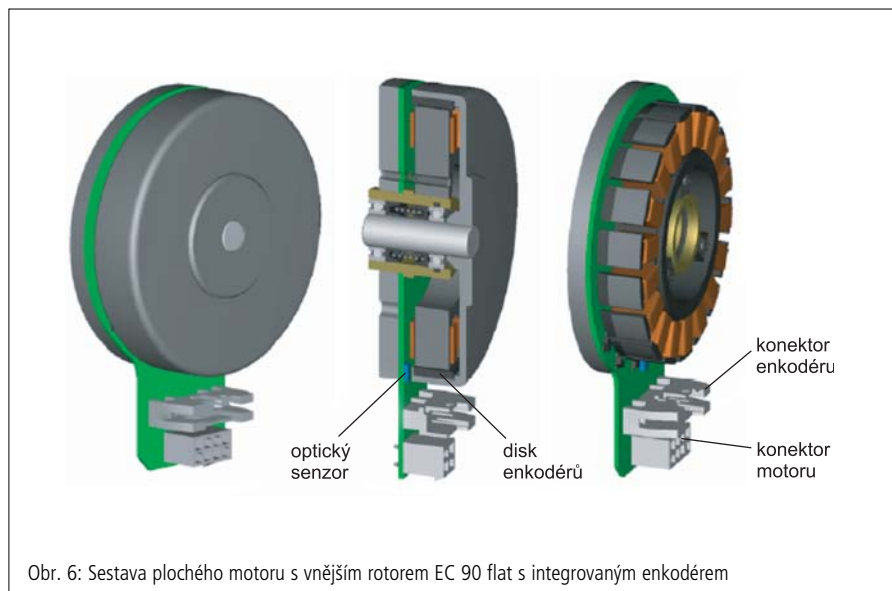
Vnější rotor těchto motorů je tvořen magnetickým prstencem, složeným z permanentních magnetů na bázi vzácných zemin (obvykle FeNdB). Jedná se o mnohapólový magnet - na obr. 5a je zobrazen jako osmipólový. Z obr. 5 je zřejmé, že tyto motory lze konstruovat s podstatně menší vzduchovou mezerou, než mají motory s rozloženým vinutím. Protože navíc elektromagnetická síla vzniká na největším možném průměru, vyznačují se tyto motory typicky větším momentem než motory s rozloženým vinutím.

Na vnitřním statoru je na vyniklých pólech (zubech) umístěno trojfázové vinutí s daným počtem zubů na fázi (motor na obr. 5 má dva zuby na fázi, tedy celkem 6). Orientace magnetického pole v jedné sekvenci napájení při zapojení vinutí do hvězdy je v obr. 5a vyznačena šipkami. Má-li mít motor plynulý chod, není prakticky možné zmenšovat pod uvedené hodnoty ani počet magnetických pólů statoru, ani počet pólů na fázi. To má za následek vysoký spínací kmitočet výkonových prvků elektronického komutátoru a prakticky u těchto motorů nelze dosáhnout tak vysokých otáček jako u motorů s rozloženým vinutím.

Jako příklad extrémně plochého motoru je možno uvést motor EC 90 flat firmy Maxon, jehož rozměry délka/průměr činí 30 mm/90 mm, jehož sestava je zřejmá z obr. 6. Motor má sedm pólových dvojic, šest zubů na fázi a není vhodný pro vysoké otáčky (otáčky naprázdno přibližně $2\,000 \text{ min}^{-1}$), poskytuje však velký moment (jmenovitý moment až 0,5 Nm).

Design motorů s vinutím na pólech není ovšem omezen pouze na výše popsané uspořádání. Výrobci nabízejí motory s vnitřním statorem a vnějším rotorem v obvyklé proporcii mezi délkou a šířkou.

Na trhu jsou k dispozici i ploché motory s vinutím na pólech klasického funkčního uspořádání, tj. s vnějším statorem a vnitřním rotorem. Jedním z představitelů tohoto typu motoru je motor EC-i 40 firmy Maxon, jehož konstrukční uspořádání je zřejmé z obr. 7. Jeho rozměry délka/průměr činí 36 mm/40 mm. Permanentní



Obr. 6: Sestava plochého motoru s vnějším rotorem EC 90 flat s integrovaným enkodérem

magnet motoru má sedm pólových dvojic a rovněž není vhodný (v porovnání s motory s homogenním vinutím) pro vysoké otáčky (otáčky naprázdno cca 14 000 min⁻¹). Jmenovitý moment motoru je cca 0,06 Nm. Porovnáme-li tyto hodnoty s hodnotami motoru EC 90 flat, vidíme markantní rozdíl v základních uživatelských vlastnostech těchto motorů.

Konstruktivní uspořádání EC motorů s vinutím na pólech statoru přináší oproti motorům s homogenním vinutím lepší využití mědi vinutí v důsledku redukce délky vodičů funkčně neužitečných čel vinutí. Důsledkem je až o 20 % vyšší moment při stejném objemu stroje ve srovnání s motorem s homogenním vinutím. Proto dosahují tyto motory velkých hodnot měrné hmotnosti [W/kg] a měrných rozměrů [W/m³] při dobrých dynamických vlastnostech. Výhodou je také nižší cena motoru oproti motoru s homogenním vinutím srovnatelného výkonu. Při návrhu pohonu je však třeba počítat s existencí zubového momentu, který je důsledkem proměnlivé magnetické vodivosti magnetického obvodu stroje. Užitím vhodných magnetických materiálů a různými konstrukčními opatřeními je však možné tento moment snížit na minimum.

Typickými aplikačními oblastmi různých verzí EC motorů s vinutím na pólech statoru jsou roboty a manipulátory, osazovačky plošných spojů, snímací a čtecí zařízení a medicínská technika.

Závěr

a pozvání na MSV Brno 2008

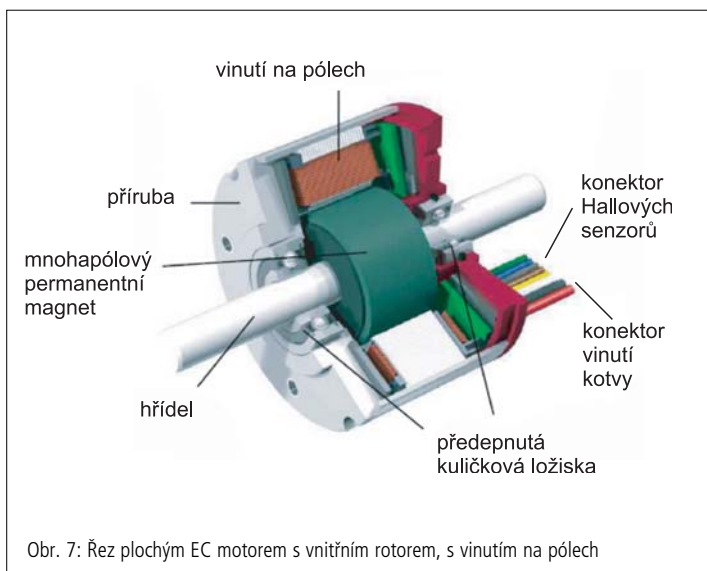
V příspěvku jsou uvedeny nejvýznamnější uživatelské vlastnosti dvou základních verzí mikromotorů s elektronickou komutací. Popis konstrukce těchto motorů je základním podkladem pro dokumentaci těchto vlastností. Rozhodnutí o použití toho či onoho typu motoru v pohonu pro specifikovanou aplikaci musí s ohledem

na všechny okolnosti učinit čtenář sám. Z výše uvedeného je však zřejmé, že motory s homogenním vinutím otáčkově předčí nejen motory s vinutím na pólech statoru, ale i DC motory klasické koncepce. Na druhé straně motory s vinutím na pólech statoru vyvozují větší momenty, avšak jejich otáčky jsou menší. Podstatné rozdíly v těchto základních parametrech existují i mezi provedením s vnějším a vnitřním rotorem. Všechny uváděné konstrukční varianty EC motorů mají vcelku dobré dynamické vlastnosti a většina jich vyhovuje i pro vysoce náročné aplikace. Rozdíl je samozřejmě v momentech setrvačnosti s vinutím na pólech statoru s vnějším a vnitřním rotorem.

Uvedený článek prezentuje široké spektrum konstrukčních variant EC motorů. Jako konkrétní příklady jsou uvedeny především EC motory firmy Maxon, které splňují vysoké požadavky na dynamické chování, na minimální hmotnost a rozměry a vysokou účinnost.

Firma Maxon, a.g. je jednou z vedoucích firem na trhu mikromotorů s elektronickou komutací. Má ve výrobním programu EC mikromotory od výkonu 1,2 W do výkonu 400 W v provedení válcovém s homogenním vinutím a od výkonu 0,2 W do výkonu 60 W v provedení plochém s vinutím na pólech statoru. Výzkumní a vývojoví pracovníci této firmy důsledně reagují na nové poznatky i požadavky trhu v oboru elektrických mikropohonů malého napětí. Výsledkem jejich výzkumných a vývojových prací jsou motory, převodovky, snímače polohy a řídicí jednotky nejvyšší technické úrovně, schopné splnit i nejnáročnější požadavky zákazníků.

Ve stánku společnosti Uzimex Praha, spol. s r. o., v hale V, č. 107, najdou zájemci v průběhu Mezinárodního strojírenského veletrhu 2008 několik nejnovějších výrobků od firmy Maxon.



Obr. 7: Řez plochým EC motorem s vnitřním rotorem, s vinutím na pólech

Technici společnosti Uzimex jsou připraveni se zájemci konzultovat jejich použití v konkrétních úlohách a během vývoje jejich výrobků jim poskytnout plnou technickou podporu. **T-T**

www.uzimex.cz