

# Akční členy s EC motory

## - výhodné řešení pro mechatronické aplikace

Pro řízení pohybu nejrůznějších mechatronických systémů je výhodné použití mikropohonů s EC motory (motory s elektronickou komutací, někdy též nazývané BLDC motory), napájené bezpečným napětím. Jejich implementace je trvale doprovázena zlepšováním funkčních vlastností všech členů struktury pohonu, tj. motorů, převodovek, snímačů polohy nebo rychlosti otáčení včetně řídicí a výkonové elektroniky s cílem dosažení maximálního uživatelského komfortu. V tomto příspěvku jsou stručně popsány různé konstrukční varianty EC motorů a jsou porovnány jejich základní uživatelské vlastnosti. Pro implementaci do mikropohonů je za horní výkonovou hranici EC motorů obvykle považován výkon 400 W.

### Princip činnosti EC motoru

Motivací pro vytvoření těchto motorů byla snaha integrovat výhodu stejnosměrného napájení s bezkontaktním přenosem energie mezi státorem a rotorem, která je vlastní synchronním motorům s permanentními magnety a asynchronním motorům. Protože napájení je stejnosměrné, musí být mechanická komutace nahrazena vhodnými elektronickými spínacími obvody. Princip činnosti klasického stejnosměrného motoru je založen na působení síly na vodič protékající proudem, který je umístěn ve stacionárním magnetickém poli. Při vhodném konstrukčním uspořádání a s mechanickou komutací docílíme vzniku točivého momentu. Stejněho výsledku, tedy vzniku točivého momentu, docílíme, když bude protékán proudem nepohyblivý vodič, který bude umístěn v poli otočného permanentního magnetu.

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 však i bezsenzorové

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.

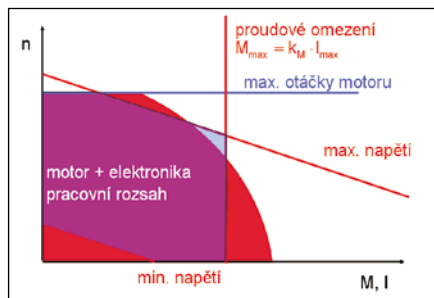
### Varianty konstrukčního provedení EC motoru

Konstrukční uspořádání EC motoru je v podstatě odpovídající uspořádání motoru synchronního s trojfázovým vinutím na statoru a permanentními magnety na rotoru. Chování, tj. statické a dynamické vlastnosti, je však obdobné, jako u motoru stejnosměrného. Proto (a z důvodu stejnosměrného napájení) bývají EC motory často řazeny mezi motory stejnosměrné.

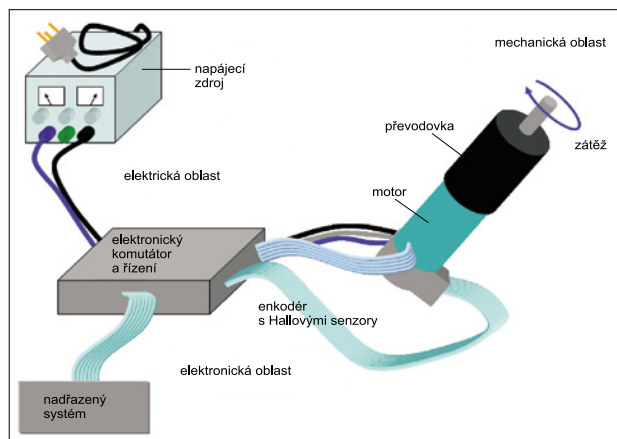
**Výhodou motorů EC oproti všem motorům DC je vyšší životnost, dosažitelnost vyšších otáček, řádově desítek tisíc,** přičemž trvalé maximální otáčky jsou omezeny spíše konstrukcí a životností ložisek. Naproti tomu však maximální trvalý moment s otáčkami klesá. To je způsobeno tím, že magnetický tok ve 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 pakety statoru vyráběny ze speciálních slitin. Podstatnou výhodou celé aplikace je nižší cena a menší rozměry elektroniky, než u pohonu s motorem DC. 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.

### EC motory s homogenním vinutím

Varianta EC motoru s homogenním vinutím je provedením obvyklým a tyto motory jsou



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



Obr. 1 Uspořádání komponent s EC motorem

způsoby zjišťování polohy rotoru a pro tyto aplikace se vyrábí motory bez Hallových senzorů. Problematika bezsenzorového řízení EC motorů je mimo rámec tohoto příspěvku.

### Struktura a uspořádání mikropohonu s EC motorem

Z výše uvedeného je zřejmé, pohon s EC motorem musí vždy obsahovat čtyři základní komponenty, a to DC napájecí zdroj, elektronický komutátor s řídicí

vyroběny řadou výrobců v široké škále výkonů. Konstrukční provedení těchto motorů je prakticky stejné, 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 (klasické provedení), nebo je provedeno jako samonosné splétané vinutí a je umístěno pod paketem statoru (provedení pro dynamicky náročné aplikace).

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

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

menší proudy a větší momentovou konstantu, tedy

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

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

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

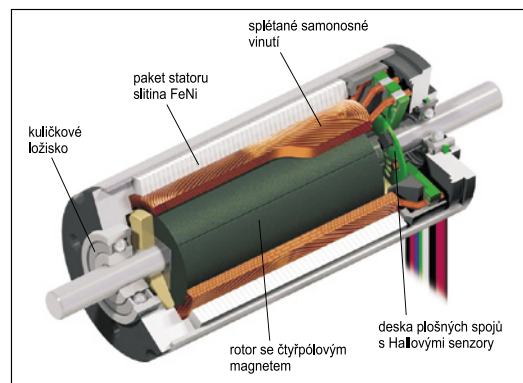
V aplikacích bývá preferováno zapojení do hvězdy, které dovoluje použití menších průřezů vodičů vlastního vinutí i propojovacích vodičů z důvodu menších proudů.

S rostoucími otáčkami rostou však ztráty v železe. Aby proto nebyla překročena přípustná teplota motoru, je nutno snižovat proud ve vinutí kotvy a tím i trvalý zatěžovací moment. Pro snížení ztrát v železe je magnetický obvod statoru tvořen paketem složeným z velmi tenkých plechů ve tvaru mezikružích a tyto plechy jsou vyráběny ze speciálních slitin. Přesto se vliv ztrát v železe při vyšších otáčkách projevuje na snížení výkonu EC motoru oproti srovnatelnému DC motoru. 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 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 hlavně dáno 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 zmenšuje reluktanci magnetického obvodu stroje, důsledkem je menší magnetická indukce ve vzduchové mezeře a tudíž menší dosažitelný moment.

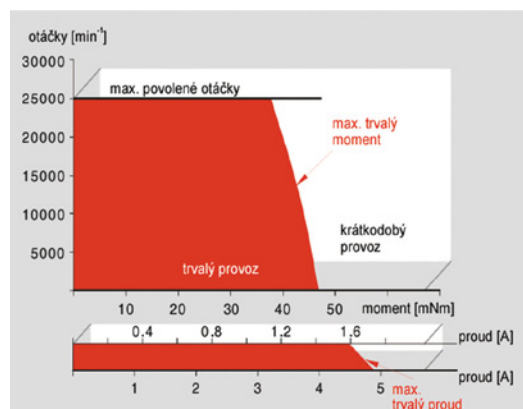
Po stránce zástavbových rozměrů by se vzhledem k existenci ztrát v železe statoru mohlo vyvozovat, že situace bude horší, než u srovnatelných DC motorů. Praxe však ukazuje, že při použití špičkových technologií tomu může být i naopak – např. jedno

z provedení motorů řady EC-powermax firmy Maxon má měrné rozměry 3,4 W/cm<sup>3</sup>. 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 DC mikromotory „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 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 „reluktanční (cogging) moment a nejsou tedy zdrojem chvění či vibrací. Vhodnými aplikacemi těchto motorů jsou přenosné ruční nářadí pro medicínské použití, robotika pro jejich malou měrnou hmotnost a výrobní zařízení, kde je lze použít bez převodovky, např. pro pohon vysokootáčkových kuličkových šroubů.



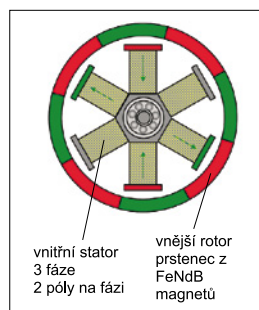
Obr. 3 Řez motorem EC-powermax od firmy Maxon



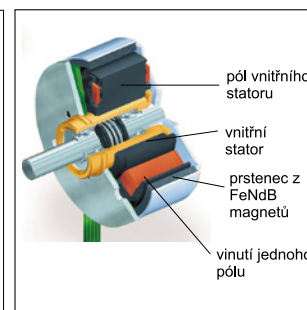
Obr. 4 Pracovní rozsah motoru Maxon řady EC-powermax

## EC motory s vinutím na pólech statoru

Varianta EC motoru s vinutím na pólech statoru je méně obvyklá, v poslední době však jejich nabídka roste. Konstrukční provedení těchto motorů vykazuje určité znaky konstrukce 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 cívký, 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



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

s homogenním vinutím. Tyto motory se obvykle konstruují v plochem provedení s vnitřním statorem a vnějším rotorem. Principiální uspořádání je zřejmé z obr. 5a, skutečné provedení pak z obr. 5b.

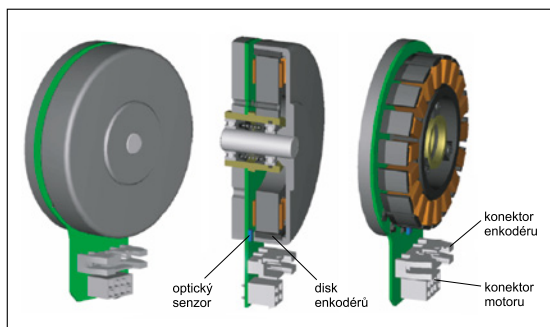
Vnější rotor těchto motorů je tvořen magnetickým prstencem, složeným z permanentních magnetů na bázi vzácných zemin (obvykle FeNdB). Jedná se o mnohapólový magnet – na obr. 5a je zobrazen jako osmipólový. Z obr. 5 je zřejmé, že tyto motory lze konstruovat s podstatně menší vzduchovou mezerou, než mají 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 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 ani

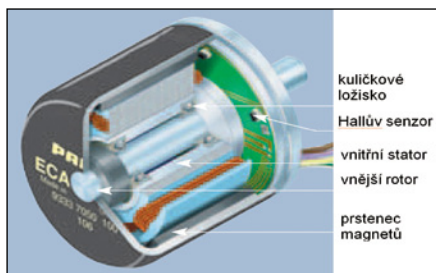
počet magnetických pólů statoru, ani počet pólů na fázi zmenšovat pod uvedené hodnoty. To má za následek vysoký spínací kmitočet výkonových prvků elektronického komutátoru a prakticky u těchto motorů nelze dosáhnout tak vysokých otáček, jako u motorů s rozloženým vinutím.

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 cca 2000 min<sup>-1</sup>), poskytuje však velký moment (jmenovitý moment až 0,5 Nm).

Konstrukční provedení 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. Příklad tohoto provedení je uveden na obr. 7.



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

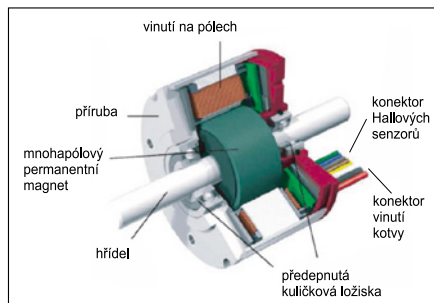


Obr. 7 Řez válcovým EC motorem s vnějším rotorem, s vinutím na pólech

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. 8. Jeho rozměry délka/průměr činí 36 mm/40 mm. Permanentní magnet motoru má sedm pólových dvojic a rovněž není vhodný (ve porovnání s motory s homogenním vinutím) pro vysoké otáčky (otáčky naprázdno cca 14 000 min<sup>-1</sup>). 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.

Konstrukční 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/m<sup>3</sup>] při dobrých dynamických



Obr. 8 Řez plochým EC motorem s vnitřním rotorem, s vinutím na pólech

vlastnostech. Výhodou je také nižší cena motoru oproti motoru s homogenním vinutím srovnatelného výkonu. Při návrhu pohonu je však třeba počítat s existencí reaktančního 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

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

- letectví 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 efekторы

robotů, stroje na osazování plošných spojů, výroba CD-ROM, laserové značkovací, výměňky nástrojů, stroje pro laserové řezání a svařování,

- papírenská a tiskařská zařízení, textilní stroje, výroba umělých vláken, navíjecí technika, šicí stroje, řezačky a vysekačky 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.

Mikromotory s elektronickou komutací představují nedílnou součást rodiny mikromotorů malého napětí.

V příspěvku je stručně popsána konstrukce a jsou uvedeny základní uživatelské vlastnosti dvou základních variant mikromotorů s elektronickou komutací. Popis konstrukce těchto motorů je základním podkladem pro dokumentaci jejich podstatných 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 i DC motory se samonosným vinutím kotvy. 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 mechatronické aplikace. Rozdíl je samozřejmě v momentech setrvačnosti s vinutím na pólech statoru s vnějším a vnitřním rotorem.

Firma Maxon motor, 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 90 W v provedení plochém s vinutím na pólech statoru.

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

Tato práce vznikla za podpory projektu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy č. MSM 0021630518 „Simulační modelování mechatronických soustav.“ Autor dále děkuje firmě UZIMEX Praha, spol. s r. o., za poskytnutí bohatého obrazového materiálu.

Text: Doc. Ing. Vladislav Singule, CSC