

# Vlastnosti a použití mikromotorů

Vladislav Singule

Moderní elektrické mikropohony napájené bezpečným napětím jsou nedílnou součástí nejrůznějších mechatronických systémů. Pro jejich vývoj je charakteristické zdokonalování vlastností všech členů struktury, tj. motorů, převodovek, snímačů polohy nebo rychlosti otáčení rotoru i řídicí a výkonové elektroniky, a především jejich miniaturizace. Tato se týká zejména základního prvku elektromechanických akčních členů – elektrických mikromotorů malého napětí. Za výkonovou hranici mikropohonů je obvykle považován výkon 400 W.

## 1. Oblasti použití mikromotorů

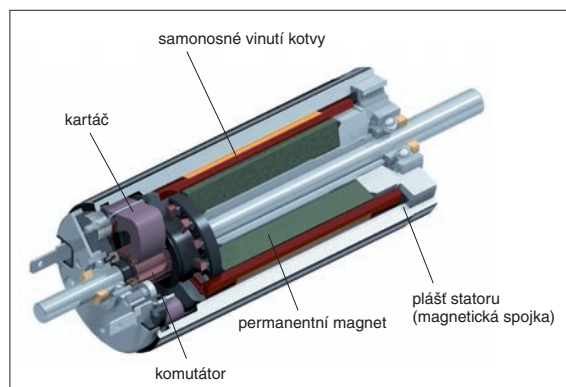
Škála úloh řešených s využitím mikromotorů malého napětí je v současné době velmi široká. K rozhodujícím oblastem jejich použití patří zejména:

- letectví a kosmonautika, tj. letecké přístroje, kamery, antény radarů, kosmické sondy,
- automobilová technika, např. zlepšení jízdního komfortu, přestavování polohy sedáček, reflektorů, zpětných zrcátek, blokovací prvky v automobilech,
- lékařská technika, tj. čerpadla krve, dentální zařízení, elektrokardiografie a elektroencefalografie, mamografy, ortopedická zařízení, dávkovače léků, umělé končetiny,
- přístrojová technika, např. vážicí zařízení, splétání vláken vláknové optiky, přístroje pro geotechnická měření, laserové nivelační přístroje, měřicí a záznamová zařízení, mikrometry, pohony ventilů, souřadnicové zapisovače, skenery, jednotky k nastavení polohy solárních kolektorů, fotospektrometry, profiloměry,
- průmyslová automatizace a robotika, zejména manipulátory a koncové efekторы robotů, stroje na osazování plošných spojů, výroba CD-ROM, laserové značkovače, výměníky nástrojů, stroje pro řezání a svařování laserovým paprskem,
- papírenská a tiskařská zařízení, textilní stroje, stroje na výrobu umělých vláken, navíječky, šicí stroje, rezačky a vysekačky materiálu,
- kancelářská, komunikační a zabezpečovací technika, tj. bankomaty, etiketovací stroje, frankovací stroje, rezačky papíru, stroje na počítání bankovek, psací stroje, zabezpečovací a kontrolní zařízení na letištích, v metru, obchodech a bankách, automaty na prodej jízdenek a drobného zboží,
- hobby technika, např. modely železnic, lodí, letadel, automobilů, hrací automaty, robotický fotbal.

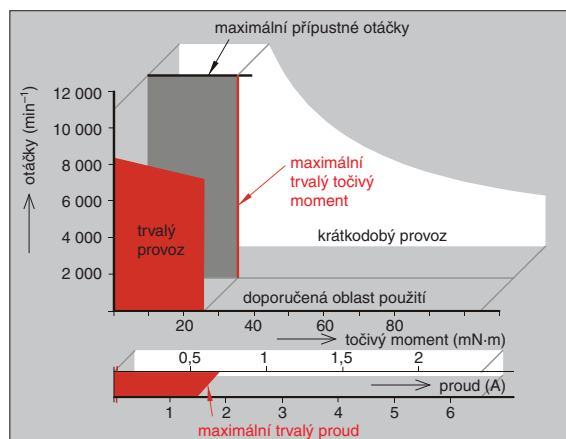
## 2. Jaké mikromotory lze použít?

Zásadní otázkou při výběru vhodného motoru je kromě mechanických požadavků úlohy, jakými jsou točivý moment, otáčky, přesnost řízení otáček či polohy a dynamika, také otázka napájení, včetně požadavku na bez-

pečně napájecí napětí. Ten pro uvedené oblasti použití zásadně diskvalifikuje asynchronní motory, protože jejich mechanické vlastnosti při napájení bezpečným napětím se i při velmi kvalitním řízení ani zdaleka nevyrovnávají mechanickým vlastnostem motorů založených na jiných principech, jejichž společnou vlastností je napájení celého akč-



Obr. 1. Řez motorem Maxon řady RE (zdroj: Maxon)



Obr. 2. Pracovní rozsah motoru DC řady Maxon RE (šedé pole značí celý pracovní rozsah, červené pracovní rozsah při napájení jmenovitým napětím a sklon jeho horní hrany pokles otáček při růstu zatížení; zdroj: Maxon)

ního členu, tj. motoru a výkonové elektroniky, bezpečným stejnosměrným napětím, obvykle do 60 V. Z těchto motorů se především používají komutátorové stejnosměrné motory DC, motory EC s elektronickou komutací a krokové motory.

## 3. Stejnosměrné motory DC

Mikromotory komutátorového typu (DC) mají výhradně cizí buzení, s velmi kvalitními permanentními magnety. Tím je eliminován vliv reakce kotvy na průběh rychlostní charakteristiky motoru, a točivý moment motoru je proto přímo úměrný proudu v celém rozsahu otáček.

Konvenční motory typu DC mají vinutí kotvy uloženo v drážkách paketu rotoru. Jsou proto někdy nazývány „motory s kotvou se železem“. Protože přibližně platí, že je-li součin proudu  $I$  a úhlové rychlosti rotoru  $\omega$  konstantní, má motor stejnou komutaci, nebývají jejich jmenovité otáčky větší než 3 000 min<sup>-1</sup>. Spolu se zhoršováním komutace rostou s otáčkami ztráty v železe, a tím i oteplení motoru. Navíc má kotva motoru velký moment setrvačnosti, a proto tyto motory nejsou vhodné pro úlohy s vysokými požadavky na dynamické vlastnosti pohonu.

Moderní konstrukcí mikromotorů DC pro přesné servopohony malých výkonů s velkou dynamikou je provedení rotoru jako samonosného vinutí kotvy umístěného ve vzduchové mezeře mezi vnějším a vnitřním státorem. Tyto motory jsou nazývány „motory s kotvou bez železa“. Jako příklad lze uvést motor firmy Maxon Motor AG (Maxon) řady RE (obr. 1). Protože v jejich magnetickém obvodu se nevyskytuje časově proměnné magnetické pole, a tudíž nevznikají ztráty v železe, jsou motory této koncepce schopny pracovat s otáčkami až 20 000 min<sup>-1</sup> a dosahují mimořádně velké účinnosti. Typický pracovní rozsah uvedeného typu motoru je ukázán na obr. 2. Z grafu je patrné, že motor lze zatěžovat maximálním trvalým momentem v celém rozsahu otáček, tedy do 12 000 min<sup>-1</sup>, a pokles otáček při tomto zatížení činí asi 10 %. Pro správné dimenzování motoru určeného k práci v dynamických provozních režimech je velmi důležité přesně definovat způsob, jakým bude motor přetěžován.

U náročných úloh je jedním ze zásadních parametrů tzv. hmotnostní měrný výkon motoru ve wattech na kilogram hmotnosti moto-

ru, nebo častěji jeho tzv. objemový měrný výkon ve wattech na krychlový centimetr objemu motoru. Ve druhém případě jde o parametr, který při daném požadovaném výkonu rozhoduje o rozměrech motoru, a tedy o potřebném zástavbovém prostoru. Motory se samonosným vinutím kotvy se vyznačují zvláště velkými hodnotami objemového měrného výkonu. Je tomu tak proto, že vinutí je umístěno na maximálním možném průměru, těsně pod pláštěm motoru. Při daných hodnotách magnetického toku a proudu v kotvě se tak dosahuje většího točivého momentu než u klasických koncepcí. Již zmíněné motory Maxon běžně dosahují hodnot větších než  $1,3 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-3}$ , což je o řád více než u krokových motorů srovnatelného výkonu. Druhým faktorem, který má vliv na měrné rozměry, jsou ztráty v motoru a jimi vyvolané oteplení motoru. Motory se samonosným vinutím kotvy tedy mají oproti klasickým koncepcím velmi malé ztráty, takže k odvodu tepla postačuje menší chladič povrch. Jsou-li malé ztráty, má motor velkou účinnost – od asi 80 % u motorů nejmenších rozměrů až po asi 90 % u motorů s většími průměry. Pro porovnání: srovnatelné asynchronní motory mají účinnost okolo 60 %.

#### 4. Stejnoseměrné motory EC

Princip činnosti stejnosměrného motoru je založen na působení síly na vodič, kterým protéká proud, a který je vložen do magnetického pole. Stejněho výsledku se dosáhne, když bude protékán proudem nepohyblivý vodič umístěný v poli otočného permanentního magnetu. Pro otočný pohyb magnetu je však nutné, aby nepohyblivé vinutí vytvářelo točivé magnetické pole, takže je třeba toto vinutí realizovat nejméně ve třech sekcích neboli fázích. Motory s třífázovým vinutím se vyrábějí pro zapojení jak do hvězdy, tak i do trojúhelníku. Z důvodu menších proudů, dovolujících použít vodiče menších průřezů vlastního vinutí i propojovacích vodičů, se dává přednost zapojení do hvězdy.

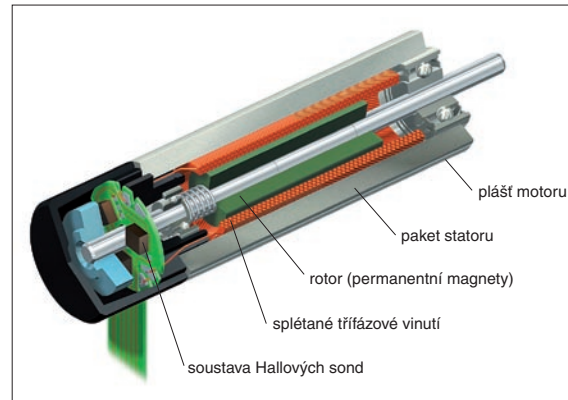
Mechanická komutace je u motorů EC nahrazena vhodnými elektronickými spínacími obvody. K zajištění správného napájení konkrétní sekce vinutí je ovšem nutné znát relativní polohu rotoru k poli statoru. Proto se u mikromotorů nejčastěji používají tři Hallovy sondy, rozmístěné po  $120^\circ$  obvodu statoru. Příklad konstrukčního uspořádání motoru EC je na obr. 3.

Zatímco u motoru DC se samonosným spletaným vinutím se rotor otáčí okolo stojícího permanentního magnetu vloženého do vnitřku vinutí a magnetický tok se uzavírá přes plášť, u motoru EC (s elektronickou komutací) je spletané vinutí součástí statoru a na rotoru jsou upevněny permanentní magnety.

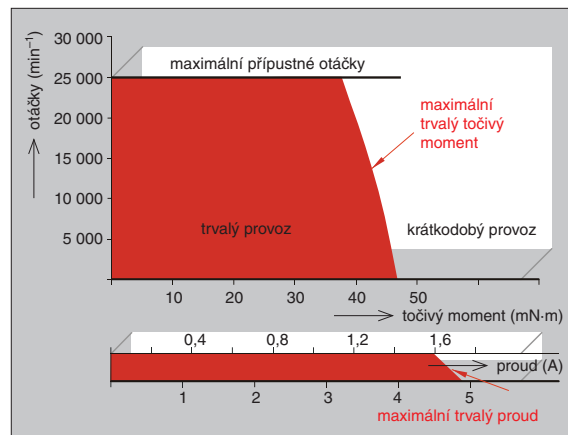
Předností motorů EC oproti všem motorům DC je možnost dosahovat větších otáček, řádově až desítek tisíc, přičemž trvalé maximální otáčky jsou omezeny spíše konstrukcí a životností ložisek. Naproti tomu však maxi-

mální trvalý točivý moment s růstem otáček klesá, a to proto, že magnetický tok ve statoru se cyklicky mění s otáčením permanentního magnetu na rotoru. Tento magnetický tok vyvolává ztráty v železe, které s rostoucími otáčkami také rostou.

Aby nebyla překročena přípustná teplota motoru, je nutné s rostoucími otáčkami zmen-



Obr. 3. Řez motorem EC od firmy Maxon (zdroj: Maxon)



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

šovat proud ve vinutí kotvy, a tím i trvalý zatěžovací moment. To se projeví poklesem výkonu motoru oproti srovnatelnému motoru DC. Pro zmenšení ztrát v železe je magnetický obvod statoru motorů EC tvořen paketem složeným z velmi tenkých plechů ve tvaru mezikružích.

Typický pracovní rozsah motoru typu EC je ukázán na obr. 4. Zde je třeba si uvědomit, že charakteristika motoru EC je asi o 30 % strmější než charakteristika ekvivalentního motoru DC. Hlavní příčinou je, že motor EC má mnohem menší využití vinutí (v daném okamžiku přispívají aktivně ke vzniku točivého momentu pouze dvě třetiny všech závitů vinutí kotvy).

Po stránce zástavbových rozměrů by se vzhledem k existenci ztrát v železe statoru mohlo vyvozovat, že situace bude horší než u srovnatelných motorů DC. Praxe však ukazuje, že u špičkové techniky tomu může být i naopak – např. jedna z verzí motorů řady

EC-powermax firmy Maxon má měrný výkon  $3,4 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Ztráty v železe statoru se však nevyhnutelně projevují poklesem účinnosti motoru, která je typicky jen o málo větší než 80 %.

Při porovnání dynamických vlastností již uvedených motorů DC „bez železa“ se srovnatelnými mikromotory EC je zřejmé, že rotor motoru EC má nutně větší moment setrvačnosti. Dynamické vlastnosti samotného motoru jsou tedy poněkud horší. Přesto se však dosahuje elektromechanických konstant v rozmezí 3 až 10 ms, což pro většinu úloh, i náročných, postačuje.

Obecně platí, že motory typu EC mají obvykle integrovanou elektroniku pohonu a spolu se samonosným vinutím kotvy nabízejí dlouhou dobu života, danou přednostmi elektronické komutace. Při použití v servopohonech jsou motory EC určeny pro zařízení s velkou dynamikou pohybů, dlouhou dobou provozního života a malými rozměry. Provedení s permanentními magnety na bázi vzácných zemin jsou vhodná pro velká zrychlení a elektronická komutace s Hallovými sondami zaručuje široký rozsah otáček a přesné nastavování polohy.

#### 5. Krokové motory

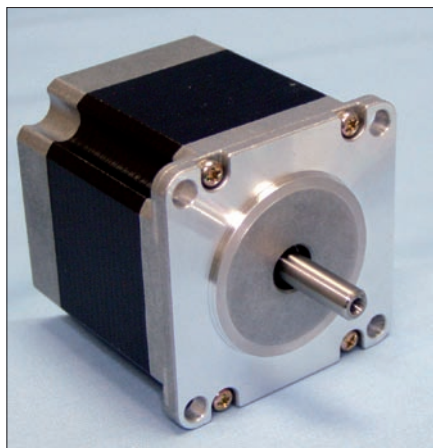
Krokový motor je v podstatě synchronní motor přeměňující vstupní digitální elektrický signál na odpovídající mechanický pohyb. Ve srovnání s jinými mikropohony stejné nebo podobné funkce má řídicí systém

krokového motoru několik výrazně odlišných vlastností:

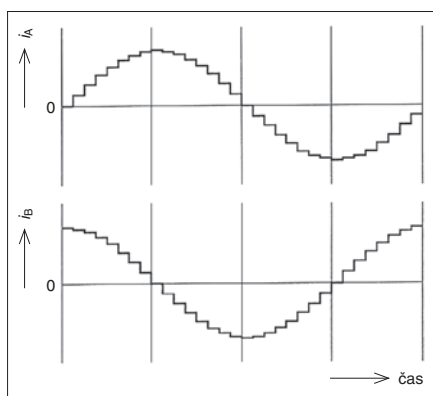
- pro běžnou činnost nastavování polohy nebo rychlosti otáčení rotoru není třeba používat zpětné vazby, motory typicky pracují v otevřené smyčce,
- chyba polohy nenarůstá s počtem kroků,
- krokové motory jsou kompatibilní s moderním digitálním řízením,
- krokové motory musí být vždy napájeny ze stejnosměrného zdroje přes elektronický řídicí obvod (ovladač),
- krokové motory v otevřené smyčce nemohou být tak rychlé jako motory DC nebo EC se zpětnou vazbou.

Otáčivá rychlost krokového motoru závisí na počtu kroků za sekundu a na velikosti kroku. Počet vykonaných kroků se obvykle shoduje s počtem pulzů, které vstoupily do řídicí logické jednotky. Otáčivá rychlost bývá proto definována jako frekvence pulzů (v hertzech). Na rozdíl od již popsanych

typů motorů krokové motory nemají definovanou absolutní hodnotu otáček (v otáčkách za minutu). Přesto lze konstatovat, že otáčky krokových motorů jsou maximálně stovky za minutu, a motory jsou proto určeny k nastavení polohy a pro malé otáčky.



Obr. 5. Hybridní krokový motor značky Pacific Scientific



Obr. 6. Průběh fázových proudů  $i_A$ ,  $i_B$  při mikrokrokování

Konstrukce reluktančních krokových motorů je založena na rozdílném počtu elektromagneticky buzených vyniklých pólů statoru a pasivních zubů rotoru. V krokových motorech s aktivním rotorem jsou póly rotoru tvořeny permanentními magnety. Kombinací obou variant rotoru vznikne hybridní motor (obr. 5). Společný princip činnosti všech krokových motorů je založen na přitahování daného pólu nebo několika pólů rotoru k buzené dvojici pólů statoru.

Každý řídicí impuls vyvolá pootočení rotoru motoru o jeden krok. Zmenšením velikosti kroku roste přesnost, s jakou rotor zaujímá svoji polohu. Je-li  $S$  počet kroků za jednu otáčku a  $\theta$  úhel kroku, platí

$$\theta = \frac{360}{S} \quad (1)$$

Hodnota  $S$  závisí na počtu zubů rotoru,  $N_r$  na počtu fází motoru  $m$ . Počtem fází se rozumí počet sekcí statoru, jejichž zuby jsou oproti ostatním pářům úhlově přesazené a jsou

magnetovány svými cívkami. Pro reluktanční motor, který neobsahuje permanentní magnet, lze psát

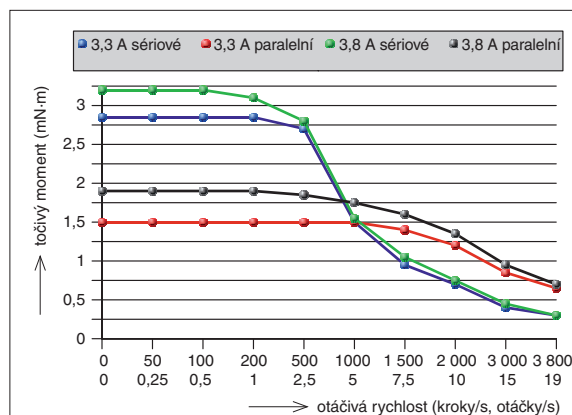
$$S = mN_r \quad (2)$$

Krokové motory s permanentními magnety a hybridní motory mají dvojnásobný počet kroků, protože se při vzniku magnetických sil uplatňuje i polarita zubů. V tomto případě platí

$$S = 2mN_r \quad (3)$$

Reluktanční motor má typicky tři, čtyři nebo pět fází. V mikropohonech se nejčastěji používá dvoufázový hybridní motor, ale lze se setkat i s třífázovými a pětifázovými krokovými motory. Počet zubů rotoru  $N_r$  bývá 50 nebo 100. Motor ve standardním dvoufázovém nebo čtyřfázovém provedení má obvykle 200 kroků na otáčku. Některé úlohy, u nichž je důležité velmi přesné nastavení polohy, mohou vyžadovat motory s 500 až 1 000 kroků na otáčku. Jednoduché motory mají obvykle úhel kroku  $7,5^\circ$ , popř.  $15^\circ$ .

Řídicí mikroprocesorová technika a pokročilá výkonová elektronika umožňují vytvořit menší úhel kroku, než je přirozený, daný roztečemi magnetických zubů a úhlovým přesazením zubů mezi fázemi. Základní kroky se přitom dělí na menší kroky, tzv. subkroky. Tato metoda je známá jako *microstep*, tj. mikrokrokování, nebo *ministep*, tj. mini-



Obr. 7. Pokles točivého momentu při zvyšování frekvence krokování u dvoufázového hybridního krokového motoru Pacific Scientific SX34 při různých způsobech napájení

krokování, a bývá často používána u hybridních krokových motorů. Jestliže bude hybridní motor napájen dvoufázově namísto proudem podle obr. 6, lze očekávat téměř plynulé, bezkrokové otáčení rotoru. Tato vlastnost je však podmíněna speciálním provedením motoru, včetně jeho ovládání. Je také nutné si uvědomit, že ne ve všech případech se docílí shora uvedených perfektních vlastností mikropohonu. U motoru se projevuje např. vliv proměnné reluktance a indukovaného napětí způsobovaného otáčením permanentního

magnetu. Dělení přirozeného kroku na osm subkroků je znázorněno na obr. 6.

Krokové motory jsou navrhovány tak, že generují velký statický moment, umožňující rychlý rozběh a zastavení (provoz *start-stop*). K eliminaci odchylek rotoru od klidové rovnovážné polohy způsobovaných zátěží motoru je potřebný velký vratný moment. Aby ho bylo možné dosáhnout, vzduchová mezera mezi zuby rotoru a statoru musí být co nejmenší.

## 6. Nedostatky krokových motorů

V porovnání se zkoumanými motory DC a EC mají krokové motory s hlediska použití v náročných úlohách více nedostatků než předností. Nejzávažnějšími nedostatky jsou:

- malá hodnota měrného výkonu: krokový motor má při srovnatelném výkonu podstatně větší rozměry a hmotnost,
- velký pokles točivého momentu při zvyšování frekvence krokování, tj. při růstu otáček (obr. 7),
- neznámá, a tudíž nekompensovatelná chyba polohy, způsobená zatěžovacím momentem, která se uplatňuje při práci v otevřené smyčce,
- horší dynamické vlastnosti: při přechodu rotoru z jedné rovnovážné polohy do druhé vznikají tlumené kmity,
- značná pravděpodobnost ztráty kroku při nepředpokládaných, ale v praxi se vyskytujících momentových přetíženiích.

Z uvedených důvodů lze použití krokových motorů v mikropohonech doporučit jen pro vybrané úlohy a při přesně specifikovaných provozních podmínkách.

## 7. Závěr

Popis konstrukce a způsobu řízení motorů je základem pro vysvětlení jejich základních uživatelských vlastností. Na základě porovnání vlastností stejnosměrných motorů a krokových motorů může čtenář sám rozhodnout, jaký pohon použít pro daný účel. Krokové motory často nestačí plnit zvýšené požadavky na dynamické chování pohonu v náročnějších úlohách. Řešením je jejich náhrada stejnosměrnými motory, jejichž řídicí jednotky jsou již schopny činnosti v módu *step*, a tedy je možné řídit polohu rotoru výstupními impulzy jednotky původně určené k ovládání krokových motorů.

doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.,  
ústav výrobních strojů, systémů a robotiky,  
Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně  
(singule@fme.vutbr.cz)