

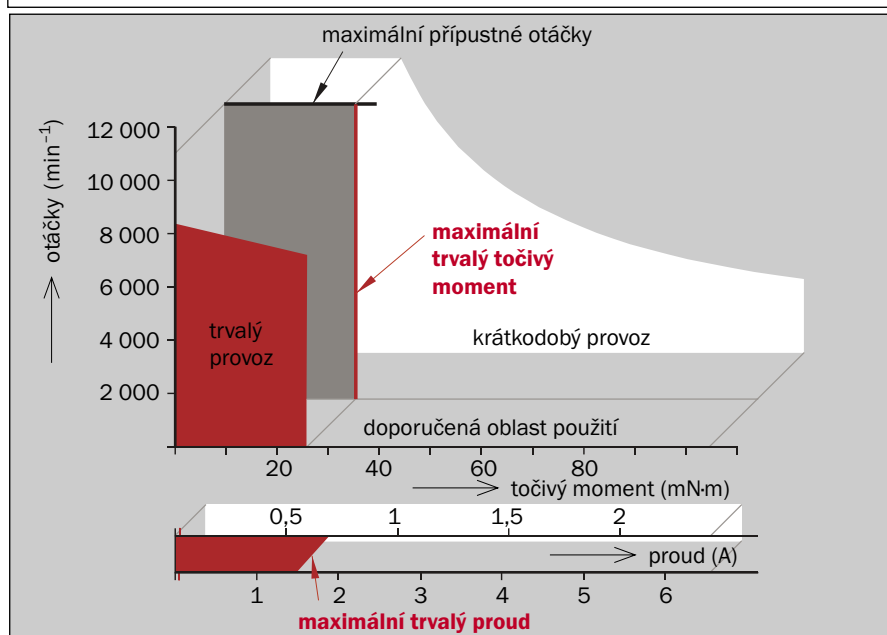
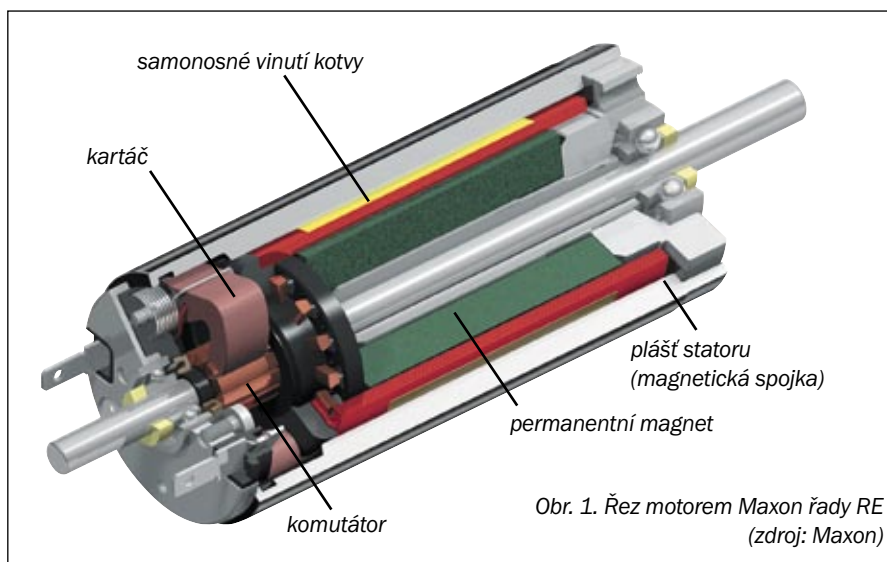
Mikromotory pro mechatronické aplikace

Elektrické mikropohony napájené bezpečným napětím jsou nedílnou součástí 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. Jedním z rozhodujících problémů je miniaturizace, tj. dosažení maximální měrné hmotnosti [W/kg] nebo maximálních měrných rozměrů [W/m³] elektromechanických akčních členů – elektrických mikromotorů. Za výkonovou hranici těchto motorů je obvykle považován výkon 400 W.

Aplikační oblasti

Rozsah aplikačních oblastí mikromotorů malého napětí je v současnosti velmi široká. 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 sedáček, 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. vážící 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 značkovače, výměníky 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.



Použitelné koncepce mikromotorů

Zásadní otázkou pro volbu typu motoru je (kromě mechanických požadavků dané aplikace, jakými jsou moment, otáčky, přesnost řízení otáček či polohy a dynamika) také otázka napájení včetně požadavku na bezpečné napětí. Tento požadavek zásadně diskvalifikuje asynchronní motory, protože jejich mechanické vlastnosti se při napájení bezpečným napětím ani při vysoce kvalitním řízení zdaleka nevyrovňají mechanickým vlastnostem motorů, založených na jiných principech, jejichž společnou vlastností je napájení celého akčního členu, tj. motoru a výkonové elektroniky, bezpečným stejnosměrným napětím, obvykle do 60 V. Z těchto motorů jsou především užívány komutátorové stejnosměrné motory (DC motory), a dále pak motory s elektronickou komutací (EC motory) a krokové motory, jejichž funkce je založena na principu činnosti synchronního motoru.

Vlastnosti stejnosměrných motorů DC

Tyto mikromotory mají výhradně cizí buzení, s vysoce kvalitními permanentními magnety. Tím je eliminován vliv reakce kotvy na průběh rychlostní charakteristiky motoru $n = f(M)$ a moment motoru je proto přímo úměrný proudu v celém rozsahu otáček.

Vinutí kotvy konvenčních DC motorů je uloženo v drážkách paketu rotoru, a proto jsou tyto motory někdy nazývány jako „motory s kotvou se železem“. Protože přibližně platí, že při součinu

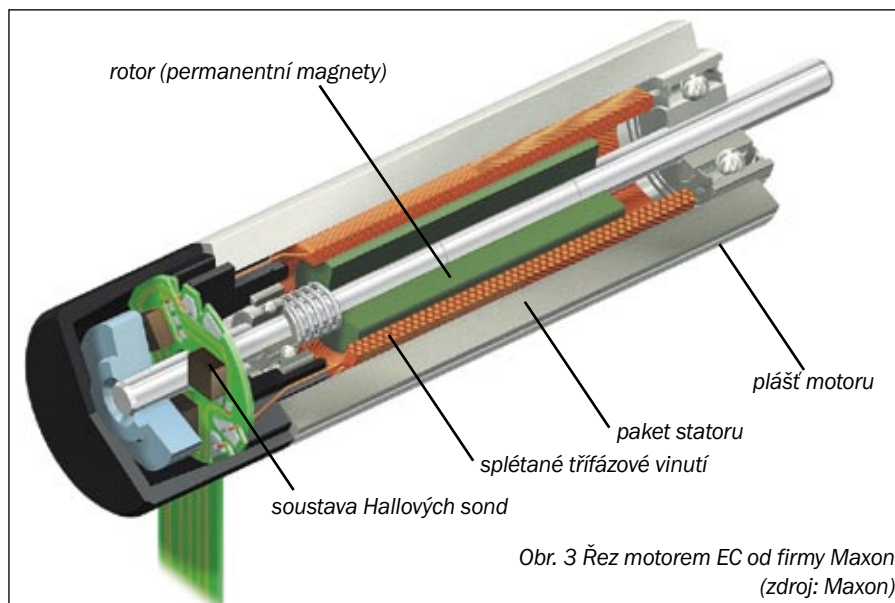
$$I \cdot \omega = \text{konst} \quad (1)$$

kde I je proud kotvy motoru,

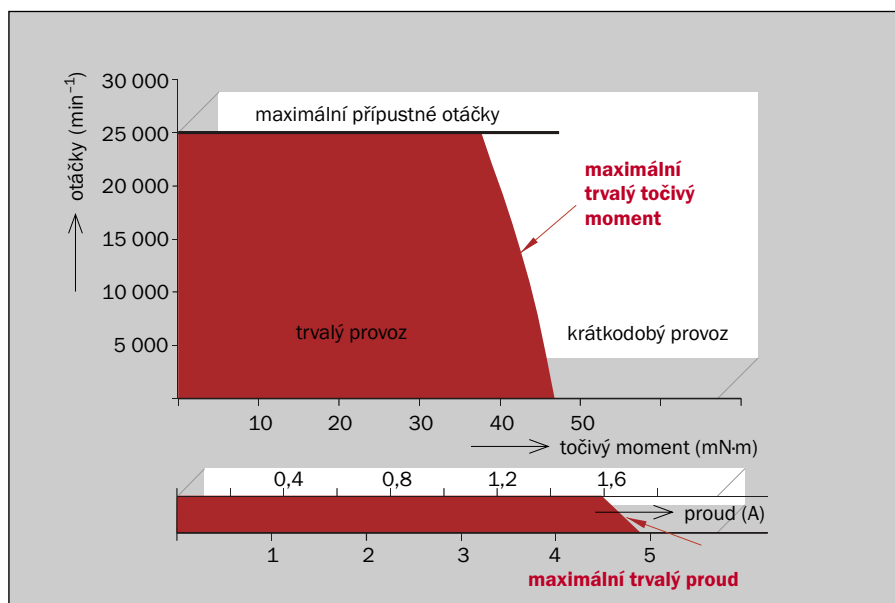
ω je úhlová rychlost motoru,

má motor stejnou komutaci, nebývají jejich jmenovité otáčky větší, než 3000 min^{-1} . Při vyšších otáčkách kromě špatné komutace také rostou ztráty v železe kotvy a tím stoupá i oteplení motoru. Navíc má rotor motoru velký moment setrvačnosti, a proto se tyto motory nehodí pro dynamicky náročné aplikace.

Mikromotory DC pro přesné dynamicky náročné servopohony malých výkonů se vyznačují zcela odlišnou konstrukcí rotoru. Ten je tvořen pouze samonosným vinutím kotvy, které je umístěno ve vzduchové mezeře mezi vnějším a vnitřním statorem. Tyto motory jsou nazývány jako „motory s kotvou bez železa“. Jako příklad lze uvést motor firmy Maxon řady RE, jehož řez je uveden na obr. 1. Motory s rotorem této koncepce jsou schopny pracovat s otáčkami až 20 000 min^{-1} , protože v jejich magnetickém obvodu se nevyskytuje časově proměnné magnetické pole, a tudíž nevznikají žádné ztráty v železe. Motory tohoto typu proto dosahují mimořádně vysoké účinnosti. Typický pracovní rozsah tohoto typu motoru je uveden na obr. 2. Zde vidíme, že motor lze zatěžovat maximálním trvalým momentem v celém rozsahu otáček, tedy do 12 000 min^{-1} , a pokles otáček při tomto momentu činí cca 10%. Pro práci v dynamických provozních re-



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



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

žimech je velmi důležité přesné definování oblasti přetěžování motoru.

Zásadní otázkou pro náročné aplikace je měrná hmotnost [W/kg], nebo častěji měrné rozměry [W/m^3]. Tento údaj je při požadovaném výkonu rozhodující pro rozměry motoru a tedy na potřebný zástavbový prostor. U motorů se samonosným vinutím kotvy je dosaženo vysokých hodnot měrných rozměrů umístěním tohoto vinutí na maximální možný průměr, těsně pod plášť motoru. Tím je při daných hodnotách magnetického toku a proudu kotvy dosaženo většího momentu, než u klasických koncepcí. Výše uvedené motory Maxon dosahují běžné hodnot více než 1,3 W/cm^3 , což o řád větší, než měrné rozměry 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 mají oproti klasickým koncepcím

velmi malé ztráty (nevznikají ztráty v železe), takže k odvodu tepla postačuje menší chladič povrch. Samozřejmě, jsou-li malé ztráty, motory má vysokou účinnost – cca 80% u motorů nejmenších rozměrů až po cca 90% u motorů větších průměrů. Pro porovnání – srovnatelné asynchronní motory mají účinnost kolem 60%.

Vlastnosti stejnosměrných motorů EC

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. Stejně výsledku, tedy vzniku točivého momentu, docílíme, když bude protékán proudem nepohyblivý vodič, který bude umístěn v poli otočného permanentního magnetu. Pro otočný pohyb magnetu je však nutné, aby ne-

pohyblivé vinutí vytvářelo točivé magnetické pole, takže je třeba toto vinutí realizovat nejméně ve třech sekcích neboli fázích. Motory s trojfázovým vinutím se vyrábí jak pro zapojení do hvězdy, tak i do trojúhelníka. Preferováno je zapojení do hvězdy, které dovoluje použití menších průřezů vodičů vlastního vinutí i propojovacích vodičů z důvodu menších proudů.

Mechanická komutace je zde nahrazena vhodnými elektronickými spínacími obvody. Pro zajištění správného napájení konkrétní sekce (fáze) vinutí je ale nutné znát relativní polohu rotoru vůči poli statoru. Za tím účelem se u mikromotorů nejčastěji používají tři Hallovy sondy, rozložené po 120 stupních na obvodu statoru. Příklad konstrukčního uspořádání motoru EC je uveden na obr. 3.

Zatímco u DC motoru se samonosným splétaným vinutím se rotor otáčí kolem stojícího permanentního magnetu vloženého do vnitřku vinutí a magnetický tok se uzavíral přes plášť, u EC motoru s elektronickou komutací je splétané vinutí uloženo na statoru a na rotoru jsou upevněny permanentní magnety.

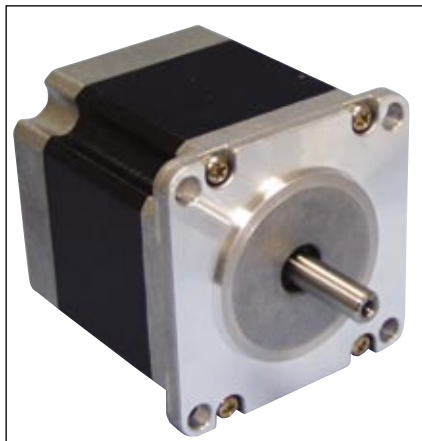
Výhodou motorů EC oproti všem motorům DC je dosažitelnost vyšších otáček, řádově desítek tisíc, a trvalé maximální otáčky jsou omezeny spíše konstrukcí a životností ložisek. Naproti tomu však maximální trvalý moment s otáčkami klesá. To je způsobeno tím, že magnetický tok ve statoru se cyklicky mění s otáčením permanentního magnetu na rotoru. Tento magnetický tok vyvolává ztráty v železe, které pochopitelně s rostoucími otáčkami také rostou.

Abyste nebyla překročena přípustná teplota motoru, je nutno s rostoucími otáčkami snižovat proud ve vinutí kotvy a tím i trvalý zatěžovací moment. To se projevuje i na snížení výkonu motoru oproti srovnatelnému DC motoru. Pro snížení ztrát v železe je magnetický obvod statoru tvořen paketem složeným z velmi tenkých plechů ve tvaru mezikružů.

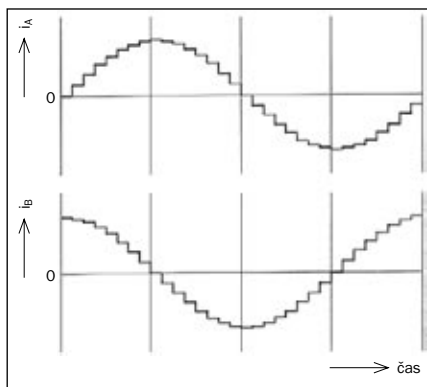
Typický pracovní rozsah tohoto typu motoru je uveden na obr. 4. Zde je třeba si uvědomit, že charakteristika EC motoru je přibližně o 30 procent strmější než u ekvivalentního motoru DC, což je hlavně dáno tím, že motor EC má mnohem nižší využití vinutí (v daném časovém okamžiku aktivně přispívají ke vzniku točivého momentu pouze 2/3 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 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/cm³. Ztráty v železe statoru se však nevyhnutelně projevují na nižší účinnosti, která typicky je jen o málo větší, než 80%.

Porovnáme-li dynamické vlastnosti výše uvedených motorů DC „bez železa“ se srovná-



Obr. 5 Hybridní krokový motor značky Pacific Scientific.



Obr. 6 Průběh fázových proudů, při mikrokrokování

telními mikromotory EC, 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.

Obecně platí, že tento typ motorů má obvykle integrovanou elektroniku pohonu a spolu se samonosným vinutím kotvy nabízí dlouhou životnost podmíněnou výhodami elektronické komutace. 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.

Vlastnosti krokových motorů

Krokový motor je v podstatě synchronní motor, přeměňující vstupní digitální elektrický signál na odpovídající výstupní mechanický pohyb. Ve srovnání s jinými mikropohony stejné nebo podobné funkce má řídicí systém krokového motoru několik výrazně odlišných vlastností:

- pro běžnou činnost polohování nebo otáčení rotoru není třeba používat zpětné vazby, motory typicky pracují v otevřené smyčce,
- chyba polohy s počtem kroků nenarůstá,

- krokové motory jsou kompatibilní s moderním digitálním zařízením,
- krokové motory musí být vždy napájeny ze stejnosměrného zdroje přes elektronický řídicí obvod (ovladač),
- odezva krokových motorů v otevřené smyčce nemůže být tak rychlá, jako u DC a EC motorů se zpětnou vazbou.

Otáčivá rychlost krokového motoru závisí na počtu kroků za sekundu a rozsahu krokování. Většinou je počet pulzů vstupujících do řídicí logiky totožný s počtem vykonaných kroků. Otáčivá rychlost bývá proto definována jako frekvence pulzů [Hz]. Na rozdíl od předchozích typů krokové motory nemají definovanou absolutní hodnotu otáček [min⁻¹]. Přesto lze konstatovat, že otáčky krokových motorů jsou maximálně stovky za minutu a motory jsou proto určeny pro polohování a nízké otáčky.

Princip činnosti reluktančních krokových motorů je založen na rozdílných počtech 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 motor hybridní. 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 polohování. Označíme-li počet kroků za jednu otáčku a úhel kroku, pak platí, že

$$\theta = \frac{360}{S} \quad (2)$$

Číslo je určeno počtem zubů rotoru a počtem fází motoru. Počtem fází se rozumí počet sekcí statoru, jejichž zuby jsou oproti ostatním párem úhlově přesazeny a jsou magnetovány svými cívkami. Pro reluktanční motor, který neobsahuje permanentní magnet, můžeme psát

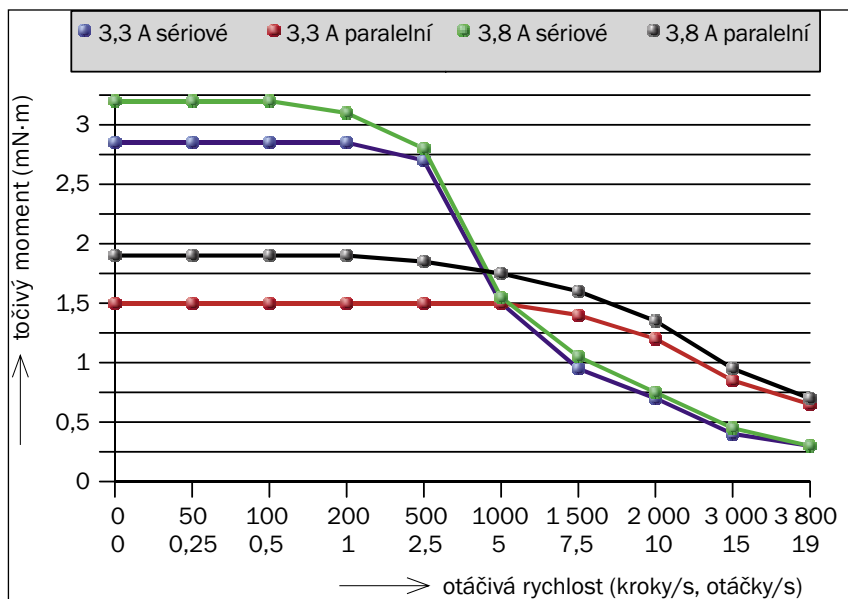
$$S = m \cdot N_r \quad (3)$$

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, že

$$S = 2 \cdot m \cdot N_r \quad (4)$$

Typický počet fází reluktančního motoru je 3, 4, a 5. V mikropohonech je nejčastěji aplikován hybridní motor 2 fázový, ale trojfázové a pětifázové krokové motory se používají také. Počet zubů rotoru bývá 50 nebo 100. Standardní dvoufázové nebo čtyřfázové provedení motoru má obvykle 200 kroků na otáčku. Některé velice přesné polohovací aplikace vyžadují motory s 500 až 1000 kroky na otáčku. Jednoduché motory mají obvykle úhel kroku 7,5° nebo 15°.

Řídicí mikroprocesorová technika a pokročilá výkonová elektronika umožňují vytvořit



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

menší úhel kroku, než je přirozený, daný roztečemi magnetických zubů a úhlovým přesazením zubů mezi fázemi. Základní kroky se při tom dělí na menší kroky. Tato metoda je známá jako microstep, tj. mikrokrokování nebo ministep, tj. minikrokování a bývá často používána u hybridních krokových motorů. Jestliže budeme hybridní motor napájet dvoufázově kvazisinusovým proudem podle obr. 6 (dělení přirozeného kroku na 8 subkroků) namísto proudu obdélníkového tvaru, můžeme očekávat plynulé, téměř bezkrokové, otáčení motoru. Tato vlastnost je však podmíněna speciálním provedením motoru včetně jeho ovládní. Je také nutné si uvědomit, že ne ve všech případech se docílí výše uvedených perfektních vlastností mikropohonu. U motoru se projevuje např. vliv proměnné reluktance a indukovaného napětí způsobovaného permanentním magnetem.

Krokové motory jsou navrhovány tak, že generují velký statický moment umožňující rychlý rozběh a zastavení (provoz start – stop). Velký vratný moment je potřebný k eliminaci odchylek rotoru od klidové, rovnovážné polohy, způsobovaných zátěžemi motoru. Aby toho bylo možno dosáhnout, vzduchová mezera mezi zuby rotoru a statoru musí být co nejmenší.

V porovnání s výše zkoumanými motory DC a EC mají krokové motory při použití v náročných aplikacích více nevýhod, než výhod. Nejzávažnějšími nedostatky jsou:

- malá hodnota měrných rozměrů. Motor má při srovnatelném výkonu podstatně větší rozměry a hmotnost,
- velký pokles momentu při zvyšování frekvence krokování, to je při zvyšování otáčivé rychlosti (obr. 7),
- neznámá a tudíž nekompensovatelná chyba polohy, způsobená zatěžovacím

momentem, která se uplatňuje při práci v otevřené smyčce,

- horší dynamické vlastnosti. Při přechodu z jedné rovnovážné polohy do druhé vznikají tlumené kmity,
- značná pravděpodobnost ztráty kroku při nepředpokládaných, ale v praxi se vyskytujících momentových přetíženiích. Proto lze použití krokových motorů v mikropohonech doporučit jen v přesně specifikovaných provozních podmínkách a vybraných aplikačních oblastech.

Závěr

V příspěvku jsou uvedeny základní užitelské vlastnosti tří základních typů mikromotorů, napájených bezpečným napětím. Popis konstrukce a způsobů řízení těchto motorů je 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 krokové motory obvykle nestačí plnit požadavky na dynamiku pohonu v náročnějších aplikacích. Tyto naopak velmi dobře splňují pohony se stejnosměrnými motory DC, případně EC, v provedení se samonosným vinutím kotvy. Navíc standardní řídicí jednotky těchto motorů již mohou pracovat v módu step, takže je možné řídit polohu rotoru stejně jako u krokových motorů, tedy posloupností impulsů z jednotky, původně určené k řízení krokových motorů.

Ing. Václav Brož

UZIMEX PRAHA, spol.s r. o.

Doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně.