

Jaký elektrický pohon do 400 W

V oblasti výkonů do 400 W se vyrábějí elektrické motory, které využívají několik různých principů vzniku síly a liší se i konstrukcí. V článku jsou porovnány jejich vlastností, které rozhodují o vhodnosti použití.

Základní používané typy motorů

Který pohon je optimální pro danou úlohu, vyplyne z porovnání jejich požadavků s parametry vyráběných pohonů různých principů, tvarů, skladby a napájení. Pohony v oblasti výkonů do 400 W jsou tvořeny motorem, někdy převodovkou, snímačem polohy nebo rychlostí otáčení rotoru pro zpětnou vazbu a řídicí jednotkou.

Nejčastěji se volí mezi motory indukčními asynchronními, krokovými a stejnosměrnými komutátorovými (DC) nebo s elektronickou komutací (EC). Synchronní motory opatřené snímači polohy a řízené elektronikou se řadí ke stejnosměrným motorům typu EC, protože také přepínají proud podle polohy rotoru a mají stejnou rychlostní charakteristiku. Principy vzniku hnacího momentu zásadně ovlivňují vlastnosti pohonů. Je proto vhodné úvodem připomenout principy využívané v uvedených nejpoužívanějších typech malých motorů.

Vinutí indukčních motorů vytváří ve statoru točivé magnetické pole, které ve vodičích rotoru indukuje proud. Na vodiče protékající proudem působí hnací síla. Vodiče rotoru jsou uloženy v drážkách železného jádra, které uzavírá magnetický obvod motoru s co nejmenší magnetickou mezerou.

Hnací síla krokového motoru vzniká přitahováním magnetických pólů rotoru k pólům na statoru. Stator má zpravidla dvě až čtyři sekce s póly fázově pootočenými. Sekce má své buďcí vinutí a po obvodu řadu pólů ve tvaru zubů. Jejich rozteče jsou stejné u statoru i u rotoru. Hustota pólů rozhoduje o počtu kroků na otáčku.

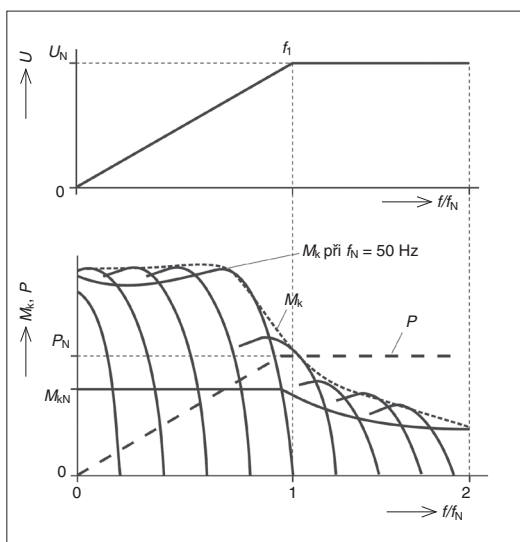
Hnací síla ve stejnosměrných motorech vzniká působením pole permanentního magnetu na vodiče vinutí protékající proudem. Mechanický komutátor s kartáči v motorech DC přepíná proud do těch vodičů, které jsou v optimální poloze k magnetickému toku. Proud do motorů EC přepíná elektronika.

Vhodnost pohonu pro danou úlohu lze posoudit podle následujících kritérií.

Rozsah nastavitelné rychlosti

Měníče frekvence umožňují měnit otáčky indukčních motorů v určitém omezeném rozsahu. Výsledný krouticí moment je při obvyk-

lém napájení konstantní od určitých minimálních otáček až do jmenovitých otáček, které se mohou blížit $3\,000\text{ min}^{-1}$. Nad jmenovitémi otáčkami krouticí moment klesá (obr. 1). Udržet jmenovitý moment i při větších otáčkách lze zvětšováním napájecího napětí. S rostoucími otáčkami se ale zvyšují ztráty v železe, které v asynchronním motoru zaujímá velký objem, a motor se přehřívá.



Obr. 1. Charakteristiky asynchronního motoru s měněním frekvence. Průběh závislosti krouticího momentu M_k a výkonu P na frekvenci napájecího napětí U . Nad jmenovitou frekvencí klesá. M_{kN} , P_N a U_N jsou jmenovité hodnoty.

Horní hranice otáček krokového motoru je omezena na několik set otáček za minutu (obr. 2). Je to způsobeno narůstáním ztrát v železném feromagnetickém obvodu s růstem frekvence napájecích pulzů. Frekvence s otáčkami rychle roste, protože je odvozena od počtu kroků na otáčku. Krokový motor je určen pro malé rychlosti otáčení. Při zátěži s pasivními odpory se při nejmenších otáčkách jeho rotor natáčí po skocích.

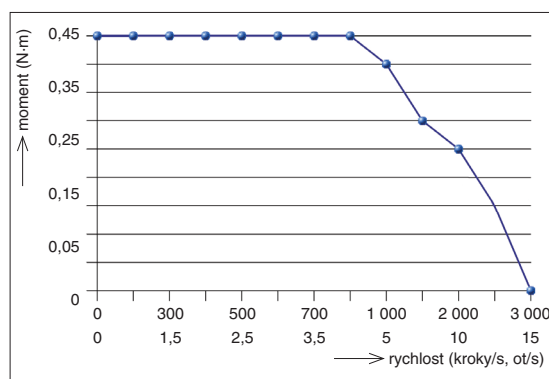
Krouticí moment komutátorového stejnosměrného motoru DC je přímo úměrný proudu v celém rozsahu otáčivé rychlosti, od nuly až do přípustných otáček. Odpovědní výrobci konvenčních motorů s železným jádrem nedoporučují otáčky větší než $3\,000\text{ min}^{-1}$. Objem železných částí magnetického obvodu s proměnným magnetickým polem způsobuje, že při vyšších otáčkách narůstají jis-

kření, ztráty v železe a teplota. Motory DC od firmy Maxon Motor AG pracují do $6\,000$ až $20\,000\text{ min}^{-1}$, protože neobsahují železné části s proměnným polem. Přípustné otáčky jsou u nich omezeny především obvodovou rychlostí komutátoru.

Jako příklad jsou na obr. 3 ukázány rychlostní a výkonová charakteristika motoru Maxon RE40. Krouticí moment tohoto komutátorového stejnosměrného motoru o výkonu 150 W je při konstantním proudu nezávislý na otáčkách až do přípustných $12\,000\text{ min}^{-1}$. Právý okraj červené oblasti je moment při přípustném trvalém proudu daném mezní teplotou vinutí. Účinnost motoru RE40 překračuje 90 % a pokles otáček v rozsahu trvale přípustného zatížení je při konstantním napájecím napětí pouze 10 %.

Předností motorů DC je, že jejich krouticí moment je při jakýchkoliv otáčkách i v klidu úměrný protékajícímu proudu.

Rozsah otáček válcových stejnosměrných motorů Maxon EC začíná rovněž na nule a sahá až po desítky tisíc otáček za minutu. Odpadá omezení rychlosti komutátorem. Uplatňuje se vliv doby života ložisek a pevnosti magnetu v rotoru. V motorech je použito homogenní trubkové vinutí bez pólů. Magnetický obvod s proměnným magne-



Obr. 2. Příklad momentové charakteristiky krokového motoru v rozsahu nastavitelných otáček: nad hranicí asi 5 s^{-1} (300 min^{-1}) moment rychle klesá (zdroj: Microcon/Pacific Scientific)

tickým polem tvoří tenkou vrstvu na povrchu motoru a je složen z velmi tenkých plechů. Vliv magnetických ztrát na rychlost je u těchto motorů zmenšen.

Na obr. 4 je ukázáno, jak klesá trvale přípustný krouticí moment motoru EC s rostou-

cími otáčkami, kdy narůstají ztráty v železe. Jde o bezkartáčový stejnosměrný motor Maxon EC-powermax 30 o výkonu 200 W, který může v trvalém provozu pracovat v červené oblasti až po 25 000 min⁻¹. Právý okraj červené oblasti představuje moment při přípustném trvalém proudu. Moment je při konstantním proudu nezávislý na otáčkách až do přípustných 25 000 min⁻¹. Přípustný proud i moment klesají s rostoucími otáčkami tak, aby nebyla překročena mezní teplota vinutí při narůstajících ztrátách v železe magnetického obvodu.

Požadavky na prostor

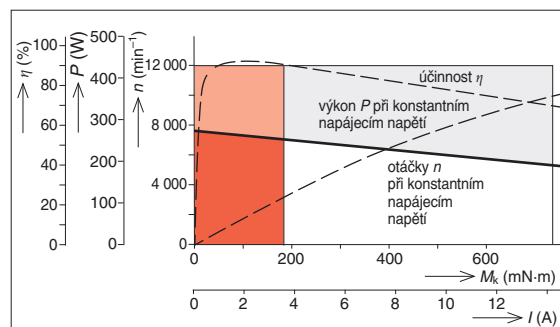
Požadavky motorů na zástavbový prostor jsou v dalším textu porovnány s požadavky stejnosměrných motorů značky Maxon, které jsou v tomto ohledu na nejvyšší úrovni. Prostorová náročnost se často vyjadřuje hustotou výkonu nebo momentu na jednotku hmotnosti nebo jednotku objemu motoru. Velká hustota výkonu je i jeden z parametrů, který rozhoduje o použití motorů Maxon DC v kosmických zařízeních a v mobilních robotech. Hustota momentu je ovlivněna principem vzniku mechanického momentu a mechanickou konstrukcí motoru. Na hustotu výkonu má vliv i rychloběžnost motoru.

Indukční motory i krokové motory jsou velmi objemné i hmotné. Vnější vrstva motorů je zaplněna magnetickým obvodem a vinutím statoru. Vodiče indukčních motorů, ve kterých působí hnací síla, jsou na malém poloměru, a síla tudíž vyvolává malý krouticí moment. Zuby krokových motorů se také nacházejí na malém poloměru. Hnací silou je u nich navíc jenom obvodová složka magnetické síly mezi zuby, která vznikne až zpožděním rotoru za požadovanou polohou a v synchronní poloze je nulová. Například krokový motor Pacific Scientific SL23 s rozměry 56 × 56 mm a délkou 76 mm dodá nejvýše 0,9 Nm při 300 min⁻¹, tj. 27 W. Hustota výkonu je tedy 0,11 W/cm³.

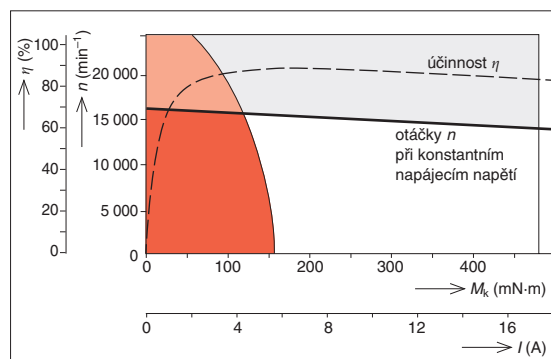
Konvenční stejnosměrné motory DC, tj. komutátorové, s permanentními magnety ve statoru, mají také vinutí rotoru na malém poloměru pod vnějšími magnety. Prostor uvnitř vinutí je vyplněn železným jádrem. Naproti tomu firma Maxon umísťuje magnet do dutiny ve vinutí a na povrchu motoru je tenký železný plášť. Samonosné vinutí se tedy nachází na největším možném poloměru těsně pod vnějším pláštěm motoru (obr. 5).

V motorech s velkým objemem magneticky měkkého železa vznikají značné ztráty hysterezi a vířivými proudy při přemagnetování. Trvale přípustné krouticí momenty jsou omezeny oteplením motoru. K dosažení daného momentu je třeba použít velký motor s velkým chladičím povrchem.

Hustota výkonu takových motorů je malá i vinou malých využitelných otáček, protože ztráty v železe a jiskření u motorů DC rostou s otáčkami. Někteří výrobci prodávají komutátorové motory s velkými otáčkami, hodně přes 3 000 min⁻¹; motory se ale značně zahřívají a jejich komutátory mají velmi krátkou



Obr. 3. Rychlostní charakteristika komutátorového motoru Maxon RE40. Oblast trvalého provozu je znázorněna červeně (I – proud, M_k – krouticí moment)



Obr. 4. Rychlostní charakteristika motoru s elektronickou komutací Maxon EC-powermax 30. Oblast trvalého provozu je znázorněna červeně (I – proud, M_k – krouticí moment)

dobu života. Velké dosažitelné trvalé otáčky motorů Maxon DC jsou důsledkem odstraněného železného jádra rotoru a malého opotřebení komutátoru.

Vysokou hustotu výkonu 1,32 W/cm³ má např. motor DC Maxon RE40 s průměrem 40 mm a délkou 71 mm, s otáčkami do 12 000 min⁻¹. Při 9 000 min⁻¹ má výkon 150 W.

Mezi uvažovanými motory se vůbec nejvyšší hustotou výkonu 3,4 W/cm³ vyznačuje 200W motor Maxon EC-powermax 30 s průměrem 30 mm, délkou 64 mm a s otáčkami do 25 000 min⁻¹. Výkon 200 W je na jeho výstupu při 20 000 min⁻¹.

Stejnoseměrné motory Maxon se pro úlohy vyžadující malé otáčky doplňují planetovými převodovkami se vstupními otáčkami většinou do 8 000 min⁻¹.

Jednoduchost nastavení otáček

Je-li třeba nastavit a udržovat otáčky motoru při jeho nepříliš proměnném zatížení, stejnosměrný motor DC jako jediný z uvedených motorů nepotřebuje elektronickou řídicí jednotku. Jeho otáčky bez zatížení jsou při-

mo úměrně napájecímu napětí a narůstajícím zatížením se zmenšují s konstantním gradientem (obr. 6). Lze použít napětí nižší i vyšší než jmenovité, pokud motor nepřekročí mezní dovolené otáčky.

Důležité v této souvislosti je, že mezi motory DC značky Maxon s magnety ze vzácných zemin lze vybrat motory s povoleným úbytkem otáček o pouhých 10 % v celém rozsahu trvale přípustných krouticích momentů (obr. 3).

Přesnost řízení polohy

Pro řízení polohy se v oblasti malých pohonů používají převážně stejnosměrné motory a krokové motory. V každém případě je nutná řídicí jednotka pro zastavování rotoru v různých polohách.

Stejnoseměrný motor musí mít inkrementální snímač pro zpětnou vazbu. Řídicí jednotka Maxon řady EPOS zastaví motor s přesností jedné čtvrtiny dílku snímače. Snímače Maxon pro malé motory od průměru 10 mm mají do 256 dílků na otáčku, pro větší motory až 1 024 dílků. Pasivní tření v poháněné soustavě negativně ovlivňuje stabilitu regulace a znesnadňuje nastavování regulátoru tak, aby se dosáhlo jmenového zastavení. Motor nicméně vyvíjí značný moment k dojetí do požadované polohy i při nejmenší regulační odchylce.

Krokový motor se standardně používá bez zpětné vazby. Řídicí jednotka ukončí najetí do polohy nabušením příslušných cívek. Motor se soustavou bez tření okolo cílové polohy zakmitá. Motor se soustavou s třením se zastaví s chybou závislou na velikosti tření, protože síla na dojetí do polohy klesá se zmenšováním odchylky až na nulu. Chyba polohy může přesáhnout velikost kroku. Při kolísání pasivního odporu při pohybu kolísá i velikost úhlového zpoždění skutečné polohy za teoretickou. Zvýšené mechanické odpory v průběhu pohybu mohou způsobit ztrátu několika kroků, o níž není žádná informace.

Krokový motor se standardně používá bez zpětné vazby. Řídicí jednotka ukončí najetí do polohy nabušením příslušných cívek. Motor se soustavou bez tření okolo cílové polohy zakmitá. Motor se soustavou s třením se zastaví s chybou závislou na velikosti tření, protože síla na dojetí do polohy klesá se zmenšováním odchylky až na nulu. Chyba polohy může přesáhnout velikost kroku. Při kolísání pasivního odporu při pohybu kolísá i velikost úhlového zpoždění skutečné polohy za teoretickou. Zvýšené mechanické odpory v průběhu pohybu mohou způsobit ztrátu několika kroků, o níž není žádná informace.

lo cílové polohy zakmitá. Motor se soustavou s třením se zastaví s chybou závislou na velikosti tření, protože síla na dojetí do polohy klesá se zmenšováním odchylky až na nulu. Chyba polohy může přesáhnout velikost kroku. Při kolísání pasivního odporu při pohybu kolísá i velikost úhlového zpoždění skutečné polohy za teoretickou. Zvýšené mechanické odpory v průběhu pohybu mohou způsobit ztrátu několika kroků, o níž není žádná informace.

Požadavky na energii

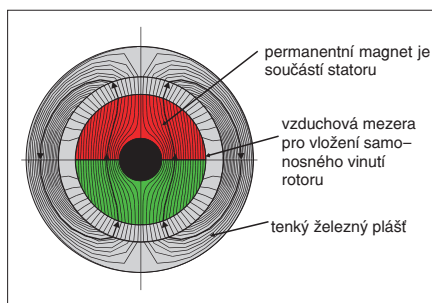
Spotřeba energie u malých pohonů nabývá na významu zejména u zařízení napájených z baterií. Komutátorové motory DC značky Maxon jsou jednoznačně nejméně výhodnější.

Účinnost malých motorů RE16 s největším průměrem 16 mm je 80 %. Větší motory RE40 s výkonem 150 W a průměrem 40 mm mají účinnost dokonce 92 %, což je přímo předurčuje k napájení z baterií.

Motory s elektronickou komutací pracují v důsledku ztrát v železe s účinností menší o 10 %. Účinnost motoru EC-max 40 s výkonem 120 W a průměrem 40 mm je 82 %.

U pomaluběžných úloh se k motoru přidává převodovka. Oblíbené planetové převodovky pracují s účinností od 45 % při pěti stupních až po 85 % u jednostupňových. Účinnost převodovek s předlohou je o 5 až 10 % větší. Největší ztráty mají šnekové převodovky, a to vinou velké rychlosti pohybu šneku v ozubení šnekového kola.

Účinnosti malých indukčních motorů jsou o 20 až 30 procentních bodů nižší než účinnosti velkých asynchronních motorů. Účinnost typického asynchronního jednofázového motoru značky Papst řady KLZ s průměrem 85 mm a výkonem 140 W s deklarovanou velkou účinností je 61 %.



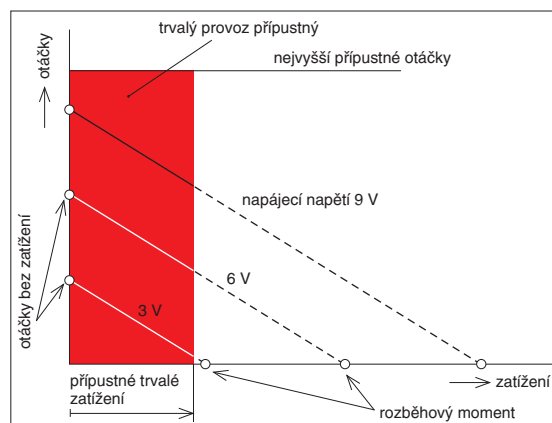
Obr. 5. Řez prostorově úspornou konstrukcí magnetického obvodu motorů DC značky Maxon: dutina v samonosném vinutí rotoru je využita pro statorový permanentní magnet

Vhodnost stejnosměrných motorů DC pro úlohy vyžadující napájení z baterií je podporována i jejich schopností využívat jednoduchý stejnosměrný proud.

Dynamické vlastnosti

Často je třeba rozběhnout motor a poháněnou soustavu za krátkou dobu s velkým zrychlením. Požadavek nejlépe splní motor s velkým rozběhovým momentem a malým momentem setrvačnosti.

Rozběhové momenty malých indukčních motorů jsou zpravidla nanejvýš dvojnásobkem jmenovitých momentů. Moment setrvačnosti rotoru plného železných plechů je značná. Dynamické rozběhy tedy nelze očekávat.



Obr. 6. Rychlostní charakteristiky stejnosměrného motoru DC značky Maxon pro různá napájecí napětí

Krokové motory s těžkými rotory při rychlém rozběhu ztrácejí synchronizaci a krok. Špatná dynamika motorů vede k řídicím jednotkám s pozvolnými rozběhovými rampami.

Rozběhové momenty stejnosměrných motorů DC jsou i bez řídicích jednotek velké. Železné jádro v rotoru konvenčního motoru DC zhoršuje dynamiku rozběhu svou setrvačností. Velmi krátký rozběh a rychlé reakce nabízejí motory Maxon DC s lehkým rotorem bez železa se samonosným vinutím. Vinutí bez železa s malou indukčností umožňuje i rychlý náběh proudu. Výsledkem je mechanická časová konstanta rozběhu 4 až 10 ms, během které se motor rozběhne na 63 % ustálené rychlosti, a to při napájení konstantním napětím.

Velmi dynamické chování mají i válcové motory Maxon EC. Díky permanentním magnetům ze slitiny NdFeB v rotoru a homogen-

nímu vinutí jsou jejich mechanické časové konstanty od 3 do 10 ms.

Novinky firmy Uzimex na MSV 2007, stánek V 110

Zajímavé jsou převodovky Maxon s pohybovým šroubem a silným axiálním ložiskem. Další motory EC se vyrábějí s integrovanou elektronikou. Programovatelné řídicí jednotky polohy EPOS P jsou součástí kompaktních pohonů MCD. Dodávají se mnohopólové motory EC s vnitřním rotorem. Vysokorychlostní motory EC se používají k pohonu vřeten obráběcích strojů. Firma Uzimex Praha, která má značné zkušenosti se spoluprací s konstruktéry zákazníků na účelném začleňování různých komponent do strojů a zařízení, jistě nabídne inspiraci při řešení nových způsobů využití automatizační techniky.

Další komponenty od firmy Uzimex

Na pohony značky Maxon často navazují řemenové převody malými synchronizačními řemeny, řemenice z výroby Uzimex, pružné spojky a lineární vedení s lineárními řemeny. Firma Uzimex Praha nabízí uvedené komponenty i pro úlohy s velkými silami a výkony. Pro manipulaci s výrobky v sériové výrobě doporučuje a dodává vačkové manipulátory a stoly a pro měření geometrie a kalibraci přesných strojů laserové přístroje.

Ing. Václav Brož,
Uzimex Praha spol. s r. o.