

Motory maxon

- motory vhodné pro vysoké teploty

Dosavadní zkušenosti s používáním motorů maxon v kosmických robotech, které se pracují v extrémních podmínkách, ukazují, že tyto motory mohou dlouhodobě pracovat za vysokých i nízkých teplot, v atmosféře s nestandardním složením a tlakem i v dalších nestandardních prostředích (vibrace a rázy, radiace, požadavky na sterilitu, atd.). Tyto podmínky se však mnohdy vyskytují i v pozemních aplikacích, kde je nečastějším případem požadavek na vysoké pracovní teploty, obvykle daný vysokou pracovní teplotou okolního prostředí.

Teplota okolí podstatně ovlivňuje vlastnosti komponent motorů, převodovek, snímačů a elektroniky. K posouzení vhodnosti motoru pro dané podmínky nestačí znát jenom teplotu okolí, která bývá (stejně jako u převodovek) cca 100 °C, ale i zatížení a otáčky motoru. Přípustné teploty snímačů a elektroniky jsou zpravidla nižší (70 – 100 °C pro snímače, 45 °C pro elektroniku). Jejich integrace do motoru tedy značně snižuje odolnost motoru vůči zvýšené teplotě.

Hlavním zdrojem tepla, který zahřívá každý motor, jsou ztráty na činných odporech vinutí

$$P_{Cu} = I^2 \cdot R [W], \quad (1)$$

kde

I je střední hodnota proudu,

R je odpor vinutí.

Ztráty v magnetickém obvodu (vířivými proudy a hysterézni ztráty) vznikají pouze v motorech, v jejichž magnetickém obvodu se existuje časově proměnné magnetické pole. Jsou to tedy klasické komutátorové motory, ale i motory s elektronickou komutací (EC motory maxon). S otáčkami motoru roste frekvence změny magnetického pole a ztrá-

ty v magnetickém obvodu úměrně s frekvencí.

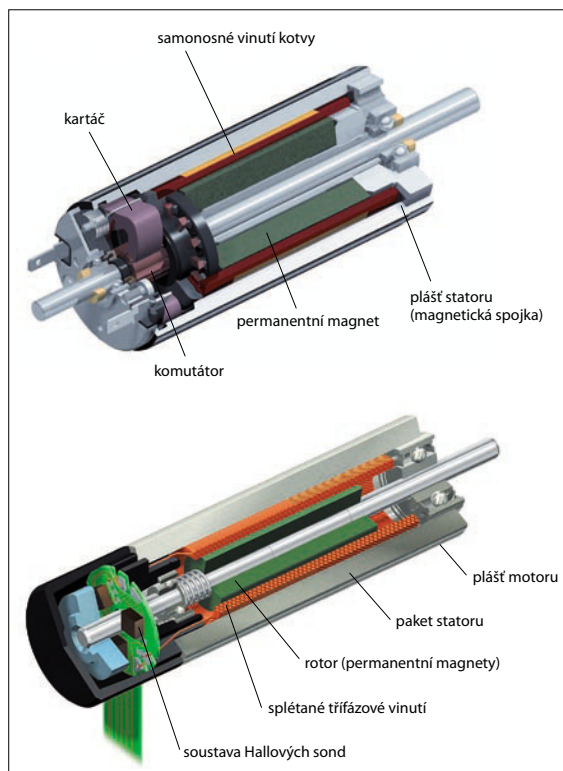
Naproti tomu v železe magnetického obvodu DC komutátorových motorů maxon ztráty nevznikají, neboť rotor je tvořen pouze samonosným měděným vinutím kotvy (kotva je bez železa) a tudíž magnetické pole je v magnetickém obvodu motoru časově neproměnné. To ve svém důsledku znamená, že z motoru je nutné odvádět méně tepla, a tudíž motor bude lépe odolávat vyšším teplotám okolí.

Teplota vinutí

U elektromotorů je standardizováno rozřazení teplotní odolnosti izolace vodičů vinutí do tříd a označování těchto tříd písmeny. Přípustné teploty vinutí T_{max} jsou pro jednotlivé motory maxon uvedeny v aktuálním katalogu. V nabídce jsou uvedeny tři typy motorů, a to s T_{max} 85 °C, 125 °C a 155 °C, které se liší bandážováním vinutí a tepelným odporem izolace vinutí. Nadměrná teplota způsobí mezizávítové zkraty ve vinutí a průrazy na paket statoru u motorů EC a na paket rotoru u konvenčních motorů DC. V samonosném vinutí maxon v motorech DC se nemohou vyskytnout zkraty na jádro, ale teplota ovlivňuje pevnost pryskyřice, kterou jsou vodiče slepeny do tvaru trubky. Prakticky stejnou teplotu jako vinutí má i disk z plastické hmoty, kterým je jedno čelo vinutí upevněno na hřídel.

Odvádění tepla v motorech DC

Zmenšení tvarové stálosti samonosného vinutí maxon nadměrnou teplotou má za následek jeho trvalou deformaci elektro-



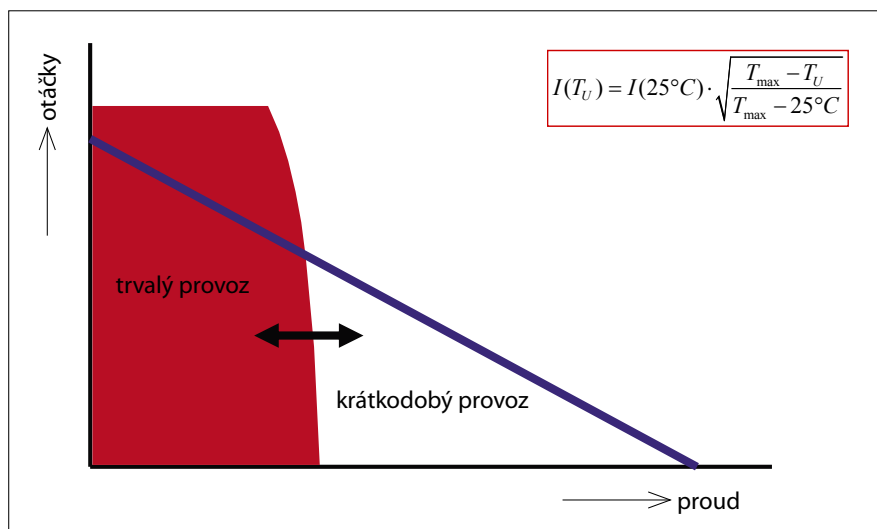
Komutátorový motor DC Maxon (nahore) a motor s elektronickou komutací EC Maxon (dole)

magnetickými silami, které vytvářejí hnací moment rotoru. V konečném důsledku se zdeformované vinutí zablokuje ve vzduchové mezeře a rotor se přestane otáčet.

Důležitým faktem však je, že DC motory maxon mají díky své koncepci vysokou účinnost, která je až 92 %. Růst teploty je proto při určitém výkonu na hřídeli mnohem nižší, než oteplení konvenčních komutátorových motorů. Navíc vysoká účinnost je zachována i při vysokých otáčkách. To znamená, že je nutno odvést malé množství tepla a důsledkem je menší zvýšení teploty vinutí nad teplotu okolí.

Další údaje v katalogu, označené jako tepelná data (Thermal data, Thermische Daten), umožňují vypočítat teplotu vinutí při známém průběhu proudu a známé teplotě okolí T_U . Pro časově ustálené zatížení se použijí hodnoty tepelného odporu z vinutí na pouzdro motoru R_{th1} a tepelného odporu z pouzdra do okolního vzduchu R_{th2} . Druhý údaj (R_{th2}) předpokládá, že se pouzdro neochlazuje vedením tepla do rámu stroje. Proud do motoru se určí z požadovaného točivého momentu a momentové konstanty k_M , která je v katalogu uvedena v mNm/A.

Pro výpočet maximálního přípustného trvalého proudu motoru $I(T_U)$ pro da-



Obr. 1: Stanovení maximálního přípustného trvalého proudu motoru pro danou teplotu okolí

nou teplotu okolí T_U , je možné použít rychlostní charakteristiku daného motoru (viz obr. 1), která je v katalogu uvedena pro teplotu okolí 25 °C a standardní ostatní podmínky, a danou maximální teplotu motoru T_{\max} . Vztah pro výpočet proudu $I(T_U)$ je uveden v obrázku 1.

Pro posouzení vlivu proudu s časově proměnným průběhem je užitečný údaj katalogu o teplotní časové konstantě vinutí τ_w a teplotní časové konstantě celého motoru τ_s . Teplotní časová konstanta vinutí je několik sekund až desítek sekund, časová konstanta motoru několik set sekund až 2 000 sekund. Po době trvání zatížení v délce časové konstanty se teplota změní o 63 % nárůstu teploty do ustáleného stavu.

Teplota P_{Cu} , které vzniká ve vinutí DC motoru, se jednoduše určí podle vztahu (1), přičemž odpor R se najde v katalogu. Oteplení vinutí ΔT_w a oteplení pouzdra motoru ΔT_s určíme násobením vzniklého tepla příslušným tepelným odporem, tedy

$$\Delta T_w = P_{Cu} \cdot R_{th1} [^{\circ}K], \quad (2)$$

$$\Delta T_s = P_{Cu} \cdot R_{th2} [^{\circ}K]. \quad (3)$$

DC motory, pokud nejsou výrazně ochlazované kovovým stykem s rámem stroje, mají teplotní spád mezi pouzdem a okolním vzduchem dva až pětinašobný oproti spádu mezi vinutím a pouzdem.

Odvádění tepla v motorech EC

U motorů EC je vinutí uloženo na statoru, dobře se stator chladí a poměr $\Delta T_s / \Delta T_w$ je až deset. Odvádění tepla rámem zvýší přestup tepla z pouzdra motoru až o 80 % a poměr spádů se zmenší. Je patrné, že teplota pouzdra motoru je bližší teplotě vinutí, než teplotě okolí.

Dalším zdrojem tepla EC motorů, jsou ztráty v železe, tj. ztráty vířivými proudy a hysterezní ztráty. Jejich určení je

obtížnější, protože jejich hodnota závisí na hmotnosti aktivních částí magnetického obvodu, činném odporu materiálu paketu, ploše hysterezní smyčky materiálu magnetického obvodu a frekvenci změny magnetického pole. Obecně lze říci, že se uplatňují zejména při vysokých rychlostech otáčení a orientační posouzení umožní tvar pravého okraje plochy přípustného zatížení a rychlosti v diagramu s osami rychlosti a zatížení v katalogu motorů. Přípustný trvalý moment se podle při nejvyšší přípustné rychlosti snižuje na 30 – 85 % momentu při nulové rychlosti. Záleží přitom na rozměrech motoru a na přípustné rychlosti, která je v rozmezí od 15 000 min⁻¹ do 100 000 min⁻¹.

Nejpádňším důkazem zkušenosti s provozem v extrémních podmínkách je jejich použití v robotech vyslaných na Mars.

Vliv rychlosti otáčení na vznik tepla a chlazení diskových EC motorů je opačný, protože vnější rotor působí jako chladicí ventilátor. Odvod tepla se s rychlostí otáčení zlepšuje více, než je růst ztrát. Motory je proto možné při vyšších rychlostech zatížit více, než při pomalém chodu.

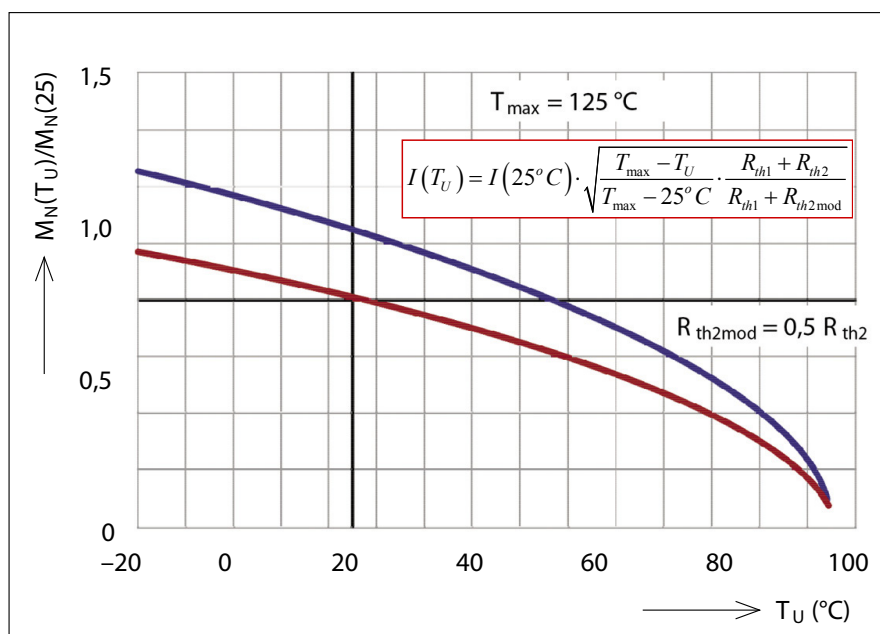
Vliv teploty na točivý moment

Měrný odpor mědi s teplotou roste o 0.392 % na °C, což znamená, že vinutí má při 75 °C o 20 % vyšší odpor R než při 25 °C. Pro dosažení stejného momentu je proto nutno zvýšit napětí. Při nulové rychlosti je vliv odporu R na rozběhový moment lineární, ale se zvyšující se rychlostí otáčení se vliv úbytku na činném odporu vinutí zmenšuje vzhledem k indukovanému napětí.

Teplota rovněž ovlivňuje tvar hysterezní smyčky materiálu permanentního magnetu, protože pohyby atomů permanentního magnetu se s rostoucí teplotou zintenzivňují. Tím dochází k narušování orientovaného uspořádání magnetických domén, které bylo dosaženo magnetováním. Pro kvalitu permanentního magnetu je důležitý tvar jeho demagnetizační křivky a především její dva body, remanence B_r a koercitivita H_c . Růstem teploty se snižuje

remanence magnetu a v důsledku toho klesá i magnetická indukce B_δ ve vzduchové mezeře. Stejný proud ve vinutí

proto vytvoří menší moment. Koercitivita se sice zvyšuje a magnet je odolnější vůči odsmagnetování působením reakce kotvy nebo zvětšováním vzduchové mezeře. Rozhodující pro jakostní součin $B \times H$ magnetické indukce a intenzity magnetického pole v pracovním bodě magnetu je



Obr. 2: Vliv teploty a zástavby motoru na jmenovitý moment motoru

však hodnota remanence B_r a růst teploty proto zmenšuje momentovou konstantu motoru k_M [mNm/A].

Vliv teploty na jmenovitý moment motoru je graficky znázorněn na obr. 2 (červená křivka). Modrá křivka pak ukazuje, jak se situace může zlepšit zabudováním motoru do rámu stroje. Jako příklad je uvedena situace, kdy původní tepelný odpor pouzdra motoru do okolního vzduchu R_{th2} se zmenšil zlepšením odvodu tepla do rámu stroje na polovinu ($R_{th2mod} = 0.5 R_{th2}$). V obr. 2 je rovněž uveden vztah pro výpočet proudu $I(T_U)$, zahrnující vliv změn R_{th2} , tedy změn podmínek odvodu tepla z pouzdra motoru.

Citlivost magnetického materiálu na zvyšování teploty lze posoudit podle teploty jeho Curieova bodu, při které materiál ztratí magnetické vlastnosti a remanence se zmenší na nulu. Teplota Curieova bodu pro tvrdý ferit, používaný v motorech řady F, je 450 °C, pro AlNiCo motorů A-max 800 °C, pro výkonné magnety NdFeB motorů řad RE a motorů EC je 310 °C, pro dražší výkonný materiál Sm_2Co_{17} je 800 °C.

Posouzení vhodnosti standardního magnetu pro danou aplikaci se ponechává výrobcí motorů. Příkladem jsou motory EC 16 a EC 22 pro lékařské účely, vhodné pro sterilizaci. Prostředí při sterilizaci, tj. obvykle 134 °C, vodní pára a tlak 2.3 bar po dobu 20 min, napadá magnet z materiálu NdFeB korozí. Řešením je osmkrát dražší magnet Sm_2Co_{17} .

Převodovky

Motory pro vysoké teploty okolí jsou téměř vždy vybaveny převodovkami. Většina planetových převodovek maxon má standardní přípustnou teplotu okolí T_U do 100 °C. To platí jak pro větší převodov-

ky s kuličkovými ložisky, tak i pro převodovky od průměru od 6 do 16 mm, které jsou vybaveny kuličkovými nebo kluznými samomaznými ložisky. Mezní teplotu lze zvýšit o několik desítek °C použitím maziva pro vysokou teplotu, které má při teplotě 25 °C nižší viskozitu. Pro kuličková ložiska je to tuk, pro kluzná olej. Olej je obsažen v pórech samomazných ložisek. Pro vytvoření olejového filmu je potřeba třecím pohybem hřídele zvýšit teplotu ložiska, aby se olej vytlačil. Svou roli hraje viskozita. Má-li převodovka pracovat nejen ve vysoké, ale i při velmi nízké teplotě, je vytlačování a nasátí oleje do pórů ztíženo. Životnost kluzného ložiska je proto kratší, nicméně i mezi nejmenšími převodovkami lze vybrat provedení s kuličkovými ložisky, která jsou na velký rozsah teplot méně citlivá.

Snímače

Odolnost vůči vysokým teplotám okolí je dána odolností elektronických součástí enkodérů. Enkodér se třemi Hallovými sondami je standardní výbavou motorů EC a u motorů s přípustnou teplotou vinutí $T_{max} = 155$ °C snáší snímač teplotu pouzdra, která je o 10 – 20 °C nižší. U motorů EC-max je deska se snímači dokonce těsně vedle vinutí, protože snímače využívají pro svoji činnost silový magnet rotoru. To znamená, že enkodér nijak neomezuje přípustné zatížení motoru.

Funkce inkrementálních snímačů typu MR je založena na změně odporu vodičů z materiálu s orientovanou texturou v závislosti na směru magnetického pole. Vodiče z NiFe mikroskopického průřezu mění svůj odpor v závislosti na směru magnetického pole cca o 3 % a změna odporu s teplotou je vyšší, než vliv směru pole. Proto je snímač tvořen několika čid-

ly, zapojených do Wheatstonova můstku a tyto snímače jsou standardně použitelné do 85 °C.

Optické inkrementální snímače HEDS a HEDL mají standardní rozsah teplot do 100 °C.

Resolver neobsahuje žádné elektronické součásti, pracuje jako polohový transformátor s otočným vinutím a je teplotně odolný do 155 °C, tedy jako nejodolnější motor. Jeho analogovou informaci o poloze lze některým z převodníků převést na digitální ve formátu dvou kanálů inkrementálního snímače.

Elektronika

Standardní teplotou okolí T_U pro řídicí jednotky elektrických pohonů je 45 °C. Toto omezení mají i řídicí jednotky EPOS. Výrazný pokrok představuje nová koncepce kompaktního pohonu MCD, u kterého řídicí jednotka, integrovaná do jednoho konstrukčního celku s motorem EC30 s výkonem 60 W, snese teplotu pouzdra do 100 °C. Dalším krokem je hybridní řídicí jednotka, určená pro zabudování do motoru EC, která má provozní teplotu do 125 °C.

Literatura:

- [1] SINGULE, V.: Vlastnosti a použití mikro motorů. Automa, 2008, roč. 14, č. 3, s. 62–64.
 [2] BROŽ, V.: Jaký elektrický pohon do 400 W? Automa, 2007, roč. 13, č. 8-9, s. 53–55.

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

Pozvání na AMPER 2009 v Praze

Vývojoví pracovníci firmy maxon důsledně sledují, jak se mění požadavky kladené na elektrické pohony. Kromě neustále náročnějších požadavků na zvyšování koncentrace výkonu, snižování hluku, minimalizování vůle v převodech rostou také požadavky vyplývající z jejich použití v extrémních podmínkách.

Uvedený článek dokladuje vhodnost použití motorů Maxon v prostředí s vysokou okolní teplotou. Kompaktní pohon MCD je příkladem integrace pohonu s řídicí elektronikou do malého prostoru, přičemž přípustná teplota pouzdra je 100 °C.

Ve stánku UZIMEX PRAHA, spol. s r. o. v hale 3 č. A11 najdou zájemci v průběhu veletrhu řadu nejnovějších výrobků od firmy Maxon.

Technici společnosti UZIMEX jsou připraveni se zájemci konzultovat jejich konkrétní aplikace. A to nejenom aplikace z oblasti stejnosměrných pohonů. Na pohony maxon často navazují řemenové pohony, pružné spojky a lineární vedení. Řemenové pohony spolu s řemenicemi vlastní výroby nabízí UZIMEX i pro úlohy s velkými silami a výkony. Pro manipulaci v sériové výrobě doporučuje vačkové manipulátory a krokovací stoly, pro měření geometrie a kalibraci přesných strojů laserové přístroje.

O osudech automatických kosmických robotů na Marsu bude pravidelně přednášet Ing. Tomáš Příbyl.