

Motory Maxon vhodné pro vysoké teploty

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

1. Úvod

Požadovaná pracovní teplota okolí podstatně ovlivňuje výběr komponent motorů, převodovek, snímačů a elektroniky. K posouzení použitelnosti motoru v daných podmínkách nestačí znát jenom přípustnou teplotu okolí motoru, která bývá (stejně jako u převodovek) přibližně 100 °C, ale i jeho oteplení, závislé na zatížení a otáčkách. Přípustné pracovní teploty snímačů a elektroniky jsou zpravidla nižší (70 až 100 °C pro snímače, 45 °C pro elektroniku). Jejich integrace do motoru tedy značně snižuje odolnost motoru proti vysoké teplotě.

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

$$P_{Cu} = I^2 R \quad (1)$$

kde

P_{Cu} jsou ztráty na činných odporech vinutí (W),

I je střední hodnota proudu (A),

R odpor vinutí (Ω).

Ztráty v magnetickém obvodu (vířivými proudy a hysterezní ztráty) vznikají pouze v motorech, v jejichž magnetickém obvodu se vyskytuje časově proměnné magnetické pole. Jsou to tedy klasické komutátorové motory (např. DC Maxon), ale i motory s elektronickou komutací (např. EC Maxon, oba typy na obr. 1 a viz také [1]). S otáčkami motoru roste frekvence změn magnetického pole a s frekvencí i ztráty v magnetickém obvodu.

Naproti tomu v železe magnetického obvodu stejnosměrných komutátorových motorů DC Maxon ztráty nevznikají, neboť rotor je

tvořen pouze samonosným měděným vinutím kotvy (kotva je bez železa, viz [1]), a tudíž magnetické pole je v magnetickém obvodu motoru časově neproměnné. To ve svém důsledku znamená, že z motoru je nutné odvá-

dět méně tepla, a tudíž motor bude lépe odolávat vyšším teplotám okolí.

2. Teplota vinutí

U elektromotorů je standardizováno rozřídění teplotní odolnosti izolace vodičů vinutí do tříd označených písmeny. Přípustné teploty vinutí T_{max} jsou pro jednotlivé motory Maxon uvedeny v aktuálním katalogu. V nabídkě jsou 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 – u motorů EC Maxon na paket statoru a u konvenčních komutátorových motorů na paket rotoru. V samonosném vinutí v motorech DC Maxon se nemohou vyskytnout zkraty na jádro, ale teplota ovlivňuje pevnost pryskyřice, kterou jsou vodiče spleeny do tvaru trubky. Téměř stejnou teplotu jako vinutí má i disk z plastu, kterým je jedno čelo vinutí upevněno na hřídel.

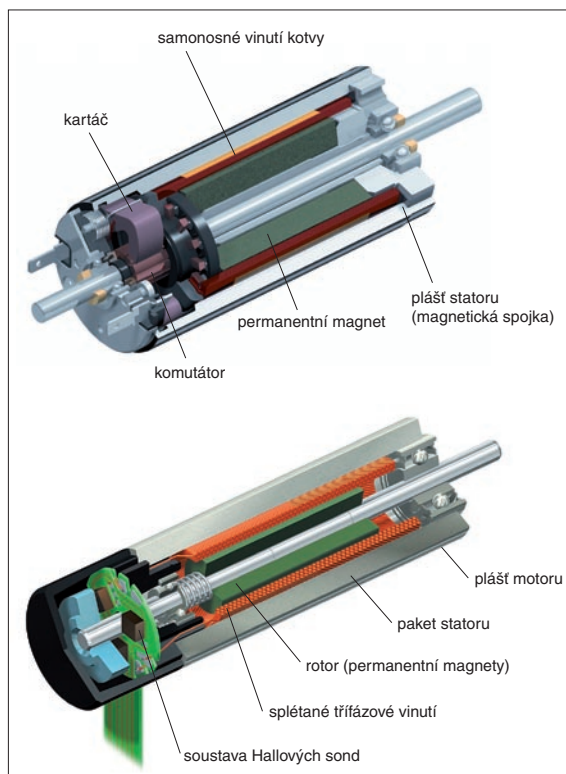
3. Odvádění tepla v motorech DC Maxon

Zmenšení tvarové stálosti samonosného vinutí nadměrnou teplotou má za následek jeho trvalou deformaci elektromagnetickými silami, které vytvářejí hnací moment rotoru. V konečném důsledku se zdeformované vinutí může zablokovat a rotor se přestane otáčet.

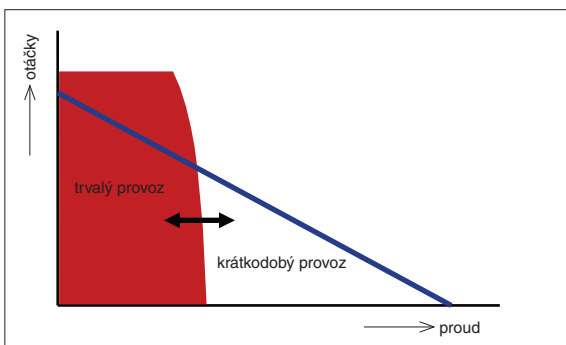
Důležitou skutečností však je, že motory DC Maxon mají díky své koncepci vysokou účinnost, která je až 92 %. Růst teploty je proto při určitém výkonu na hřídeli mnohem nižší než u jiných komutátorových motorů. Navíc velká účinnost je zachována i při vysokých otáčkách. To znamená, že je nutné odvést jen malé množství tepla, a důsledkem je menší oteplení 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 (°C). Pro časově ustálené zatížení se použijí hodnoty tepelného odporu přestupu tepla z vinutí na pouzdro motoru R_{th1} a tepelného odporu přestupu tepla z pouzdra do okolního vzduchu R_{th2} . Druhý údaj (R_{th2}) je určen za stavu, kdy se pouzdro neochlazuje vedením tepla do rámu stroje. Proud do motoru se určí z požadovaného točivého momentu a momentové konstanty k_M (mN·m/A).

Pro výpočet maximálního přípustného trvalého proudu motoru $I(T_U)$ pro danou teplotu okolí T_U je možné použít rychlostní



Obr. 1. Komutátorový motor DC Maxon (nahore) a motor s elektronickou komutací EC Maxon (dole)



Obr. 2. Stanovení maximálního přípustného trvalého proudu motoru pro danou teplotu okolí

charakteristiku daného motoru (obr. 2), která je v katalogu uvedena pro teplotu okolí $T_{st} = 25\text{ }^\circ\text{C}$, a danou maximální teplotu motoru T_{max} ($^\circ\text{C}$). Vztah pro výpočet proudu je:

$$I(T_U) = I(T_{st}) \sqrt{\frac{T_{max} - T_U}{T_{max} - T_{st}}} \quad (2)$$

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. Teplotní časová konstanta je doba, za niž se teplota při skokové změně zatížení změní o 63 % nárůstu teploty do ustáleného stavu.

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

$$\Delta T_w = P_{Cu} R_{th1} \quad (3)$$

$$\Delta T_S = P_{Cu} R_{th2} \quad (4)$$

Stejnoseměrné motory, nejsou-li výrazně ochlazované stykem kov-kov s rámem stroje, mají teplotní spád mezi pouzdrům a okolním vzduchem dvojnásobný až pětinasobný oproti spádu mezi vinutím a pouzdrům.

4. Odvádění tepla v motorech EC Maxon

U motorů EC Maxon je vinutí uloženo na statoru, dobře se statorem 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, které vzniká při činnosti motorů EC Maxon, 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 (viz též [2]). Přípustný trvalý moment se při nejvyšší přípustné rychlosti snižuje na 30 až 85 % momentu při nulové rychlosti. Záleží přitom na rozměrech motoru a na přípustné rychlosti otáčení, která je v rozmezí od $15\,000\text{ min}^{-1}$ do $100\,000\text{ min}^{-1}$.

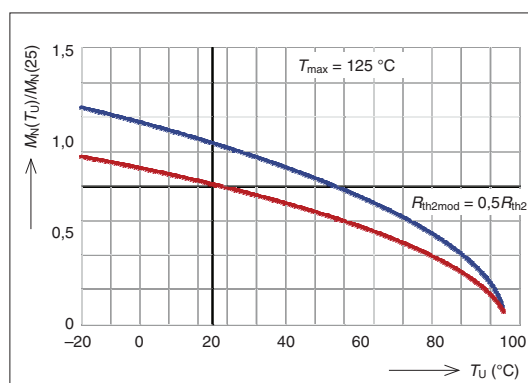
U diskových motorů EC Maxon při vyšší rychlosti otáčení také vzniká více tepla, ale současně je intenzivnější i chlazení, protože vnější rotor působí jako chladič ventilátor.

Odvod tepla přitom s rychlostí otáčení roste strměji než vznikající ztrátové teplo, a motor je proto možné při vyšších rychlostech zatížit více než při pomalém chodu.

5. Vliv teploty na točivý moment

Měrný odpor mědi s teplotou roste o 0,392 % na kelvin, což znamená, že vinutí má při $75\text{ }^\circ\text{C}$ o 20 % větší odpor R než při $25\text{ }^\circ\text{C}$. Pro dosažení stejného momentu je proto nutné zvýšit napětí. Při nulové rychlosti je vliv odporu R na rozběhový moment lineární, ale se zvyšující se rychlostí otáčení se vliv úbytku napětí na činném odporu vinutí s ohledem na indukované napětí zmenšuje.

Teplota rovněž ovlivňuje tvar hysterezní smyčky materiálu permanentního magnetu. Je možné si to zjednodušeně představit tak,



Obr. 3. Vliv teploty a zástavby motoru na jmenovitý moment motoru

že se pohyby atomů permanentního magnetu s rostoucí teplotou zintenzivňují. Tím dochází k narušování orientovaného uspořádání magnetických domén, kterého bylo dosaženo magnetováním. Pro kvalitu permanentního magnetu je důležitý tvar jeho demagnetizační křivky a především dvě hodnoty, které z ní lze přečíst: 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 H_c se s teplotou zvyšuje a magnet je odolnější proti odsmagnetování působením reakce kotvy nebo zvětšováním vzduchové mezery. Rozhodující pro hustotu energie, danou součinem velikostí magnetické indukce a intenzity magnetického pole v pracovním bodě magnetu BH ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$), je však hodnota remanence B_r , a růst teploty proto zmenšuje momentovou konstantu motoru k_M ($\text{mN}\cdot\text{m}/\text{A}$).

Vliv teploty na jmenovitý moment motoru je graficky znázorněn na obr. 3 (červená křivka). Modrá křivka v obr. 3 ukazuje, jak se situace může zlepšit zabudováním motoru do rámu stroje. Jako příklad je uvedena situace, kdy se původní tepelný odpor přestupu tepla z pouzdra motoru do okolního vzduchu R_{th2} zmenšil zlepšením odvodu tepla do

rámu stroje na polovinu ($R_{th2mod} = 0,5R_{th2}$). Vztah pro výpočet proudu $I(T_U)$, zahrnující vliv změn R_{th2} , tedy změn podmínek odvodu tepla z pouzdra motoru, je:

$$I(T_U) = I(T_{st}) \sqrt{\frac{T_{max} - T_U}{T_{max} - T_{st}} \frac{R_{th1} + R_{th2}}{R_{th1} + R_{th2mod}}} \quad (5)$$

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. Pro některé materiály používané u motorů firmy Maxon jsou hodnoty Curieova bodu uvedeny v tab. 1.

Posouzení vhodnosti magnetu pro danou úlohu se ponechává na výrobci motorů. Příkladem jsou motory EC 16 a EC 22 pro lékařské účely, vhodné pro sterilizaci vodní párou o teplotě $134\text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku 230 kPa po dobu 20 min. Magnet z materiálu NdFeB je při tomto procesu napadán korozi. Řešením je osmkrát dražší magnet $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$.

6. Převodovky

Motory pro vysoké teploty okolí jsou téměř vždy vybaveny převodovkami. Většina planetových převodovek Maxon má nejvyšší přípustnou provozní teplotu okolí $T_U = 100\text{ }^\circ\text{C}$. To platí jak pro větší převodovky s kuličkovými ložisky, tak i pro převodovky o průměru od

Tab. 1. Teploty Curieova bodu pro některé materiály

Materiál	Typová řada motorů Maxon, kde se používá	Curieův bod ($^\circ\text{C}$)
tvrdý ferit	F	450
AlNiCo	A-max	800
NdFeB	RE, EC	310
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	EC 16, EC 22	800

6 do 16 mm, které jsou vybaveny kuličkovými nebo kluznými samomaznými ložisky. Mezní teplotu lze zvýšit o několik desítek stupňů Celsia použitím maziva určeného pro vysokou teplotu, jehož viskozita je při teplotě $25\text{ }^\circ\text{C}$ nižší. Pro kuličková ložiska je to tuk, pro kluzná olej.

U samomazných ložisek je olej obsažen v jejich pórech. Pro vytvoření olejového filmu je třeba pohybem hřídele zvýšit teplotu ložiska, aby se olej vytlačil. Svou roli při tom hraje viskozita. Má-li převodovka pracovat nejen při vysoké, ale i při velmi nízké teplotě, je vytlačování a zpětné nasátí oleje do pórů problematické. 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.

7. Snímače

Odolnost snímačů k vysokým teplotám okolí je dána odolností jejich elektronických součástek. Snímač se třemi Hallovými sondami, který je standardní výbavou motorů EC Maxon s přípustnou teplotou vinutí $T_{\max} = 155\text{ °C}$, snáší teplotu pouzdra, jež je o 10 až 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 snímač 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 mikroskopického průřezu z NiFe mění svůj odpor přibližně o 3 % v závislosti na směru magnetického pole. Změna odporu s teplotou je vyšší než vliv směru magnetického pole, a proto je snímač tvořen několika čidly, zapojenými do Wheatstoneova můstku. Tyto snímače jsou běžně použitelné do 85 °C.

Standardní rozsah pracovních teplot optických inkrementálních snímačů HEDS a HEDL je do 100 °C.

Rezolver neobsahuje žádné elektronické součásti – pracuje jako polohový transformátor s otočným vinutím. Odolává provozním

teplotám do 155 °C, tedy jako nejdolnější motor. Jeho analogovou informaci o poloze lze některým z převodníků převést na digitální, např. ve formátu dvou kanálů inkrementálního snímače.

8. Elektronika

Standardní provozní teplota 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 o výkonu 60 W, snese teplotu pouzdra do 100 °C. Dalším pokrokem je hybridní řídicí jednotka, určená pro zabudování do motoru EC Maxon, jejíž provozní teplota je do 125 °C.

9. Závěr a pozvání na MSV Brno 2008

Vývojoví pracovníci firmy Maxon důsledně sledují, jak se mění požadavky kladené na elektrické pohony. Kromě neustále náročnějších požadavků na zvětšování koncentrace výkonu, snižování hluku a 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. Nejpádnejším důkazem zkušeností s provozem motorů v extrémních podmínkách je jejich použití v robotech vyslaných na Mars.

Ve stánku společnosti Uzimex Praha, spol. s r. o., v hale V, č.107, najdete zájemci v průběhu MSV 2008 několik nejnovějších výrobků od firmy Maxon. Technici společnosti Uzimex jsou připraveni se zájemci konzultovat jejich použití v konkrétních úlohách.

Literatura:

- [1] SINGULE, V.: *Vlastnosti a použití mikromotorů*. 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*