

MALÉ STEJNOSMĚRNÉ MOTORY

MAXON

Verze 1.1
(18.7.2002)

OBSAH

1. Postavení malých motorů na světovém trhu	4
1.1. Informovanost o malých motorech	4
1.2. Hlediska pro volbu optimálního motoru	4
1.3. Situace malých elektrických motorů v České republice.	5
1.4. Orientační porovnání momentových charakteristik malých motorů	5
1.5. Obrázky	6
2. Porovnání konstrukčních principů nejběžnějších malých motorů	7
2.1. Asynchronní třífázový motor	7
2.2. Stejnoseměrný motor s mechanickým komutátorem a rotorem bez železa	7
2.3. Charakteristika komutátorového motoru se samonosným vinutím	8
2.4. Obrázky	9
3. Vývoj malých dynamických stejnosměrných motorů	11
3.1. Přednosti samonosného vinutí rotoru	11
3.2. Obrázky	12
4. Životnost motorů	13
4.1. Kartáče a komutátor	13
4.2. Kovové kartáče	13
4.3. Grafitové kartáče	13
4.4. Kluzná samomazná ložiska	14
4.5. Kuličková miniaturní ložiska	14
4.6. Obrázky	14
5. Výběr materiálu permanentních magnetů	17
5.1. Permanentní magnety	17
5.2. Optimalizace pohonu	17
5.3. Obrázky	18
6. Použití převodovek	19
6.1. Typy převodovek	19
6.2. Provedení převodovek	19
6.3. Přiřazení převodovek k motorům	19
6.4. Vliv převodového poměru na výkon pohonu	19
6.5. Obrázky	20
7. Elektronicky komutované stejnosměrné motory	21
7.1. Vývoj motorů EC	21
7.2. Ovládání motoru EC	21
7.3. Uspořádání motoru EC	21
7.4. Obrázky	22
8. Převodovky s keramickými čepy	23
8.1. Doba života motoru	23
8.2. Doba života převodovky	23
8.3. Aplikace keramiky v současně dodávaných převodovkách	24
8.4. Obrázky	24
9. Elektronicky komutované stejnosměrné motory	25
9.1. Odlišnost motorů EC od krokových a synchronních motorů	25
9.2. Oblasti provozu stejnosměrného motoru EC	25
9.3. Obrázky	26
10. Elektronicky komutované stejnosměrné motory	28
10.1. Vinutí stejnosměrného motoru EC	28
10.2. Spojení do hvězdy nebo do trojúhelníka?	28

10.3.	Průběh proudu do sekcí vinutí	28
10.4.	Obrázky	28
11.	Řízení malých stejnosměrných motorů	32
11.1.	Řízení motoru s otevřenou a s uzavřenou smyčkou	32
11.2.	Řízení motoru DC s otevřenou smyčkou	32
11.3.	Řízení motoru EC s otevřenou smyčkou	32
11.4.	Obecné řízení pohybu motoru s uzavřenou smyčkou	33
11.5.	Obrázky	33
12.	Řízení malých stejnosměrných motorů EC bez snímače polohy rotoru	35
12.1.	Náhrada Hallových sond	35
12.2.	Motory EC bez snímačů	35
12.3.	Diskové motory EC	36
12.4.	Integrovaná řídicí jednotka v motoru	36
12.5.	Aplikace motorů EC s různým řízením	36
12.6.	Obrázky	36
13.	Řídicí jednotky malých stejnosměrných motorů EC	39
13.1.	Řada řídicích jednotek rychlosti EC	39
13.2.	Řídicí jednotky polohy motorů EC	39
13.3.	Obrázky	40
14.	Řízení malých stejnosměrných motorů DC	41
14.1.	Řízení rychlosti motoru s uzavřenou smyčkou	41
14.2.	Vliv seřízení regulátoru rychlosti PID	41
14.3.	Řízení polohy motoru s uzavřenou smyčkou	41
14.4.	Vliv nastavení regulátoru polohy	42
14.5.	Obrázky	42
15.	Řízení malých stejnosměrných motorů DC	44
15.1.	Řízení rychlosti metodou $I \times R$ s uzavřenou smyčkou bez snímače	44
15.2.	Funkce řídicí jednotky rychlosti pracující metodou kompenzace $I \times R$	45
15.3.	Jednokvadrantové a čtyřkvadrantové řízení	45
15.4.	Obrázky	45
16.	Řízení malých stejnosměrných motorů DC	46
16.1.	Konstrukce proudového regulátoru	46
16.2.	Lineární proudový regulátor	46
16.3.	Pulsní proudový regulátor	46
16.4.	Obrázky	47
17.	Výkon řídicích jednotek malých stejnosměrných motorů	49
17.1.	Meze výkonu řídicí jednotky	49
17.2.	Meze výkonnosti řídicích jednotek MAXON	50
17.3.	Vliv mezí řídicí jednotky na motor	50
17.4.	Obrázky	51
18.	Snímače otáčení malých stejnosměrných motorů	52
18.1.	Tachodynamo	52
18.2.	Digitální snímače	52
18.3.	Optický inkrementální snímač	52
18.4.	Magnetický inkrementální snímač MR s Hallovými sondami	53
18.5.	Magnetický inkrementální snímač AMR s anisotropním prvkem	53
18.6.	Obrázky	53

1. Postavení malých motorů na světovém trhu

Evropský časopis Industrial Engineering News na konci roku 1999 uveřejnil vyhodnocení světového trhu elektromotorů. Podle tohoto rozboru malé motory tvoří 83% všech motorů v průmyslu. Na jeden výkonný elektromotor ve stroji připadají i 3 až 4 malé motory. S rozvojem automatizace a výpočetní techniky roste množství PID regulací v nových výrobcích. Propojováním řídicích a regulačních systémů sítěmi vznikají požadavky na aplikace malých stejnosměrných motorů doplněných snímači a převodovkami.

Soutěžní poroty tří ročníků mezinárodních veletrhů Brno v minulých letech a dvou výstav AMPÉR v Praze ocenily aktuální novinky švýcarského výrobce MAXON zlatými medailemi. Tato skutečnost odpovídá dynamickému rozvoji oboru malých stejnosměrných motorů v současné době a přínosu moderní technologie malých stejnosměrných motorů pro technickou úroveň českých výrobců.

1.1. Informovanost o malých motorech

Elektrické motory, a to na střídavý i na stejnosměrný proud, se vyskytují v mnoha tvarech i velikostech. Některé motory pro všeobecné použití jsou standardizovány. Jiné jsou vyvíjeny pro specifické účely. Elektromotory vyvíjející otáčivý pohyb jsou obecně založeny na magnetickém působení dvou magnetických polí, z nichž jedno je vázáno na stator motoru a druhé na rotor. Mechanický moment vznikne, jestliže tato dvě magnetická pole jsou navzájem úhlově natočena. Natočení je nutno udržet i v průběhu otáčení rotoru. Způsob udržování úhlového natočení je svázán s fyzikálním principem použitým u jednotlivých druhů motorů.

Informovanost naší technické veřejnosti nepokrývá stejnoměrně celou paletu typů motorů a principů, na jejichž základě motory vznikly a jsou v současnosti dále vyvíjeny. Chybí zejména informace o malých stejnosměrných komutátorových motorech se samonosným vinutím rotoru bez železného jádra a o malých stejnosměrných bezkartáčových motorech s elektronickou komutací, které sice jsou v podstatě synchronními motory, ale jimž snímač polohy a řízení dodává dynamické vlastnosti komutátorových motorů.

1.2. Hlediska pro volbu optimálního motoru

Optimálně vybraný motor splňuje s minimálními náklady dynamické požadavky stroje, aniž by se při provozu nadměrně oteploval. Požadovaná dynamika stroje se vyjádří časovým průběhem mechanického momentu a rychlosti v čase. Uváží se další hlediska, hmotnost motoru na jednotku výkonu, spotřebovaný prostor a vliv váhy pohonu na funkci a parametry stroje.

Jedním ze základních parametrů motoru je rozběhový moment. Požadavky na jeho velikost se liší od zlomku plného provozního momentu až po jeho několikanásobek. Původně požadovaný rozběhový moment ze strany poháněného stroje se během provozu stroje mění podle stavu maziva, teploty, opotřebení, rozměrových změn s vlhkostí a vlivem koroze pohyblivých částí. Některé typy motorů poskytují velkou rezervu momentu k překonání zvýšených odporů a zvyšují tak spolehlivost funkce. Rozběhový moment motoru dále určuje zrychlení poháněného systému a dynamiku jeho funkce.

Rozhodující roli může sehrát elektrický zdroj, který je k dispozici, třífázová síť, stejnosměrný rozvod bezpečného nízkého napětí nebo baterie v mobilních systémech a v zařízeních se zálohováním síťového provozu baterií. V provozu s bateriemi je podstatným parametrem účinnost motoru.

Pokusíme se vyplnit mezeru v informovanosti o vlastnostech nejmodernějších malých stejnosměrných motorů o výkonu do 400 W, jejichž ucelené řady dlouhodobě vyvíjí a vyrábí švýcarská firma MAXON. Naši výrobci, kteří spolupracují se svými zahraničními partnery v oblasti sériové a hromadné automatizované výroby a jsou svými partnery vybaveni moderní výrobní technologií, nacházejí ve svých zařízeních stejnosměrné pohony MAXON, o nichž zpravidla do té doby nic neslyšeli. Motory včetně soustavy převodovek, snímačů a řízení jsou dnes přítomni na českém trhu snadno dostupné i pro naše vlastní nové konstrukce v automatizační technice a dalších výrobních oborech.

1.3. Situace malých elektrických motorů v České republice.

Technické úkoly spojené s automatizací, měřicí technikou a jinými pohony malých výkonů do stovek wattů se v našich konstrukcích dosud zpravidla řešily pneumaticky, hydraulicky nebo elektricky. Elektrické pohony mají přirozenou jednoduchou spojitost s elektronickým řízením a využívají snadno dostupnou elektrickou energii. V našich výrobcích se v minulosti obvykle využívalo elektrické řešení, které navazovalo na motory u nás vyráběné a dostupné v minulosti, a to:

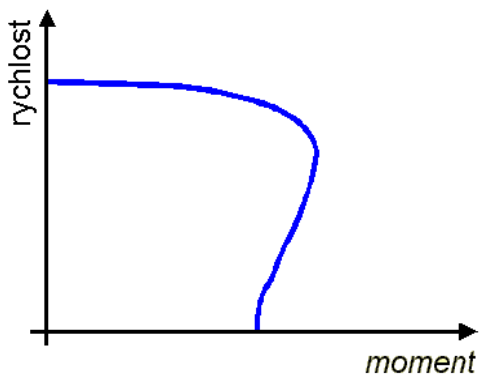
- malými asynchronními motory se střídavým trojfázovým napájením, a to sítíovou frekvencí nebo frekvencí upravenou elektronicky frekvenčním měničem,
- malými asynchronními motory napájenými jednou fází v nenáročných případech, kdy třífázová síť není k dispozici,
- malými synchronními motory se střídavým trojfázovým napájením, a to vždy frekvencí upravenou elektronicky frekvenčním měničem,
- krokovými motory, ať bez permanentních magnetů v rotoru či hybridními krokovými motory s permanentními magnety v rotoru. Krokové motory jsou v každém případě napájeny řídicí elektronikou,
- plochými synchronními motory, které jsou mechanicky shodné s plochými krokovými motory bez permanentních magnetů v rotoru, ale mají zjednodušené napájení jednou sítíovou fází,
- malými stejnosměrnými komutátorovými motory nižší třídy s železným rotorem, kde jsou funkční parametry a životnost omezeny mechanickým komutátorem a kartáči,
- malými stejnosměrnými komutátorovými motory vyšší třídy se samonosným rotorem bez železného jádra s vysokými dynamickými vlastnostmi a vyšší životností komutátoru s kartáči, které se u nás před lety dostaly do výroby pod označením HSM60, HSM150 a HSM300 v souvislosti s aplikacemi v československé výpočetní technice.

Informace o výsledcích vývoje poslední uvedené skupiny dynamických motorů uvedeme dále.

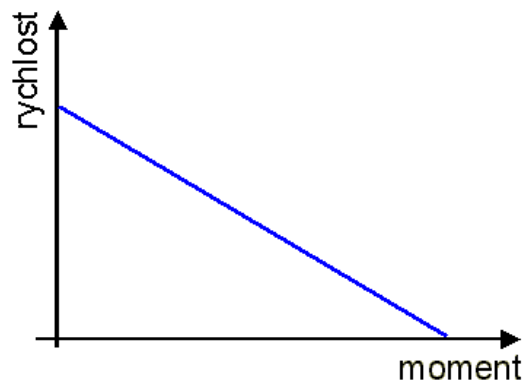
1.4. Orientační porovnání momentových charakteristik malých motorů

Zásadní odlišnosti ukazují zjednodušené momentové charakteristiky tří typů motorů, obr.1 asynchronního, obr.2 stejnosměrného a obr.3 krokového. Momentové charakteristiky jsou závislosti rychlosti motoru na mechanickém momentu zatížení. Hodnota momentu při nulové rychlosti je rozběhový moment.

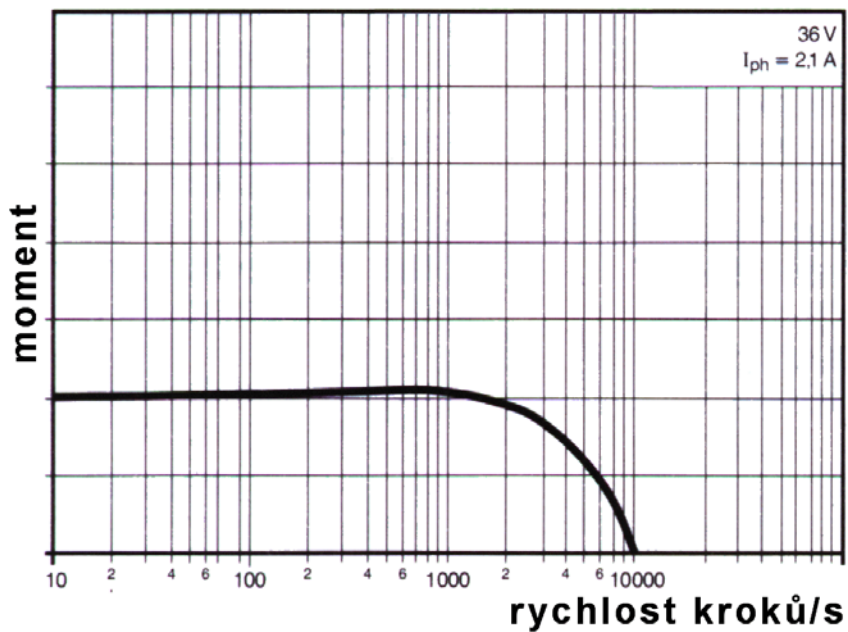
1.5. Obrázky



Obr. 1 Velmi nelineární charakteristika asynchronního motoru



Obr. 2 Lineární charakteristika stejnosměrného motoru s permanentními magnety



Obr. 3 Charakteristika krokového hybridního motoru. Osy rychlosti a momentu jsou zaměněny, jak je to obvyklé

2. Porovnání konstrukčních principů nejběžnějších malých motorů

2.1. Asynchronní třífázový motor

Předpokládáme dvoupólový motor. Stator motoru obsahuje tři cívky, které při třífázovém napájení vytvářejí točivé magnetické pole. Za dobu jedné periody napájecí frekvence se sever magnetického pole uvnitř statoru otočí o 360 úhlových stupňů. Rotor obsahuje vinutí, jehož závitů jsou na čelech spojeny do krátků. Vinutí rotoru je u malých motorů obvykle tvořeno podélnými tyčemi s konci spojenými do klece. Tyče jsou zasazeny v drážkách na obvodu železného jádra rotoru. Poněvadž se rotor otáčí pomaleji než točivé magnetické pole, indukovaný proud v tyčích vytváří magnetické pole rotoru. Pole rotoru má podle Lenzova zákona směr, při kterém na ně stator působí mechanickým momentem ve směru točivého magnetického pole. Schéma motoru je na obr. 1 a momentová charakteristika na obr.2.

Z tvaru momentové charakteristiky asynchronního motoru je možno sledovat, že rychlost rotoru bez zatížení je blízká synchronní rychlosti točivého pole statoru $60 \cdot 50 \text{ Hz} = 3000 \text{ ot./min}$. Při vzrůstu zatížení rychlost rotoru klesá, zvyšuje se indukované napětí a proud ve vodičích rotoru a ovšem i proud ve vinutí statoru. Při trvalém přípustném provozním momentu je pokles rychlosti rotoru, zvaný skluz, několik procent. Další zvýšení zatížení vede k růstu proudů, tepelnému přetížení vinutí a při dosažení momentu zvratu se motor zastaví. Rozběhový moment motoru je v průsečíku charakteristiky s osou momentu. Motor obvyklé konstrukce má rozběhový moment nižší než moment zvratu.

Pro akceleraci je k dispozici rozběhový moment, který je jenom o desítky procent až dvakrát vyšší než provozní moment a ani v krátkodobém zatížení nelze získat vyšší akcelerační moment.

Pro aplikace s proměnnou požadovanou rychlostí se asynchronní motor napájí měničem, tj. třífázovým střídavým zdrojem s měnitelnou frekvencí. Základní charakteristika motoru však zůstává a ani frekvenčním měničem nelze získat vyšší zrychlení. Při vyšších rychlostech a frekvencích navíc rostou ztráty v železe, které se střídavým polem přemagnetovává. Rostou i ztráty vířivými proudy v laminovaném feromagnetickém obvodu.

2.2. Stejnosemřný motor s mechanickým komutátorem a rotorem bez železa

Popisujeme malý stejnosměrný motor s permanentními magnety, kartáči a komutátorem a samonosným měděným vinutím rotoru. Magnetické pole statoru se neotáčí a je s výhodou vyšší účinnosti buzeno permanentním magnetem. Siločáry magnetického pole procházejí obvodovým pláštěm motoru, projdou vzduchovou mezerou pro vinutí a pak jádrem v dutině uvnitř vinutí, které je na čele spojeno se státorem. Zdrojem magnetického pole statoru jsou permanentní magnety. Konvenční motory mají vinutí na železném jádru kotvy a permanentní magnety ve vnějším plášti motoru. Rozměrově i cenově výhodnější je uspořádání, u kterého je permanentní magnet uvnitř vinutí a plášť je z feromagnetického materiálu. Toto uspořádání je podmíněno použitím samonosného vinutí rotoru, v jehož dutině se umístí stojící permanentní magnet. Obě varianty uspořádání permanentních magnetů jsou na obr.3 a obr.4. Schéma magnetického obvodu komutátorového motoru se samonosným vinutím MAXON je na obr.5. Siločáry ve vzduchové mezeře, ve které bude umístěno samonosné vinutí, směřují radiálně a vytvářejí tak podmínky pro vznik mechanického momentu interakcí s magnetickým polem závitů vinutí rotoru podle obr.6. Výsledná magnetické pole statoru a rotoru jsou navzájem natočena o 90 úhlových stupňů a tuto polohu si musí zachovat i při otáčení rotoru. Jednotlivé skupiny závitů rotoru jsou proto připojeny na lamely mechanického komutátoru a napájeny kartáči, které zachovávají polohu vzhledem k permanentnímu magnetu podle obr.3.

2.3. Charakteristika komutátorového motoru se samonosným vinutím

Tvar charakteristiky vychází:

- z lineárního vztahu proudu ve vinutí \underline{I} a mechanického momentu rotoru \underline{M} vzniklého podle obr.6, který se udává vztahem $M = k_M \cdot I$, kde k_M je momentová konstanta udávaná v mNm/A.
- z matematického popisu náhradního schéma motoru podle obr.7., kde napětí zdroje \underline{U} se rozdělí mezi:
 - úbytek napětí $R \cdot I$ na ohmickém odporu R vinutí rotoru,
 - úbytek napětí $L \cdot \frac{dI}{dt}$ na indukčnosti vinutí \underline{L} při nárůstu proudu,
 - napětí EMF ve voltech indukované ve vodičích při otáčení vinutí rotoru v magnetickém poli statoru.

Indukované napětí EMF je úměrné rychlosti otáčení rotoru a dále závisí na parametrech motoru, tj. na magnetické indukci \underline{B} v mezeře pro vinutí, na počtu a délce závitů rotoru a na průměru, na němž je umístěno vinutí. Tyto parametry motoru se v katalogu motorů vyjadřují rychlostní konstantou k_n , která je definovaná vztahem pro rychlost \underline{n} v ot./min, $n = k_n \cdot EMF$.

Motory se samonosným vinutím mají jednak velmi nízkou indukčnost a jednak předpokládáme rovnoměrnou rychlost. Úbytek napětí na indukčnosti neuvažujeme. Obvod náhradního schéma motoru se pak popíše vztahem pro součet napětí $U = EMF + R \cdot I$. Zavedením rychlostní konstanty k_n a rychlosti \underline{n} místo EMF a dále zavedením momentové konstanty k_M a mechanického momentu motoru \underline{M} dostáváme vztah pro rychlost

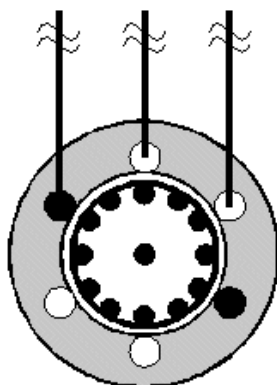
$$n = (k_n \cdot U) - (R \cdot \frac{k_n}{k_M}) \cdot M$$

Rovnici odpovídá v souřadnicích rychlosti a zatížení mechanickým momentem přímková rychlostní charakteristika podle obr.8. Bez zatížení, při $M=0$ je pracovní bod motoru na svislé ose rychlosti. Rychlost naprázdno pro $M=0$ je $n_0 = k_n \cdot U$. Rychlost naprázdno je přímo úměrná napájecímu napětí. Při vzrůstajícím zatížení \underline{M} se rychlost snižuje podle klesající přímky se zápornou směrnici $R \cdot \frac{k_n}{k_M}$. Směrnice nezávisí na napájecím napětí. Nejvyšší zatížení je záběrový moment

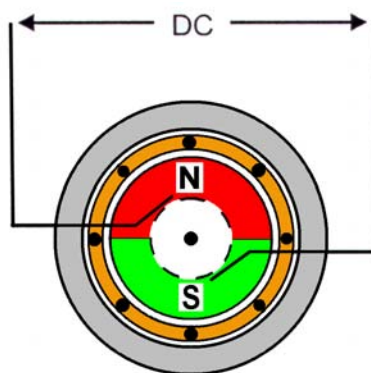
\underline{M}_H . Záběrový moment je několikanásobně vyšší než jmenovitý moment v trvalém provozu, který je omezen zahříváním vinutí motoru.

V diagramu je rovněž zakreslena závislost proudu na momentu zatížení, odpovídající vztahu $M = k_M \cdot I$. Je to přímka vycházející z počátku se směrnici $\frac{1}{k_M}$. Popsané význačné vlastnosti stejnosměrného motoru, velký záběrový moment a velký zrychlující moment je podmíněn schopností zdroje dodat odpovídající proud.

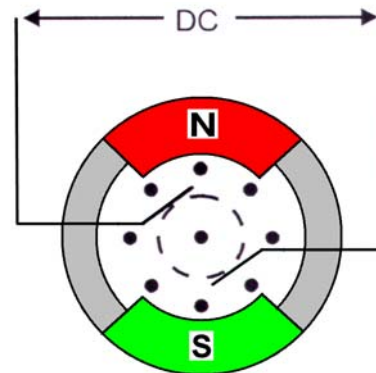
2.4. Obrázky



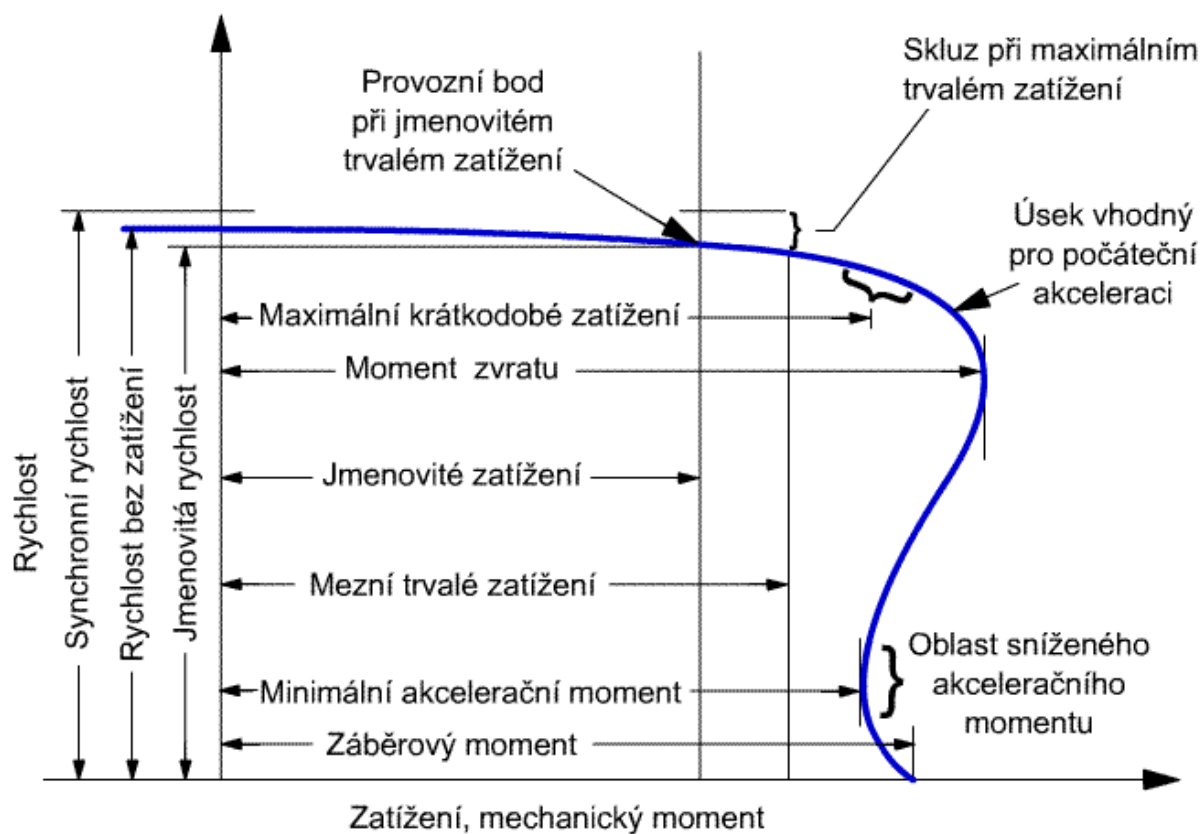
Obr. 1 Schéma asynchronního motoru s klecovou kotvou



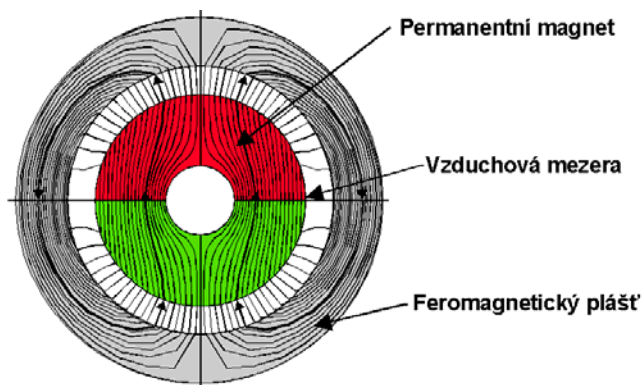
Obr. 3 Uspořádání stejnosměrného motoru se samonosným vinutím rotoru a permanentním magnetem uvnitř



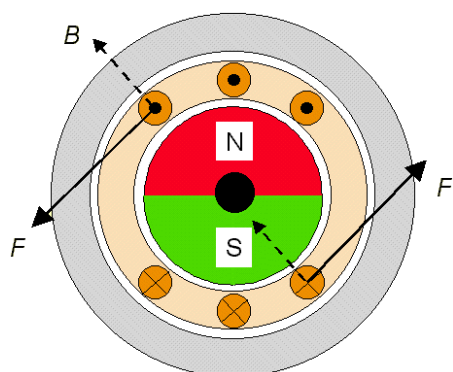
Obr. 4 Uspořádání stejnosměrného motoru s konvenčním vinutím v drážkách železného rotoru a permanentním magnetem vně



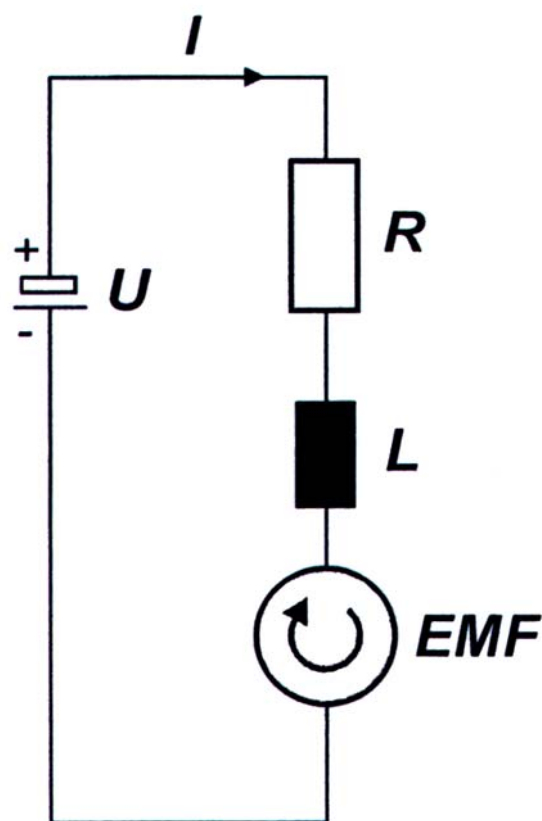
Obr. 2 Charakteristika malého asynchronního motoru



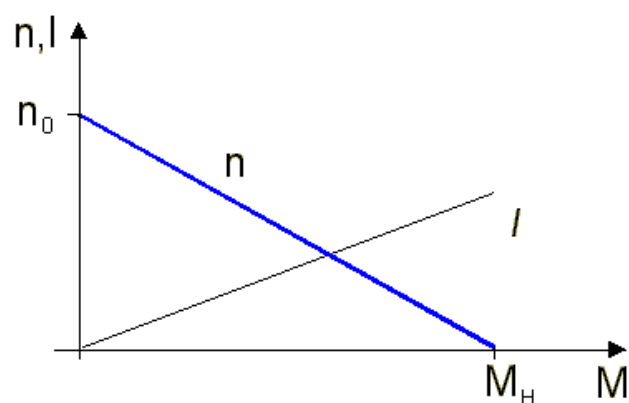
Obr. 5 Magnetické pole v komutátorovém motoru MAXON



Obr. 6 Vznik mechanického momentu ve vodičích rotoru stejnosměrného motoru. Proud v horních závitěch teče opačně než v dolních závitěch. Síla na vodič je úměrná magnetické indukci B ve vzduchové mezeře, délce vodiče l a proudu I . Síly na jednotlivé vodiče se sčítají



Obr. 7 Náhradního schéma komutátorového motoru se samonosným vinutím



Obr. 8 Charakteristika komutátorového motoru se samonosným vinutím

3. Vývoj malých dynamických stejnosměrných motorů

Malé stejnosměrné komutátorové motory vyšší třídy se samonosným rotorem bez železného jádra s vysokými dynamickými vlastnostmi a neobvykle dlouhou životností komutátoru s kartáči prošly ve světě intenzivním vývojem. Využitím nových magneticky tvrdých materiálů, nových technologií výroby samonosného rotoru, zavedením kondenzátorů do rotoru a optimalizací konstrukce došlo k výrazné miniaturizaci a zvýšení životnosti. Výsledkem je i aplikace těchto motorů švýcarského výrobce MAXON ve vesmírném programu NASA v minulých letech a v současnosti.

3.1. Přednosti samonosného vinutí rotoru

V minulé kapitole jsme z jednoduchých fyzikálních zákonů odvodili lineární závislost rychlosti motoru na napájecím napětí a lineární závislost mechanického momentu na proudu ve vinutí. Tyto příznivé regulační vlastnosti jsou u motorů se samonosným vinutím rotoru mnohem výraznější a ve větším rozsahu rychlostí než u klasických motorů s vinutím na železném jádru. Konstrukce obou typů motorů jsou na obr. 1 a obr.2.

Samonosné vinutí dodává motoru i další velmi podstatné vlastnosti, kterými vyniká nad klasickým motorem s vinutím na železném jádru. Stejnosměrný motor se samonosným vinutím rotoru Maxon je pro určitý výkon motoru menší a lehčí, neboť permanentní magnet je vložen do prostoru uvnitř dutého vinutí rotoru. Příčný rozměr dutiny, který je podstatný pro sílu magnetu, je dostatečný, aby magnet vyvolal potřebnou magnetickou indukci v mezeře s vinutím. Pro vnější část magnetického obvodu stačí tenký plášť motoru umístěný těsně nad vinutím, kde u klasického motoru jsou ještě vloženy permanentní magnety.

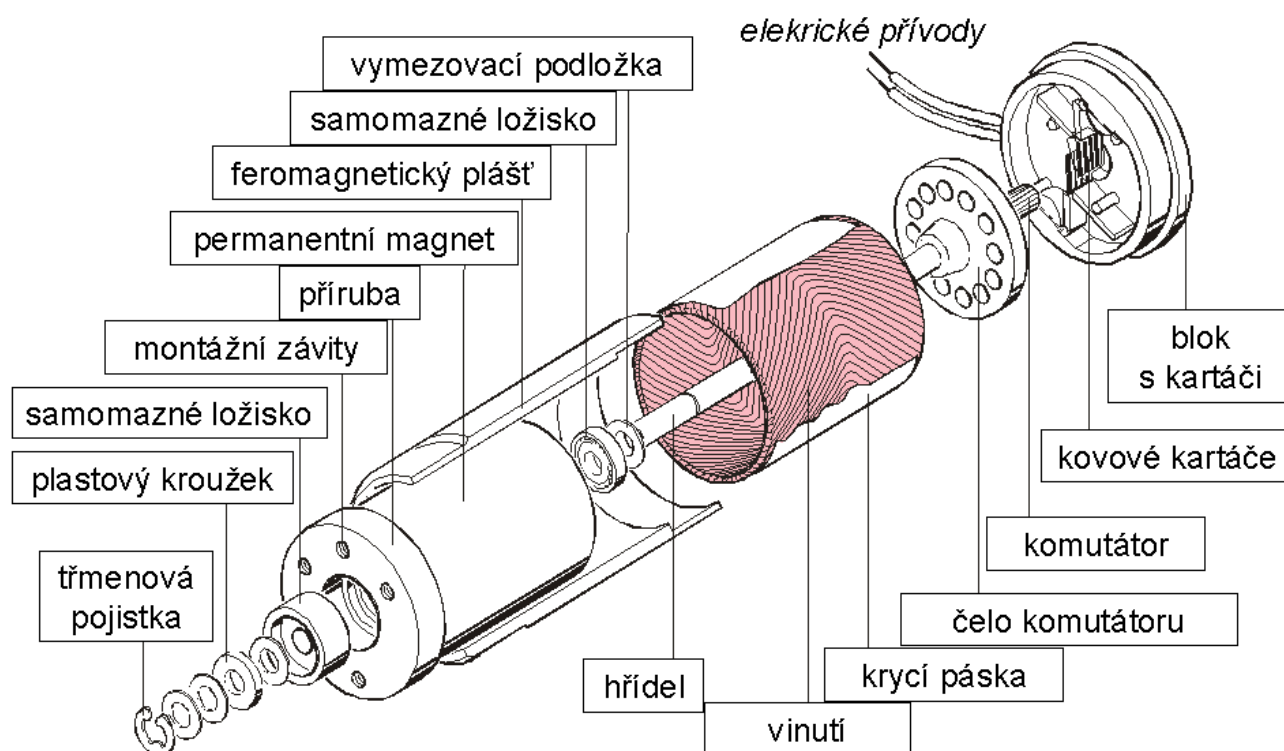
Motor se samonosným vinutím má mnohem delší životnost. Limitujícím prvkem pro životnost stejnosměrných motorů jsou kartáče a komutátor. Konec života stejnosměrného motoru je obvykle způsoben opálením kartáčů a hran lamel komutátoru jiskřením. Jiskry vznikají odpojováním segmentů vinutí při přechodu kartáčů na následující lamelu komutátoru. Proud v odpojované části vinutí vytvářel magnetické pole rotoru, které při odpojení této části zaniká. Jeho energie se mění na proud, který se uzavírá přes odcházející lamelu a kartáč jako elektrický oblouk. Energie zanikajícího magnetického pole u našeho motoru nezahrnuje energii v železném jádru, je podstatně nižší a jiskření je nepatrné. Pro extrémně vysokou životnost pohonů s rovnoměrným chodem použije Maxon kovové kartáče a mezi přívody segmentů vinutí k lamelám komutátoru umístí kondenzátory pro další omezení jiskření. Životnost komutace motorů Maxon je tak srovnatelná se životností samomazných ložisek. Kartáče motorů se během provozu nevyměňují, protože nejsou výrazným omezujícím článkem. S jejich opotřebením je zpravidla opotřeben mechanicky i komutátor a mazivo na jeho povrchu ztrácí své mazací vlastnosti.

Komutátor motorů Maxon s jedním vyvedeným koncem hřídele má velmi malý průměr komutátoru s nízkou obvodovou rychlostí a sníženým opotřebením.

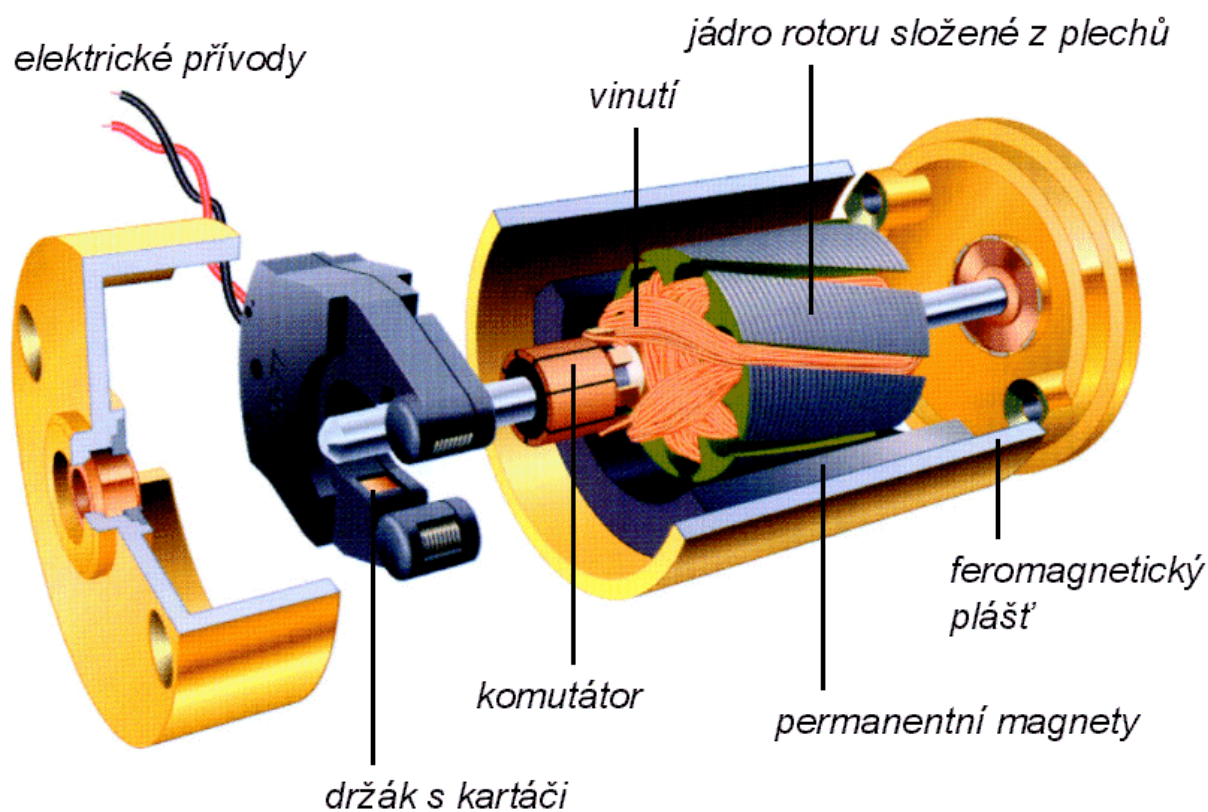
Komutace našeho motoru bez železného jádra nebrání zvýšit rychlost otáčení nad obvyklé 3000 až 5000 ot./min. na dvojnásobek až trojnásobek.

Samonosné vinutí má nízkou indukčnost a velmi nízkou elektrickou časovou konstantu. Reakce motoru na změnu napájecího napětí je okamžitá. Moment setrvačnosti rotoru je nižší o moment setrvačnosti jádra, takže i mechanická časová konstanta motoru je pouze několik ms až několik desítek ms, během kterých se pohon rozběhne na požadovanou rychlost.

3.2. Obrázky



Obr. 1 Stejnsměrný motor vyšší třídy se samonosným vinutím rotoru MAXON



Obr. 2 Klasický stejnosměrný motor

4. Životnost motorů

4.1. Kartáče a komutátor

Život konvenčních komutátorových motorů končí zpravidla opálením kartáčů. Život kartáčů komutátorových motorů se samonosným vinutím rotoru je mnohonásobně vyšší, jak jsme uvedli v minulé kapitole. Obr.1 ukazuje rozdíl tvaru kovových a grafitových kartáčů. Kovové kartáče jsou nastříhány na šířku komutátoru z vyobrazeného pásku ze slitiny drahých kovů stříbra, paladia a mědi.

4.2. Kovové kartáče

Kovové kartáče doléhají na válcový povrch komutátoru vlastní pružností. Malá přitlačná síla stačí pro dokonalý elektrický kontakt. Přechodový elektrický odpor kontaktu během otáčení motoru je malý a stejnoměrný. Malé je i mechanické brždění rotoru a proud při běhu naprázdno. Motor se navíc lehce rozběhne i po dlouhé době stání. Opalování kovových kartáčů a komutátoru elektrickými oblouky na přechodu mezi lamelami komutátoru je nepatrné vzhledem k velmi nízké indukčnosti vinutí kotvy rotoru bez železa. Vznik oblouku ukazuje obr.2.

Kovové kartáče umožňují použít k dalšímu zmenšení oblouků kondenzátory montované do čela samonosného vinutí a zapojené mezi lamely komutátoru. Je to metoda CLL (capacitor long life) firmy MAXON. Z obr.3 je patrná příčina sníženého jiskření metodou CLL. Vliv metody CLL na délku života je zřetelný z obr.4. Na svislé ose jsou nad sebou délky života jednotlivých motorů, kterých do zkoušky vstoupilo deset.

Současně je patrný vliv proudového zatížení na dobu života komutace.

Levý motor má nejvyšší přípustný trvalý proud 128 mA a byl zatěžován proudem 50 mA, tedy 39%.

Pravý motor má nejvyšší přípustný trvalý proud 372 mA a byl zatěžován proudem 250 mA, tedy 67%.

Důsledkem nízkého proudového zatížení levého motoru s CLL je délka života daleko přes 10,000 hodin.

Výběr velikosti motoru pro danou aplikaci je proto buďto ovlivněn převažujícím požadavkem na nízkou cenu, kdy volíme co nejmenší a nejlevnější motor plně vytížený nebo požadavkem na vysokou délku života. Pak volíme dražší předimenzovaný motor, ale ušetříme náklady na výměnu opotřebovaného motoru, které často mnohonásobně převyšují nárůst ceny většího motoru.

4.3. Grafitové kartáče

Grafitové kartáče, obr.5, doléhají na válcový povrch komutátoru podstatně větší plochou než kovové kartáče a přenesou vyšší proudy, ale vyžadují větší přitlačnou sílu. Způsobí vyšší mechanické brždění rotoru a vyšší proud při běhu naprázdno. Opotřebováním kartáčů vzniká grafitový prach, který znečistí vnitřek motoru, ale působí jako mazivo komutátoru.

Přechodový elektrický odpor kontaktu grafitových kartáčů během otáčení motoru je nestejněměrný a při malých prouděch roste. Průběh proudu během otáčení na obr.6 vykazuje ostré nepravidelné proudové špičky v porovnání s pravidelným průběhem proudu motoru s kovovými kartáči na obr.7. Amplituda zvlnění se snižuje s počtem lamel komutátoru. Počet lamel je jeden z ukazatelů kvality motoru. Důsledkem průběhů proudu je, že pouze motory s kovovými kartáči splňují mezinárodní limity elektromagnetického rušení.

Grafitové kartáče se použijí při velkých prouděch, jaké se vyskytují v aplikacích s častými rozběhy a provozem s krátkodobým přetížením velkými mechanickými momenty.

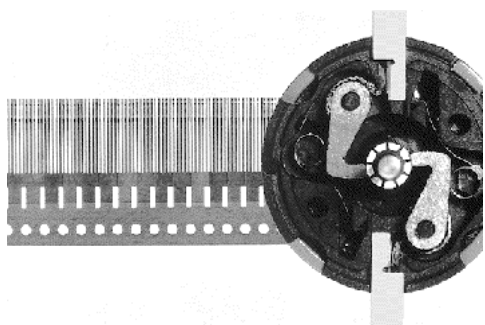
4.4. Kluzná samomazná ložiska

Jejich předností je nízká cena a malé rozměry. Doba jejich života je dostatečná v aplikacích, kde jsou podmínky pro vytlačení maziva z pórů sintrového ložiska a utvoření olejového filmu. To je splněno v provozu s vysokou a dlouhodobě stálou rychlostí a s nízkým radiálním zatížením, kdy je doba života ložisek srovnatelná s životem komutace.

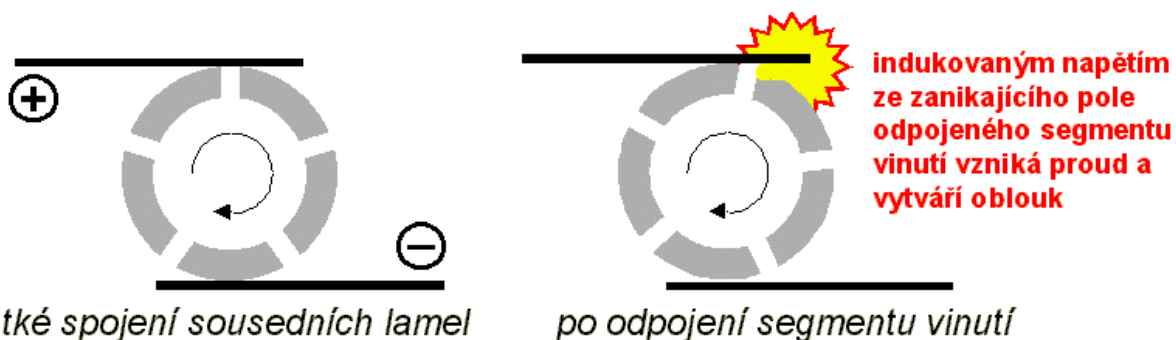
4.5. Kuličková miniaturní ložiska

Vydrží dlouhodobě i pomalé a nepravidelné otáčení. Jejich doba života zejména v těchto případech překračuje dobu života komutace.

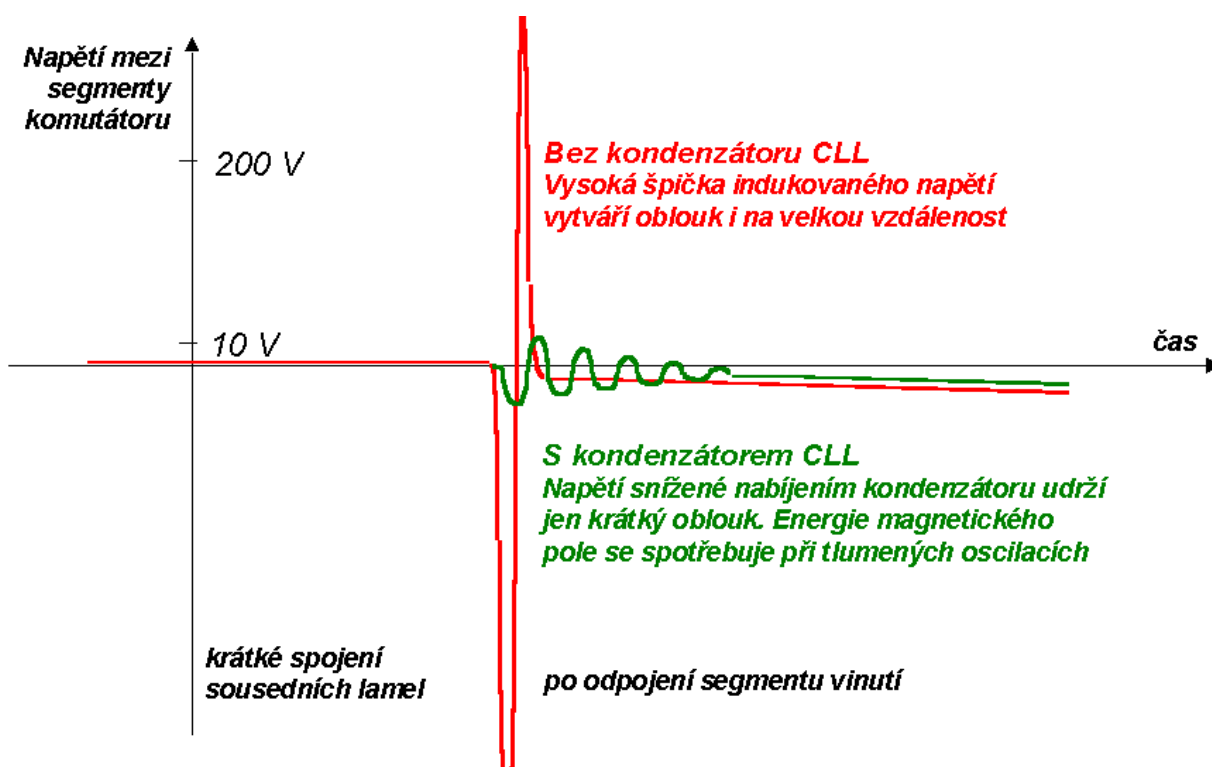
4.6. Obrázky



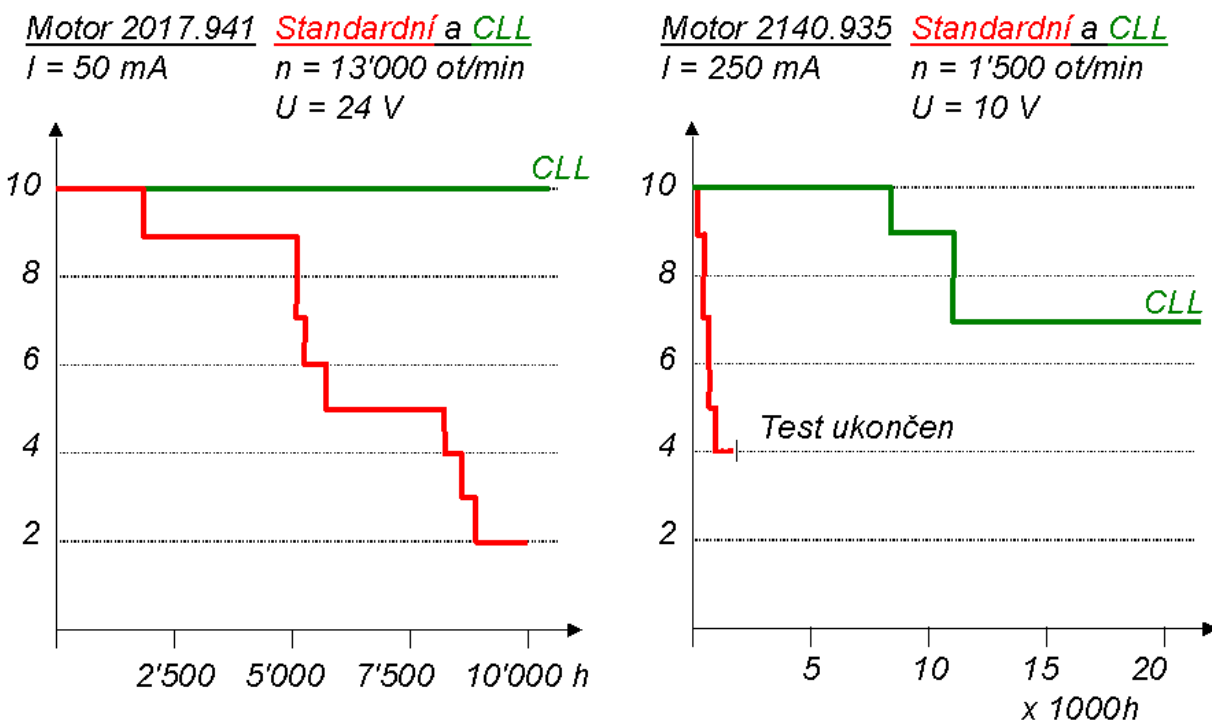
Obr. 1 Kartáče – kovové a grafitové



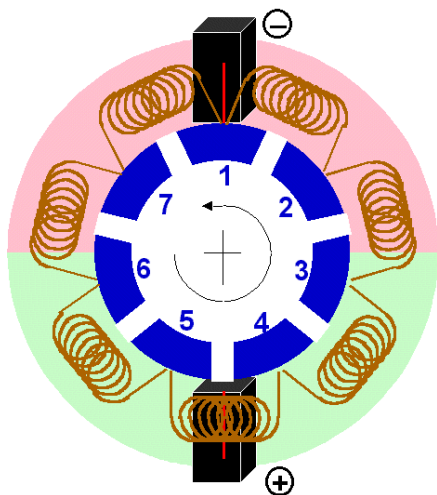
Obr. 2 Princip vzniku oblouku na lamelách



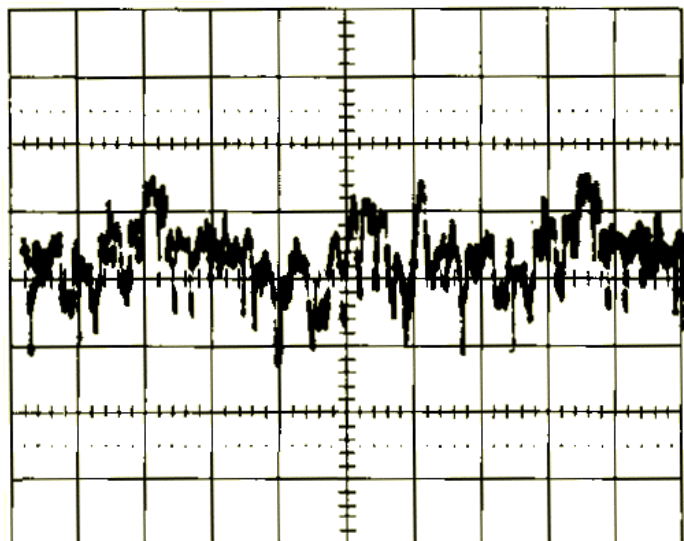
Obr. 3 Princip snížení jiskření pomocí CLL



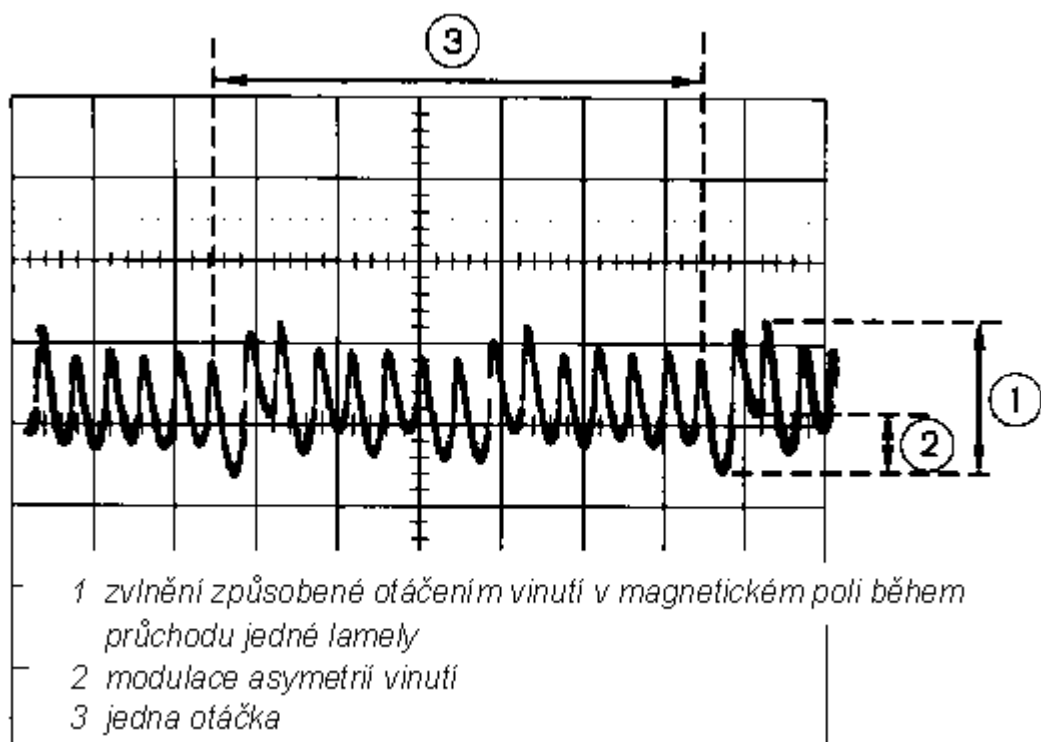
Obr. 4 Srovnání životnosti motorů při použití CLL



Obr. 5 Grafitové kartáče



Obr. 6 Průběh proudu grafitovými kartáči



Obr. 7 Průběh proudu kovovými kartáči

5. Výběr materiálu permanentních magnetů

5.1. Permanentní magnety

MAXON používá ve svých komutátorových motorech tři druhy permanentních magnetů, magneticky tvrdé ferity, slitinu Alnico a materiál ze vzácných zemin, obsahující neodym, železo a bor. Permanentní magnety se vyrábějí z magneticky tvrdých materiálů, které se liší od magneticky měkkých materiálů vysokou hysterezí. Hysterezní smyčka feromagnetického materiálu na obr.1 ukazuje, jak se mění velikost zmagnetování, magnetizace I uvnitř materiálu vloženého do vnějšího magnetického pole, jestliže jeho intenzitu H opakovaně plynule měníme do kladných i do záporných hodnot. Průběh magnetizace při růstu vnějšího pole podél bodů DEFA se liší od průběhu při zmenšování pole podél bodů ABCD. Magneticky tvrdé materiály se vyznačují vysokou hysterezí, tj. rozdílností obou částí smyčky a používají se na permanentní magnety. Hysterezní smyčka magneticky měkkých materiálů je úzká s nízkou hysterezí.

Permanentní magnet z feromagnetického materiálu se vložením do magnetického pole uvnitř cívky zmagnetuje, tj. jeho magnetické domény se orientují ve směru magnetického pole, uvnitř materiálu vznikne velká magnetizace I a na pólech magnetu se vytvoří vysoká magnetická indukce B . Magnetická indukce je zdrojem mechanické síly, kterou magnet působí např. na vodič protékající elektrickým proudem. Po zrušení vnějšího magnetického pole na nulu se magnetizace I uvnitř permanentního magnetu z velké části zachová jako remanence I_r , zatímco u magneticky měkkého materiálu téměř zanikne. Velikost remanence I_r je důležitá pro vytvoření magnetické indukce B v mezeře s vinutím motoru.

Magnetizace I se sníží účinkem opačného vnějšího magnetického pole. Při jeho dostatečné intenzitě, nazývané koercitivní síla H_c , se magnetizace I zmenší na nulu, neboť původní uspořádání magnetických domén v materiálu se zcela rozrušilo. Na obr.1 je toto odmagnetování znázorněno částí hysterezní smyčky z bodu B do bodu C. Tato část hysterezní smyčky se užívá jako základní informace o vlastnostech magneticky tvrdých materiálů a je zobrazena na obr.2. Měřítkem kvality magnetu je nejvyšší dosažitelná velikost součinu zbylé magnetické indukce B při odmagnetování vnějším magnetickým polem H .

Magnetizace materiálu magnetu a magnetická indukce na pólech se sníží i vytvořením vzduchové mezery pro samonosné vinutí v magnetickém obvodu motoru, ve kterém se magnet původně zmagnetoval. Porovnáním demagnetizačních křivek materiálů používaných MAXONem na obr.2 vidíme, že nejnižší magnetickou indukci při slabém odmagnetování má tvrdý ferit, vyšší Alnico a nejvyšší Neodym. Nejvyšší magnetická indukce magnetu z Neodymu vede k nejmenším rozměrům magnetického obvodu, vinutí i motoru. Typická uspořádání magnetů včetně vzduchové mezery jsou na obr.3, obr.4 a obr.5.

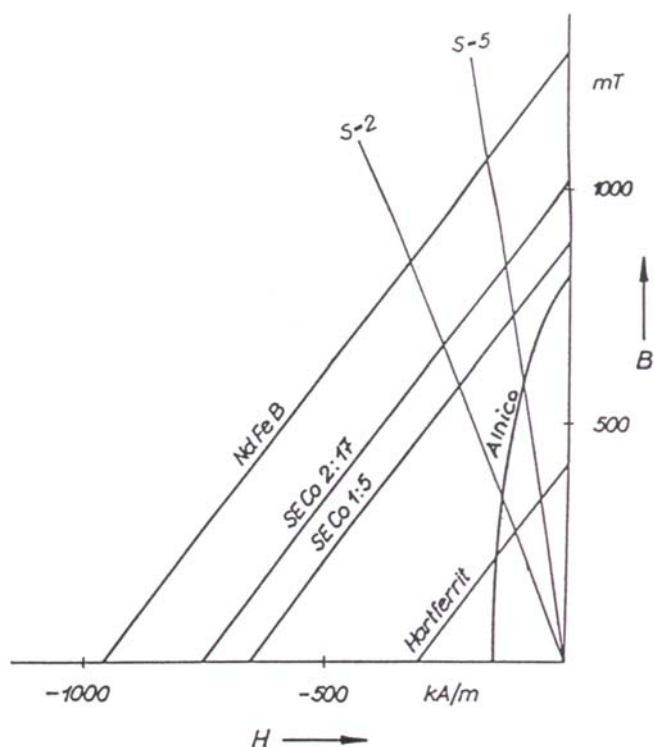
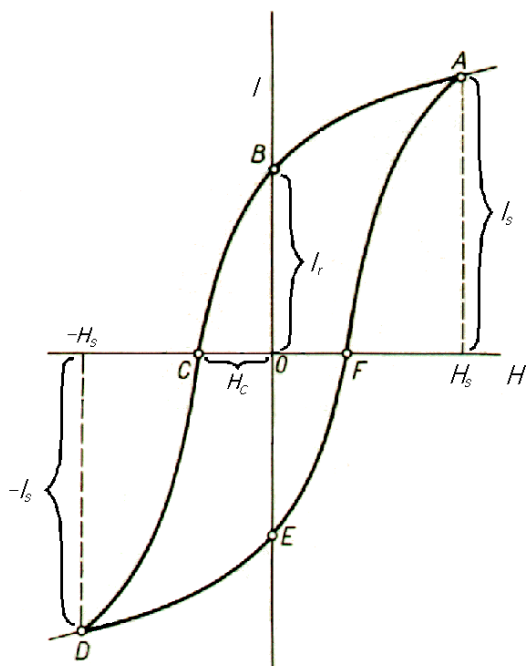
5.2. Optimalizace pohonu

Ceny uvedených magnetických materiálů na jednotku objemu rostou s kvalitou magnetizační křivky. To však neznamená, že by motory s ferity byly nejvýhodnější. Pro získání požadovaného krouticího momentu a výkonu mají motory s ferity větší rozměry a cena velkých součástí často překryje nižší cenu magnetu. Vliv materiálu magnetu na konstrukční parametry motoru ukazuje obr.6. Velké rozměry motoru s vyšší cenou se z konstrukčních důvodů obvykle přenesou i na převodovku. Častým rozhodujícím parametrem pro volbu druhu magnetu je omezený prostor, hmotnost, kde se použije motor řady RE. Motory s magnety z Alnica se uplatňují jako dobrý kompromis ceny a rozměrů, zejména modernizovaná řada A-max s automatizovanou výrobou.

Pro výběr optimálního typu motoru z cenového hlediska je třeba uvážit dvě nebo i tři varianty podle druhu permanentních magnetů, a to komplexně s převodovkou. Převodovky se vyrábějí jako planetové s nejvyšším přenášeným momentem, jako převodovky s předlohou a ve variantách

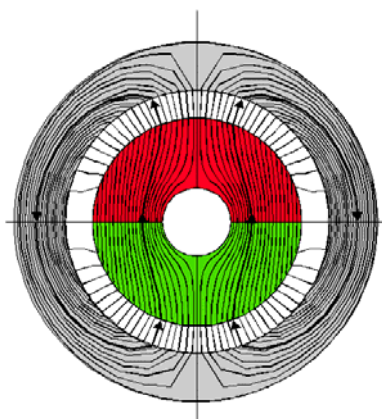
s vysoce odolnými keramickými čepy nebo naopak s plastovými koly. Typicky cenově výhodný je rozměrnější čtyřpólový pomaluběžný motor F 2260 podle obr.5 pro aplikaci, kdy se tím ušetří převodovka.

5.3. Obrázky

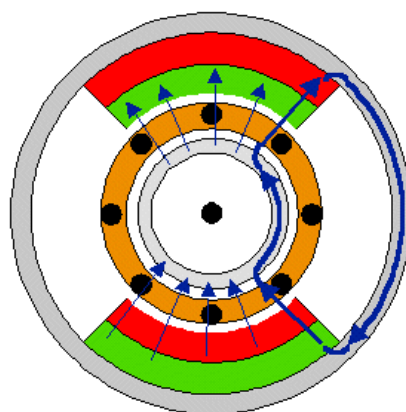


Obr. 1 Hysterezní smyčka feromagnetického materiálu

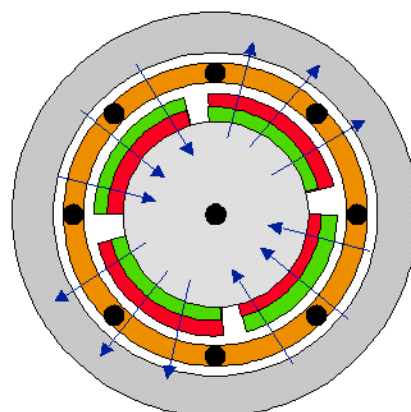
Obr. 2 Demagnetizační křivky permanentních magnetů



Obr. 3 DC motor typické umístění magnetu z neodymu v motoru MAXON řady RE a magnetu z Alnico v motoru MAXON řady A, S nebo A-max



Obr. 4 DC motor typické umístění magnetů z feritu ve dvoupólovém motoru MAXON řady F2130 nebo F 2140



Obr. 5 DC motor typické umístění magnetů z feritu ve čtyřpólovém motoru MAXON řady F2260

6. Použití převodovek

6.1. Typy převodovek

Převodovky MAXON se vyrábějí jako planetové s vysokým přenášeným mechanickým momentem nebo jako převodovky s předlohou. Pro nízké momenty existují levné varianty obou typů s plastovými koly. Postupně se zavádí výroba planetových převodovek s vysoce odolnými keramickými čepy.

6.2. Provedení převodovek

Uspořádání převodovek ukazují obr.1, obr.2 a obr.3. Převodovka s předlohou využívá k přenosu momentu v každém stupni jeden pár ozubených kol, planetová převodovka tři páry kol. Planetová převodovka přeneše proto vyšší moment. Vstupní pastorek obou typů převodovek je součástí motoru a zasune se do vstupního otvoru v převodovce při montáži pohonu. Další výhodou planetové převodovky je odstranění radiální zátěže hřídele motoru, který přenáší pouze mechanický moment.

6.3. Přiřazení převodovek k motorům

Převodovka tvoří s motorem konstrukční celek s vyváženými rozměry a výkonem. Ke každému motoru je možno vybrat převodovku z typů, které jsou k motoru přiřazeny v katalogu. Obdobná informace o přiřazených motorech je i na listu převodovky.

Obvyklý postup při návrhu pohonu vychází z požadovaného mechanického momentu a rychlosti na výstupu pohonu, které jsou rozhodující pro výběr velikosti převodovky a tím i pro výběr některého z přiřazených motorů podle jejich soupisu v katalogovém listu převodovky. Přitom se respektuje doporučená rychlost na vstupu do převodovky, tj. rychlost motoru a převodový poměr se zvolí tak, aby nebyla překročena. Doladění požadované rychlosti na výstupu je jednoduché díky snadnému ovládnutí rychlosti motoru velikostí napájecího napětí. Rychlost motoru přitom může být vyšší nebo nižší než jmenovitá, ale nesmí přesáhnout nejvyšší přípustnou rychlost danou typem motoru, která je pro všechny varianty jmenovitých napětí stejná.

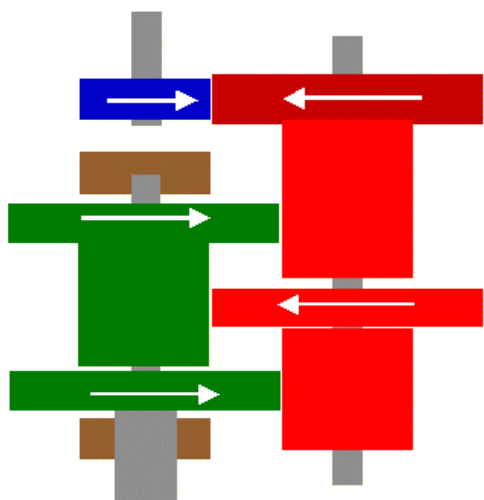
6.4. Vliv převodového poměru na výkon pohonu

Převodovka tvoří s motorem pohon. Výkon na výstupu pohonu je pro dané rozměry nejvyšší, jestliže je využit přípustný trvalý moment převodovky a nejvyšší doporučená rychlost na vstupu převodovky. Další podmínkou pro optimalizaci pohonu je použití motoru, který je schopen dávat trvale potřebný mechanický moment. Je to takový moment, který po vynásobení účinností převodovky a převodovým poměrem odpovídá přípustnému trvalému momentu převodovky.

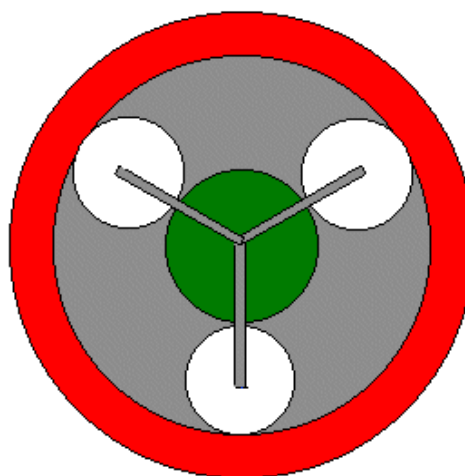
Trvalý mechanický moment motoru je omezen teplotní odolností vinutí motoru, tj. hlavně ohmickými ztrátami ve vinutí protékajícím proudem. Při určitém proudu jsou tyto ztráty stejně velké pro jakoukoliv rychlost motoru včetně nulové rychlosti. Při nulové rychlosti se veškerý příkon, tj. součin napájecího napětí a proudu, přemění v teplo. K získání vyšší rychlosti motoru při mezním trvalém proudu je potřeba zvýšit napájecí napětí. Výkon dodaný takto navíc se přemění na užitečný výkon motoru, kterým se motor neohřívá. Stejně vysoký je pro jakoukoliv rychlost i mezní trvalý mechanický moment motoru, neboť mechanický moment našeho motoru je svázán jednoznačně s proudem momentovou konstantou, jak jsme uvedli ve druhé kapitole.

Jestliže napětím snížíme rychlost motoru pod nejvyšší doporučenou rychlost na vstupu převodovky, nevyužijeme celý využitelný výkon motoru, ale můžeme použít převodovku s nižším počtem převodových stupňů a s nižší cenou.

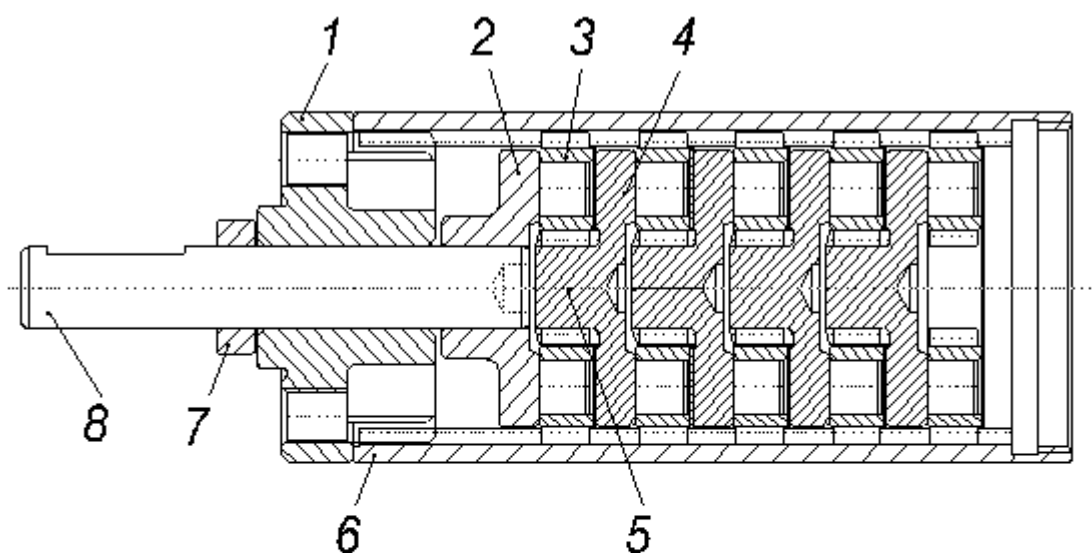
6.5. Obrázky



Obr. 1 Převodovka s předlohou



Obr. 2 Schéma jednoho stupně planetové převodovky



- | | | | |
|---|------------------------------|---|-------------------------|
| 1 | <i>výstupní příruba</i> | 5 | <i>centrální kolo</i> |
| 2 | <i>výstupní nosič planet</i> | 6 | <i>vnitřní ozubení</i> |
| 3 | <i>čep planety</i> | 7 | <i>zajištění polohy</i> |
| 4 | <i>nosič planet</i> | 8 | <i>výstupní hřídel</i> |

Obr. 3 Planetová převodovka

7. Elektronicky komutované stejnosměrné motory

7.1. Vývoj motorů EC

Základní myšlenka, která vedla k vývoji motorů EC (electronic commutation), je odstranit z komutátorových motorů, nazývaných motory DC (direct current), mechanický komutátorový systém, tj. kartáče a komutátor, který ve většině aplikací omezuje délku života stejnosměrného motoru. Komutátor je zdrojem elektromagnetického rušení a omezuje rychlost otáčení motoru. Současně je požadováno zachování význačných vlastností motorů DC, jakými jsou zejména několikanásobná přetížitelnost, velký záběrový moment, nízká časová konstanta a malé rozměry.

Stejný tlak na zvýšení délky života, snížení rušení a zvýšení rychlosti vedl i k vývoji nových technologií v oblasti motorů DC. Výsledkem jsou motory DC s rotorem bez železného jádra, kondenzátory integrované do rotoru a konstrukce komutátorů s minimálním průměrem, které posunuly parametry moderních motorů DC výrazně kupředu. Je třeba mít na paměti, že motory DC lze velmi jednoduše řídit i bez jakékoli řídicí jednotky pouhým připojením na napájecí napětí vhodné velikosti, neboť komutace motorů DC, tj. přepojování napájecího proudu do jednotlivých částí cívky rotoru, je zajištěna mechanickým komutátorem.

Malé bezkartáčové motory existovaly už v minulosti pod názvy servomotor, třífázový servomotor nebo střídavý AC motor, ale byly napájeny bez výjimky střídavým napětím se sinusovým průběhem. Stejnosměrné motory EC se začaly používat pouze ve zvláštních aplikacích, jako jsou ventilátory a videorekordéry s poháněnou magnetickou hlavou. V obou případech se požaduje konstantní rychlost v jednom směru, na kterou byly pohony nastaveny.

Uživatel moderního motoru EC neakceptuje omezení původních motorů EC, ale požaduje motor EC pracující v plném rozsahu rychlostí a mechanických momentů s vlastnostmi stejnosměrného motoru.

7.2. Ovládání motoru EC

K dosažení vlastností a charakteristiky motoru EC ekvivalentních vlastnostem motorů DC je třeba zachovat řízení vzájemné polohy magnetického pole statoru a magnetického pole rotoru. Odstranění komutátoru vyžaduje přemístit vinutí do statoru, aby bylo možné připojit jeho přírady k napájení. Permanentní magnet motoru EC je proto součástí rotoru. Přepínání napájecího proudu do jednotlivých částí vinutí obstarávají elektronické spínací obvody na základě informace o okamžitém úhlu natočení rotoru. Tato informace se získá ze tří Hallových sond, které jsou součástí statoru a jsou spínány zvláštním permanentním magnetem umístěným na rotoru. Směr magnetického pole statoru tak udržuje optimální úhel vzhledem k permanentnímu magnetu rotoru obdobně jako to obstarává mechanický komutátor motoru DC. Při zablokování hřídele se zastaví i směr magnetického pole statoru a působí vysokým záběrovým momentem.

7.3. Uspořádání motoru EC

Princip umístění vinutí ve statoru a permanentního magnetu v rotoru lze realizovat v motoru tvaru disku nebo ve tvaru válce.

Obr.1 a obr.2 ukazují konstrukci válcového motoru EC MAXON.

Permanentní magnet má dva póly a na jeho výrobu je použit materiál ze vzácných zemin NeFeB. Tak se minimalizují jeho rozměry a dosáhne se malá setrvačnost rotoru.

Vinutí statoru je patentované konstrukce MAXON a je rozděleno na tři sekce, které jsou elektronikou postupně napájeny proudem v kladném nebo záporném směru.

Jednodušší řídicí jednotky vytváří napájecí proud s obdélníkovým průběhem.

K elektronické komutaci, tj. ke změně napájení sekcí dochází 30° úhlových před a 30° za optimální polohou vzhledem k rotoru. Vzájemné natočení magnetických polí rotoru a statoru se během rotace

rotoru mění v uvedených mezích, než dojde k přepojení sekcí vinutí. V optimální poloze, kdy jsou směry magnetických polí kolmé, se vyvozuje nejvyšší mechanický moment a při odchýlení od ní klesá podle sinusovky, v našem případě nejvýše o 18%. Obdobný jev se uplatňuje i při mechanické komutaci v rozsahu jedné lamely komutátoru.

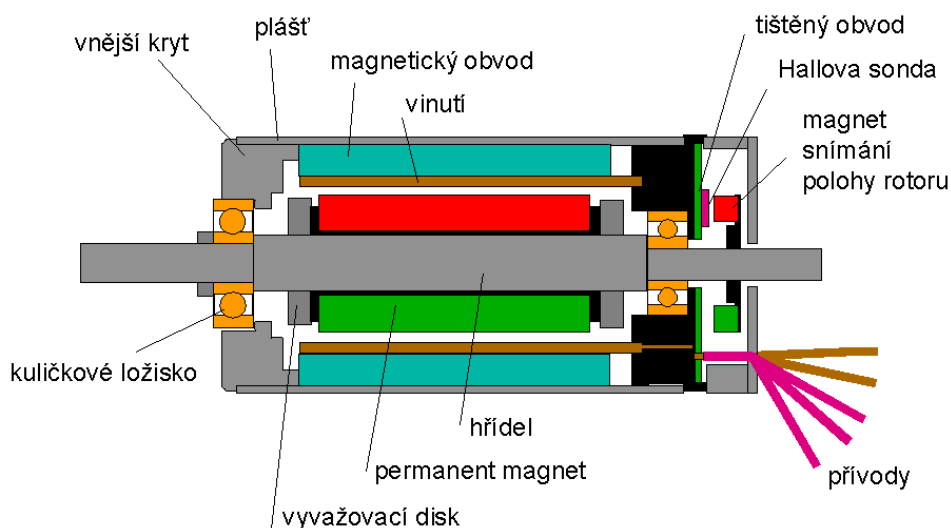
Složitější řídicí jednotky vytváří napájecí proud se sinusovým průběhem. Sinusová komutace odstraňuje kolísání mechanického momentu. Motor se doplní inkrementálním snímačem nebo resolverem.

Přepínáním proudu do sekcí vinutí vzniká proměnné magnetické pole, které se uzavírá vnějším magnetickým obvodem z vrstvených ocelových plechů. V magnetickém obvodu vznikají proměnným magnetickým polem ztráty vířivými proudy a hysterezní ztráty přemagnetováváním železa obvodu. Volba materiálu je vedena snahou o jejich minimalizaci, zejména u rychloběžných motorů s několika desítkami tisíc otáček za minutu, kdy jsou změny magnetického pole velmi rychlé. Nejmenší motor MAXON EC06 o průměru 6 mm má nejvyšší nároky na materiál magnetického obvodu, který silně ovlivňuje účinnost motoru.

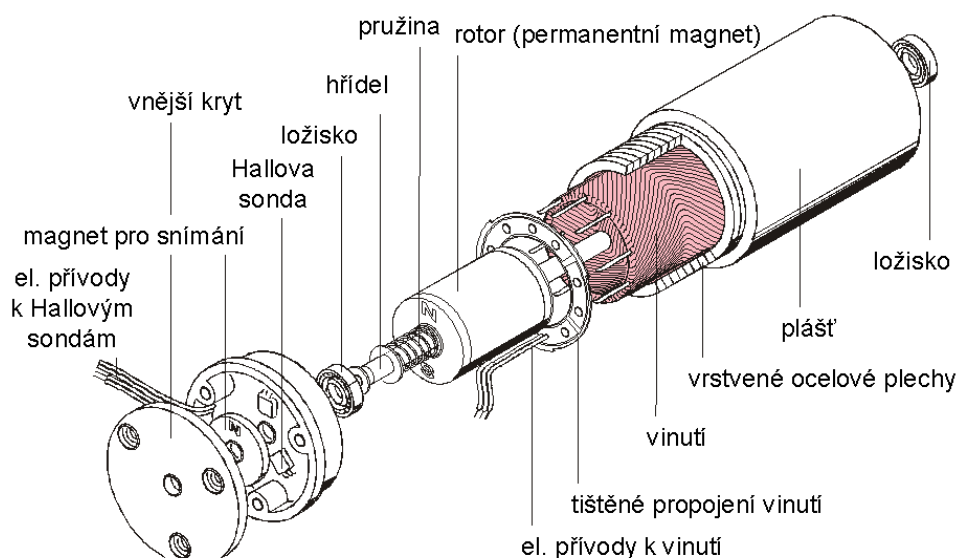
Plášť motoru není u většiny motorů určen k uzavírání magnetického toku, je hliníkový nebo ocelový. Miniaturní motory EC6 mají do pláště integrován i funkci magnetického obvodu

Motory MAXON jsou vesměs vybaveny kuličkovými ložisky s předpětím, která jsou jediným omezujícím činitelem délky života motoru.

7.4. Obrázky



Obr. 1 Typická konstrukce válcového motoru EC



Obr. 2 Složení válcového motoru EC

8. Převodovky s keramickými čepy

8.1. Doba života motoru

Doba života převodovky by měla být srovnatelná s dobou života připojeného motoru. Komutátorový motor podle vývodů v předcházejících kapitolách vydrží pracovat 100 hodin až několik desítek tisíc hodin podle typu kartáčů, ložisek, provozního zatížení a rychlosti. Život bezkartáčového motoru je omezen pouze kuličkovými ložisky na několik desítek tisíc hodin.

8.2. Doba života převodovky

Doba života převodovky by měla být srovnatelná s dobou života připojeného motoru. Převodovky MAXON se vyrábějí jako planetové nebo jako převodovky s předlohou, z kovu nebo z plastu, s kluznými nebo s kuličkovými ložisky. Na opotřebené převodovce lze identifikovat nejčastější kritická místa.

Kluzná samomazná ložiska nejsou vhodná malé rychlosti při velkém silovém zatížení, neboť se v nich nevytvoří olejový film a jejich póry se ucpou částicemi z otěru.

Plastová kola obsahují teflon a jejich život se nezkrátí vytlačení maziva ze styčných ploch. Přenesou ovšem nižší síly než kovová kola.

Čepy planet v planetových převodovkách a čepy předlohových kol v převodovkách s předlohou jsou upevněny nehybně, jsou vystaveny jednostrannému zatížení a opotřebí se dříve než vývrty planet nebo kol, které se na nich otáčejí. MAXON vyvinul čepy z keramického materiálu. Čepy ze směsi na bázi ZrO_2 se dnes tvarují kontinuálním vytlačováním prášku za vysoké teploty, dělí se, spékají a brousí. Vliv materiálu na odolnost opotřebení ukazuje obr.1 a obr.2. Na obr.2 jsou délkami sloupců znázorněny doby života pěti testovaných vzorků převodovek při stejných provozních podmínkách.

Postupně se zavádí výroba variant jednotlivých typů a velikostí planetových převodovek s vysoce odolnými keramickými čepy.

8.3. Aplikace keramiky v současně dodávaných převodovkách

Převodovky GP22C s průměrem 22 mm a GP26B s průměrem 26 mm používají keramické čepy ve všech stupních, které jsou za sebou seřazeny uvnitř pláště převodovky v počtu podle převodové-

ho poměru. Řez planetovou převodovkou MAXON je uveden v minulé kapitole. Převodovky GP32C s průměrem 32 mm a GP42A s průměrem 42 mm používají keramické čepy pouze na koncových stupních.

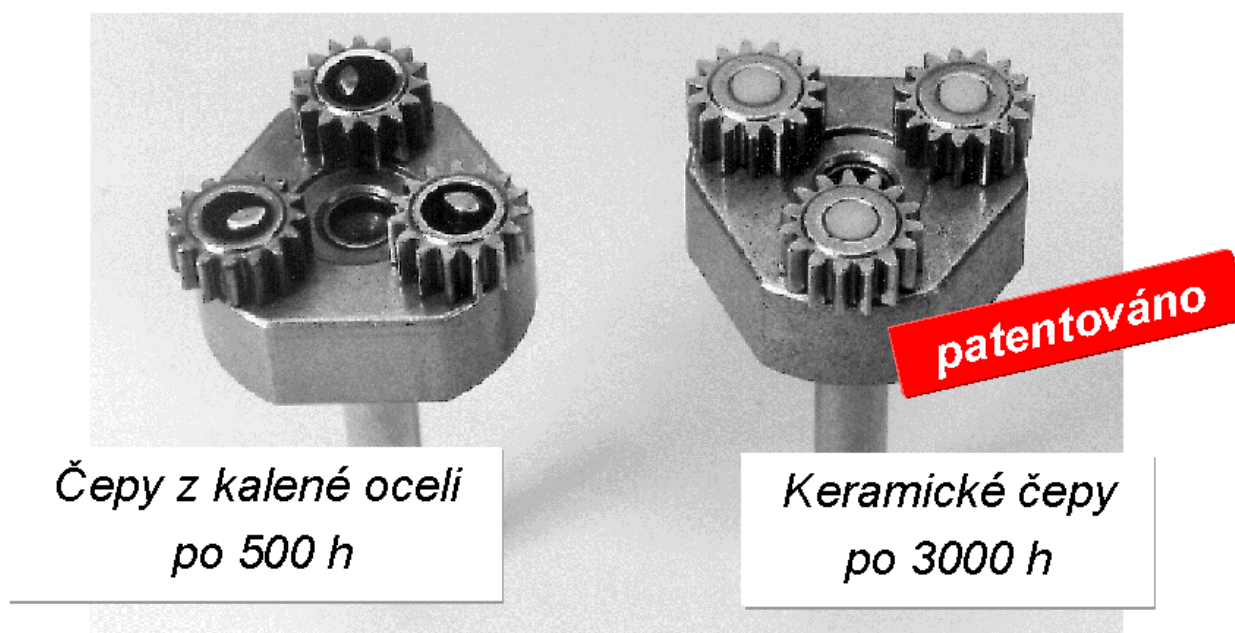
Přínos keramiky pro převodovku GP42A, která zcela nahradila původní převodovku tohoto průměru s ocelovými čepy, je ve zkrácení délky převodovky o několik desítek procent. Nejvyšší doporučená rychlost vstupního pastorku je dnes 8000 ot./min. oproti dřívějším 5000 ot./min. při stejném přípustném mechanickém momentu. Cena převodovky se přitom nezvýšila.

Přínos keramiky pro další převodovky je obdobný. Převodovka s keramikou je buď kratší nebo má při srovnatelných rozměrech vyšší dobu života nebo přenesení vyšší zátěže.

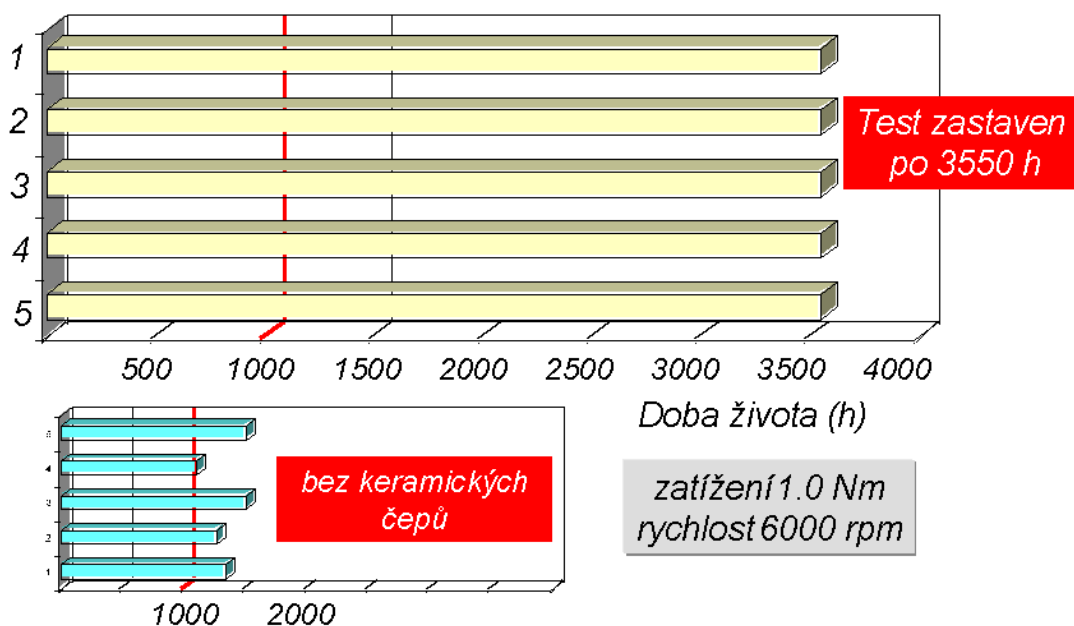
Často lze výběrem převodovky s keramikou o menším průměru dosáhnout zmenšení rozměrů pohonu při současném snížení ceny v porovnání s klasickou převodovkou.

8.4. Obrázky

*Opotřebení koncového stupně (5000 ot/min, 1Nm)
(na obrázku jsou nové planety)*



Obr. 1 Nosič planet převodovky s keramickými čepy



Obr. 2 Vliv keramiky na dobu života převodovky

9. Elektronicky komutované stejnosměrné motory

9.1. Odlišnost motorů EC od krokových a synchronních motorů

Z informace o konstrukci stejnosměrného motoru EC v kapitole 7 je zřejmé, že mechanické uspořádání všech tří typů motorů má mnoho společného. Neobsahují mechanický komutátor. Jejich délka života je dána životem ložisek. Vinutí ve statoru je rozdělené do několika fází, které jsou postupně napájeny elektrickým proudem. V rotoru je umístěn permanentní magnet, na který působí postupující magnetické pole statoru nebo u některých typů krokových motorů alespoň železné jádro s vytvořenými zuby, které se mohou postupně přitahovat k zubům navzájem přesazených sekcí statoru, jejichž vinutí jsou postupně napájena.

Motory EC obsahují navíc snímač o poloze rotoru a přepínání proudu je odvozeno od úhlu natočení rotoru. Jednoduché porovnání je na obr.1. Charakteristika motoru EC odpovídá charakteristice stejnosměrného motoru. Charakteristika synchronního motoru podle obr.1 je ve své horní části podobná charakteristice asynchronního motoru, ale bez skluzu. Motor při přetížení ztratí synchronizaci a zastaví se. Čárkovaný průběh platí pro rozběh motoru s pomocným vinutím v rotoru.

9.2. Oblasti provozu stejnosměrného motoru EC

Rychlostní charakteristika motoru EC na obr.1 ukazuje závislost rychlosti na zatížení motoru mechanickým momentem. Není z ní patrné, za jakých podmínek je možno využít nejvyšší moment, který je motor schopen vyvodit při malé rychlosti, tj. v pravé části charakteristiky. K posouzení podmínek pro zatěžování motoru slouží diagram oblastí zakreslených do souřadnicového diagramu této charakteristiky. Diagram na obr.2 platí pro charakteristiky všech variant jednoho typu motoru, které se liší průměrem drátu vinutí a počtem závitů v cívice. Cívky všech variant zaujímají stejný prostor, do kterého je umístěno více závitů tenkého drátu nebo méně závitů tlustého drátu. Ke každé variantě vinutí je přiřazeno jiné jmenovité napájecí napětí, odpovídá mu určitá klesající přímková charakteristika podle obr.1 a další parametry podle katalogu.

Pro napájení v trvalém provozu můžeme použít i nižší nebo vyšší napětí než je jmenovité, pokud se pracovní bod nachází v oblasti trvalého provozu. Pracovní bod je určen rychlostí a momentem

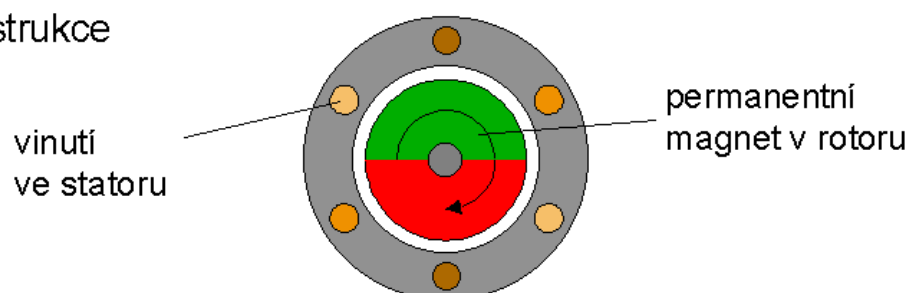
zátěže. Při napájení vyšším napětím se přímková charakteristika posune rovnoběžně nahoru k vyšším rychlostem.

Nejvyšší přípustný moment je pro určité vinutí svázán s proudem ve vinutí momentovou konstantou v mNm/A , ze které vyplývá i omezení trvalého proudu pro konkrétní vinutí. Pro posouzení přípustnosti konkrétního zatížení motoru proto stačí měřit proud. Rozsahy přípustného proudu pro různá vinutí jsou na obr.2 znázorněny pod diagramem a jsou přesně uvedeny v katalogu motorů. Vinutí tenkým vodičem má vyšší odpor a je označeno v obr.2 „vinutí A“. Vinutí B je navinuto silným vodičem.

Vynikající vlastnost stejnosměrných motorů je jejich velká krátkodobá přetížitelnost. Posouzení podmínek krátkodobého provozu je založeno na porovnání efektivního proudu s přípustným trvalým proudem, a to s ohledem na časovou konstantu akumulace tepla do vinutí.

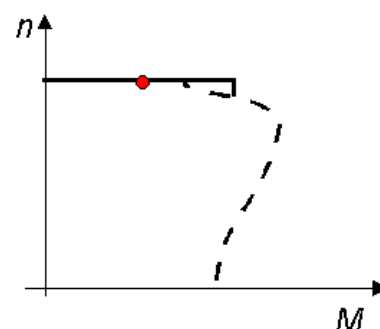
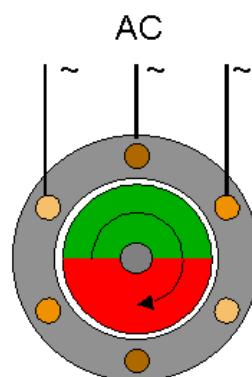
9.3. Obrázky

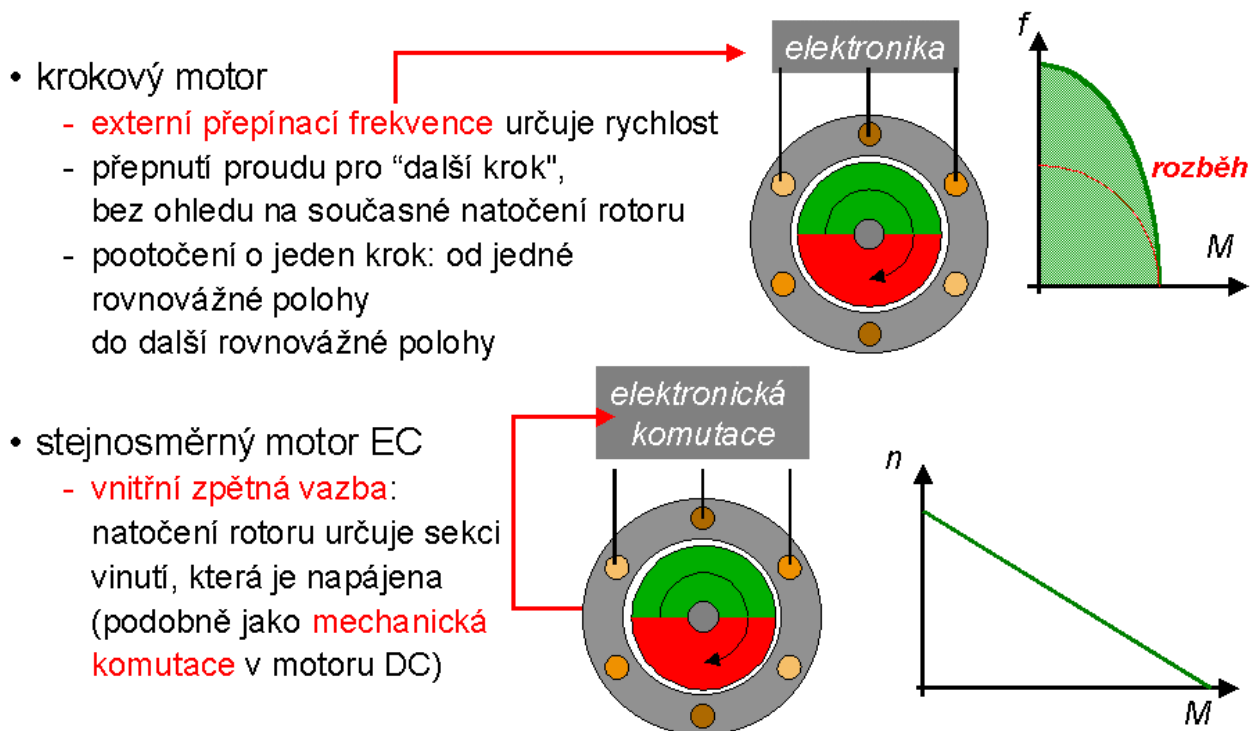
- Podobná konstrukce



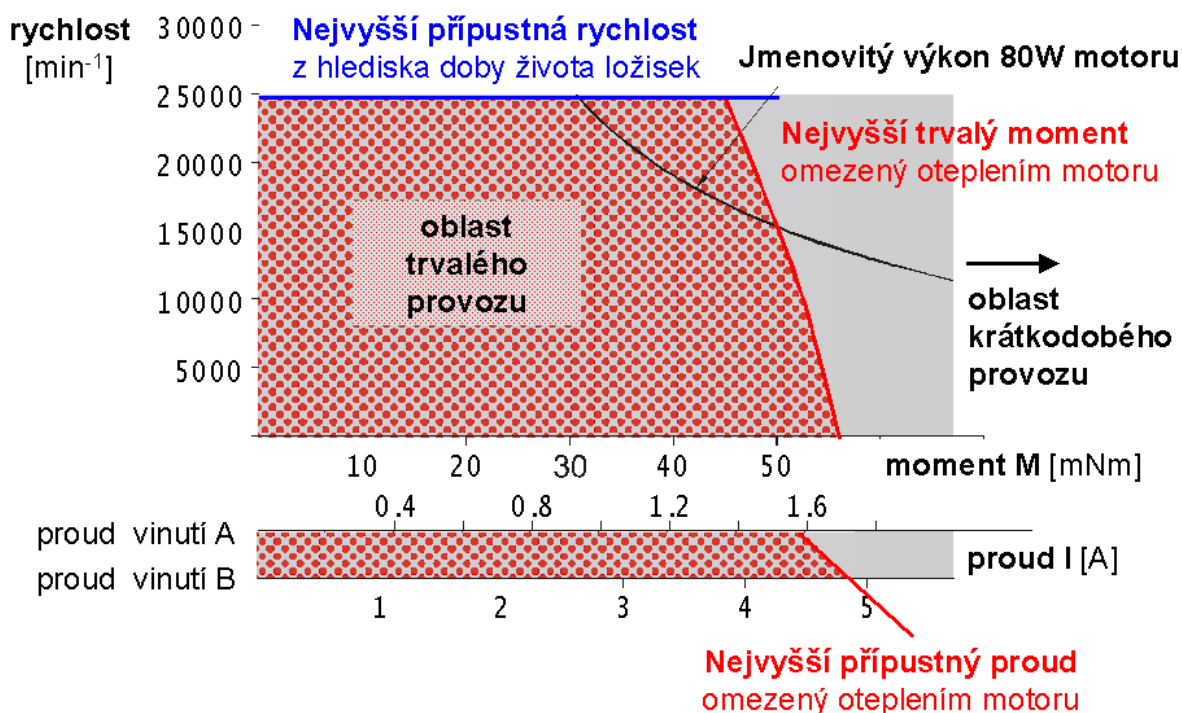
způsob řízení vytváří specifické vlastnosti pohonu

- synchronní motor
 - třífázové napájení
 - rychlost určena frekvencí externího napájení
 - obvykle 50 Hz (3000 ot/min)
 - nebo frekvencí měniče





Obr. 1 Stejná konstrukce a různá řízení synchronního motoru, krokového motoru a stejnosměrného motoru EC



Obr. 2 Oblasti provozu stejnosměrného motoru EC

10. Elektronicky komutované stejnosměrné motory

10.1. Vinutí stejnosměrného motoru EC

V sedmé a deváté kapitole jsme popsali konstrukci motoru EC. Na obr.1 znovu uvádíme schématický řez motorem. Rotor obsahuje permanentní magnet z Ne-Fe-B. Vinutí statoru je konstrukce MAXON převzaté z komutátorových motorů. Z obr.2 je patrné, že vinutí je rozděleno na tři sekce, mezi nimiž je přerušeno a vyvedeno je 6 vodičů. Na tři z nich je přiveden proud z napájecí jednotky. Přepínání proudu do jednotlivých přívodů je řízeno podle okamžité úhlové polohy rotoru, aby se dosáhlo význačných vlastností stejnosměrných motorů, popsaných v minulých kapitolách. Zbývající tři přívody jsou v motoru spojeny do hvězdy nebo do trojúhelníka podle obr.3.

10.2. Spojení do hvězdy nebo do trojúhelníka?

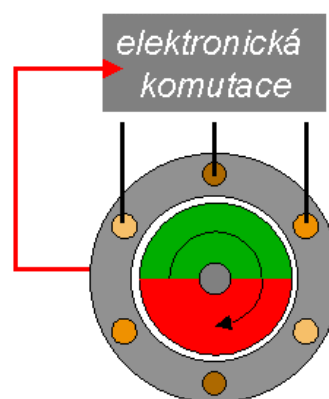
Obě zapojení mohou dát určitému motoru stejné mechanické vlastnosti na výstupu, ale vyžadují různá napětí a ovlivňují tak volbu napájecí a řídicí jednotky. Srovnání uvádíme na obr.4.

10.3. Průběh proudu do sekcí vinutí

- Obdélníkový průběh proudu je obvyklý u jednodušších napájecích a řídicích jednotek, které využívají pro řízení komutace signály o poloze rotoru ze tří Hallových sond. Schéma řízení je na obr.2. Obdélníková komutace dává motoru nerovnoměrný mechanický moment podle obr.5. Obr.6 ukazuje vznik signálu v Hallových sondách při otáčení zmagnetovaného disku na rotoru. Princip zapojení elektroniky je na obr.7.
- Sinusový průběh proudu odstraňuje nerovnoměrnost mechanického momentu s úhlem natočení rotoru. Jeho přínos je zřejmý z obr.8. Klasická řídicí jednotka se sinusovým výstupem využívá signál z resolveru. Nová jednotka Maxon využívá signály tří Hallových sond spolu se signálem inkrementálního snímače, který logickým obvodům jednotky umožňuje interpolovat a digitálně vytvářet sinusový výstup.

10.4. Obrázky

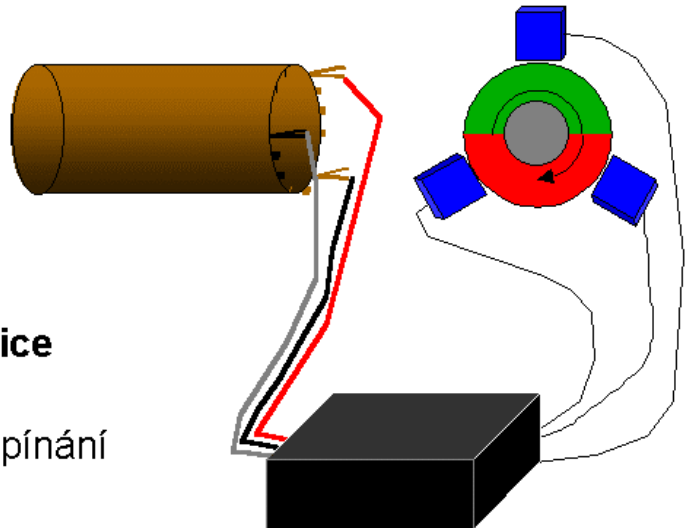
- **vnitřní zpětná vazba**: natočení rotoru určuje sekci vinutí, která je napájena (podobně jako **mechanická komutace** v motoru DC)



Obr. 1 Stejnosměrný motor EC

- **Komutace v motoru**

- 3 hallové sondy (na printu)
- 3 přívody vinutí
- snímání polohy rotoru z magnetovaný disk
 - dvoupólový
 - nasazený na hřídeli



- **Komutace v externí elektronice**

- logické obvody
- výkonové MOSFETY pro spínání

- **Kabely**

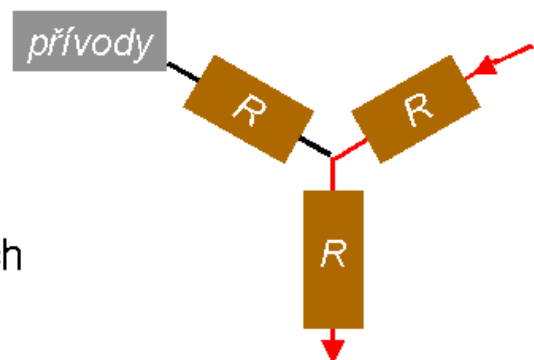
- signály Hallových sond
- napájení sond (+5V, zem)
- napájení motoru

Obr. 2 Obdélníková komutace

- vnitřní spojení tří sekcí vinutí

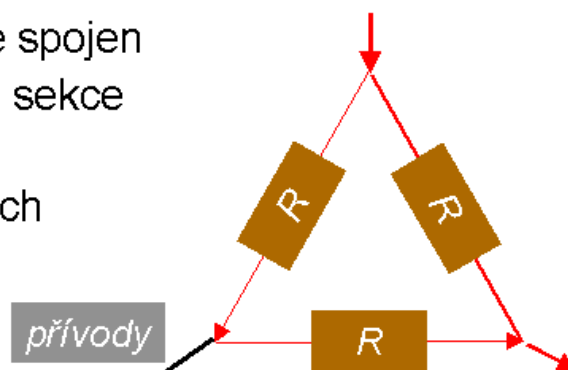
- hvězda (Y) :

- výstupy tří sekcí vinutí jsou spojeny do jednoho bodu
- odpor přívodů $2 R$
- proud vždy pouze ve dvou sekcích



- trojúhelník (Δ) :

- výstup jedné sekce je spojen se vstupem sousední sekce
- odpor přívodů $2/3 R$
- proud ve všech sekcích

Obr. 3 Vinutí: spojení do Y nebo do Δ

Konstanty motoru

- směrnice úbytku rychlosti se zatížením stejná

$$\left[\frac{\Delta n}{\Delta M} \right]_Y = \left[\frac{\Delta n}{\Delta M} \right]_{\Delta}$$

- ohmický odpor přívodů vyšší u hvězdy

$$R_Y = 3 \cdot R_{\Delta}$$

- hvězda má vyšší momentovou konstantu

- nižší proud pro dané zatížení
- nižší ztráty v elektronice
- výhodné pro většinu aplikací
- potřebné je vyšší napětí

$$k_{M,Y} = \sqrt{3} \cdot k_{M,\Delta}$$

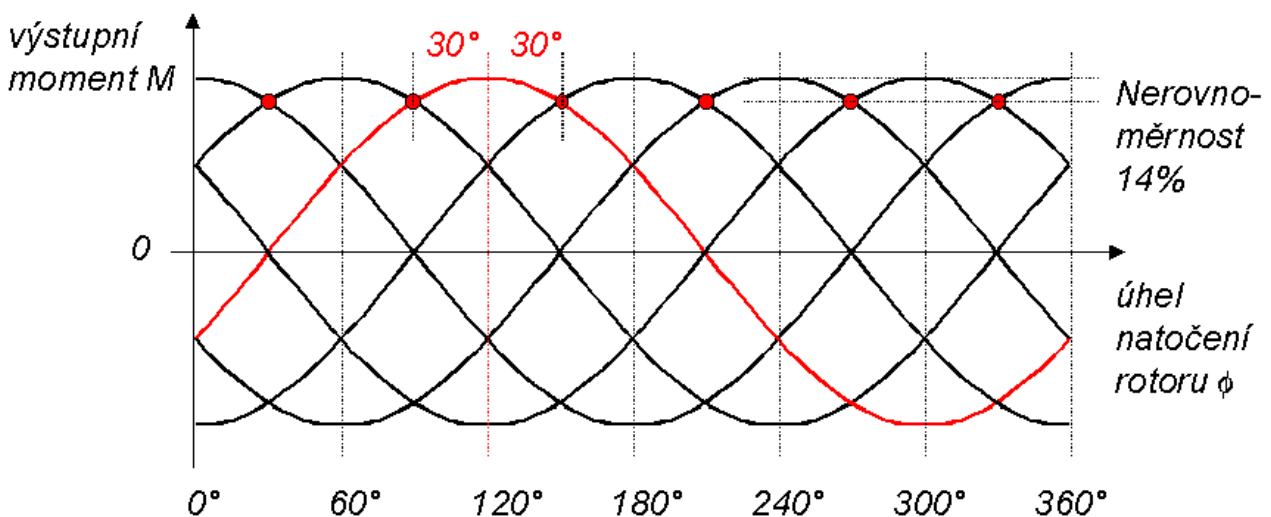
- trojúhelník má vyšší rychlostní konstantu

- vyšší rychlost při stejném napětí
- pro aplikace s vysokou rychlostí
- potřebný je vyšší proud

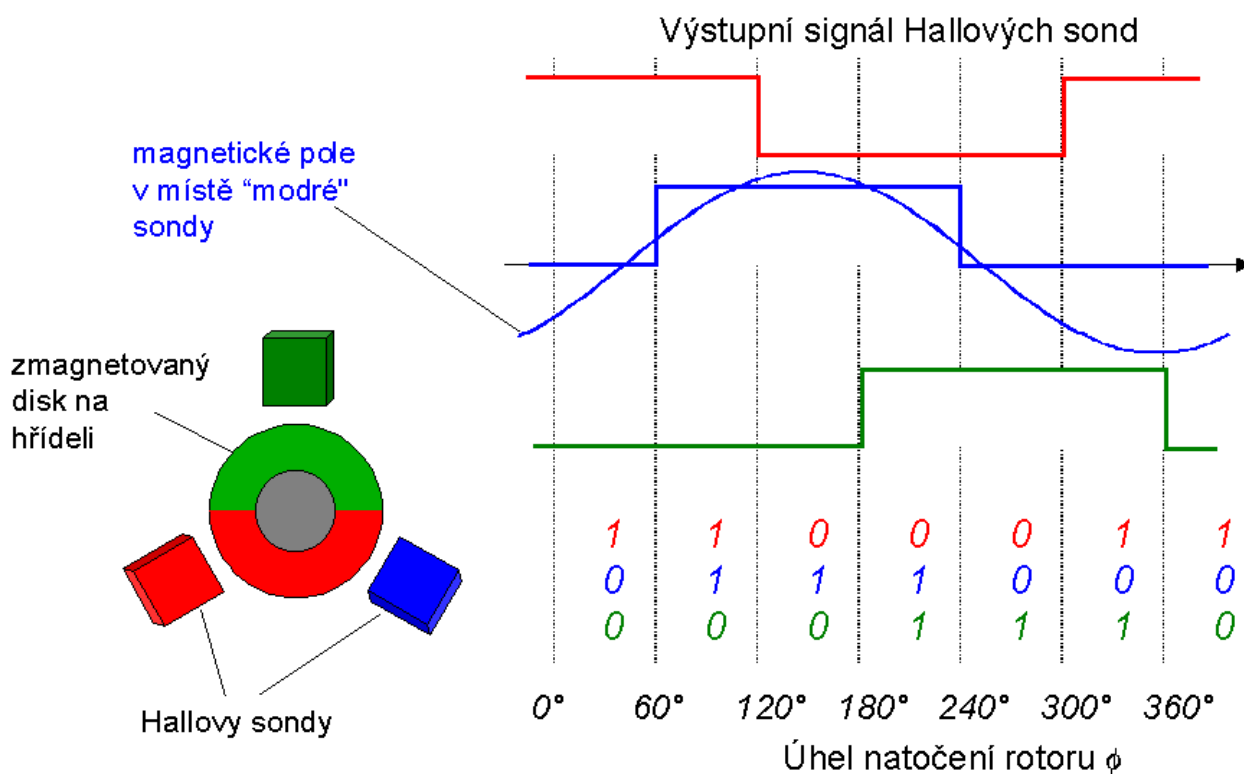
$$k_{n,Y} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot k_{n,\Delta}$$

Obr. 4 Vinutí Y nebo Δ

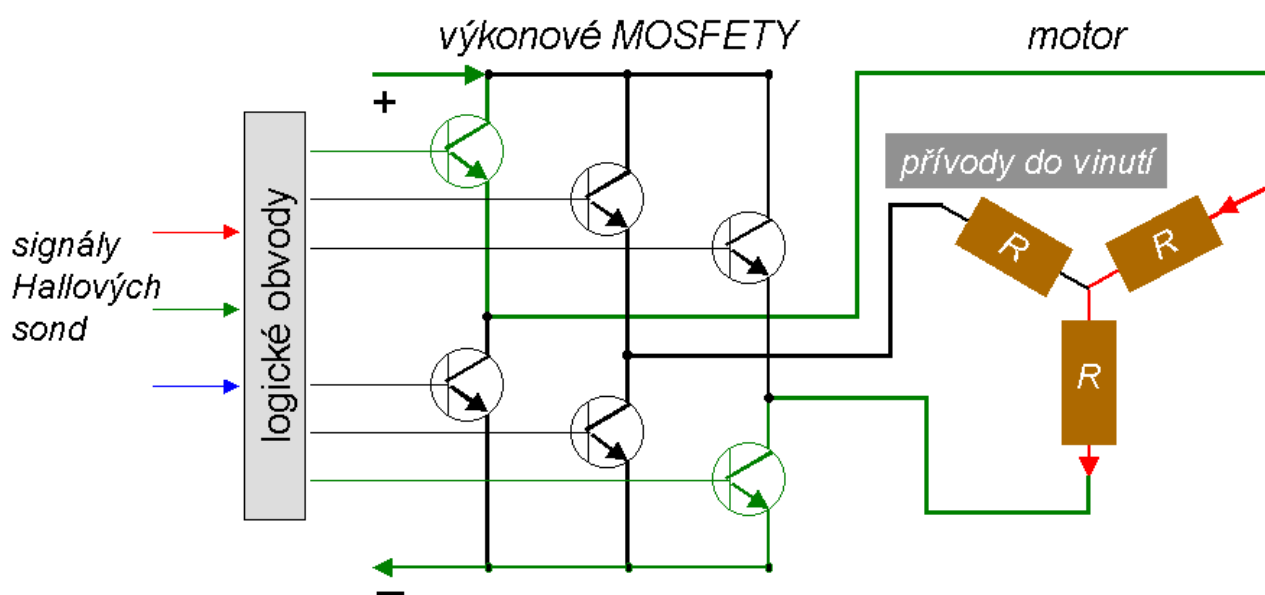
- provoz blízko maximálnímu mechanickému momentu
- komutace 30° před a 30° po kolmé poloze magnetických polí
- sinusový průběh mechanického momentu
- výsledek: nerovnoměrnost momentu 14%



Obr. 5 Nerovnoměrnost mechanického momentu při obdélníkové komutaci



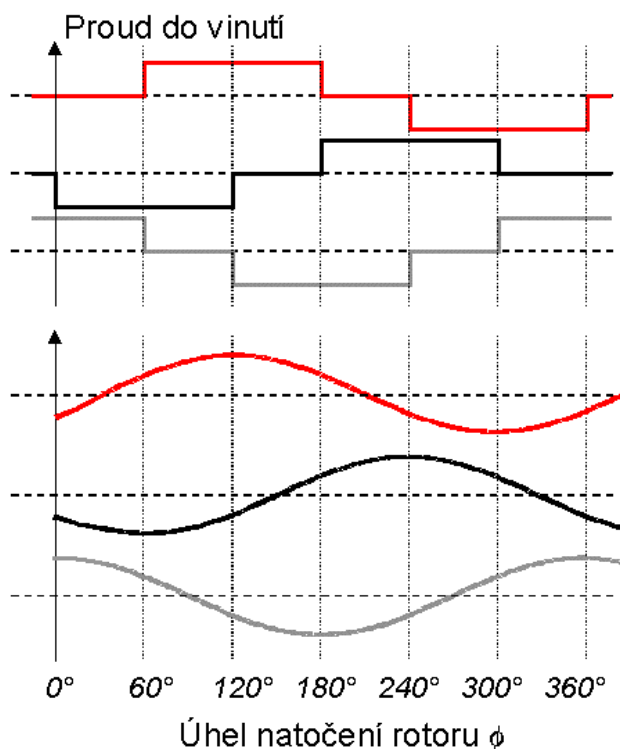
Obr. 6 Obdélníková komutace: snímání polohy rotoru



- zesilovač se 6 MOSFETY
 - bipolární technologie
 - "trojitá" můstková struktura

Obr. 7 Elektronika obdélníkové komutace

- Obdélníková komutace
 - změny proudu: skokem
 - kolísání momentu: 14 %
 - poloha rotoru snímaná Hallovými sondami
- Sinusová komutace
 - změny proudu: plynulé
 - obdoba třífázového napájení proměnnou frekvencí
 - kolísání momentu: teoreticky 0 %
 - poloha rotoru musí být známa přesně: resolver nebo inkrementální snímač



Obr. 8 Obdélníková nebo sinusová komutace

11. Řízení malých stejnosměrných motorů

11.1. Řízení motoru s otevřenou a s uzavřenou smyčkou

Základní schéma podává obr.1. Požadovanou veličinou je požadovaná rychlost výstupního hřídele nebo jeho natočení. Soustavou se zde rozumí zesilovač vstupní veličiny a motor případně doplněný převodovkou a snímačem. Výstupní veličinou je rychlost výstupního hřídele nebo jeho natočení.

11.2. Řízení motoru DC s otevřenou smyčkou

Obr.2 ukazuje aplikaci otevřené řídicí smyčky pro motor DC a EC. Nejjednodušší napájení motoru DC je připojení stejnosměrného napětí zvolené polarity a velikosti přímo na vstupní svorky motoru DC. Napětí plní zároveň funkci požadované veličiny, neboť rychlost motoru DC bez zatížení je určena napájecím napětím. Při zatížení motoru mechanickým momentem se sníží rychlost podle uvedené přímkové charakteristiky.

Stejná závislost rychlosti motoru DC na řídicím napětí a na zatížení vznikne při napájení motoru řídicí jednotkou MAXON LSC, pokud je přepnuta na režim U_{adj} . Jednotka v tomto režimu udržuje na vstupu motoru konstantní napětí úměrné řídicímu slaboproudému signálu na svém vstupu.

11.3. Řízení motoru EC s otevřenou smyčkou

Nejjednodušší miniaturní hybridní řídicí jednotka MAXON vytváří ze vstupního stejnosměrného napětí obdélníkové napájecí impulsy do sekcí vinutí motoru a tak nahrazuje mechanický komutátor. Rychlost motoru naprázdno je úměrná vstupnímu napájecímu napětí, ale pouze v rozsahu od určitého napětí, které je nutné pro napájení vlastní elektroniky řídicí jednotky. Nižší rychlost nelze do-

sáhnout. Směr otáčení lze na jednotce zvolit. Rychlost se snižuje se zatížením podle uvedené přímkové charakteristiky.

11.4. Obecné řízení pohybu motoru s uzavřenou smyčkou

Složitější řídicí jednotky MAXON umožňují řízení rychlosti i polohy motorů DC i motorů EC podle obecného schéma na obr.3. Motor je zpravidla z jedné strany vybaven snímačem rychlosti nebo natočení a z druhé strany je přímo nebo přes převodovku připojeno zatížení. Připojení snímače na motor, nikoli na výstup z převodovky, zjednodušuje dynamiku řízení, neboť do řídicí smyčky není zahrnut vliv mechanické vůle převodovky a vliv pružnosti spojení. Při řízení rychlosti lze v aplikacích s nižšími nároky na přesnost řízení použít motor bez snímače a řídicí jednotku přepnout na režim řízení metodou $l \times R$.

Na obr.3 je znázorněno řízení nadřazeným personálním nebo průmyslovým počítačem, který může vyhodnocovat stav celého zařízení a dávat zvolené řídicí jednotce MAXON povely pro řízení rychlosti nebo řízení polohy.

Přehled řídicích jednotek MAXON je na obr.4.

11.5. Obrázky

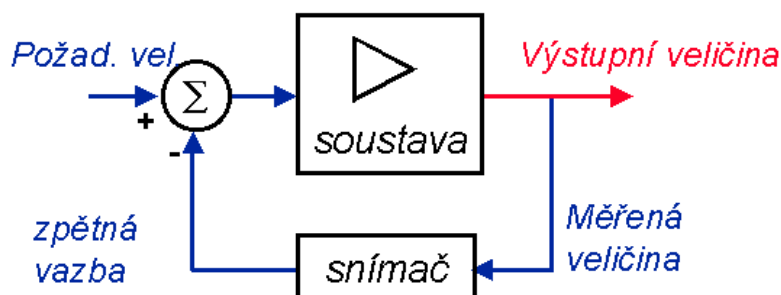
- **otevřená smyčka**

- bez zpětné vazby
- výstup se neměří a nehodnotí



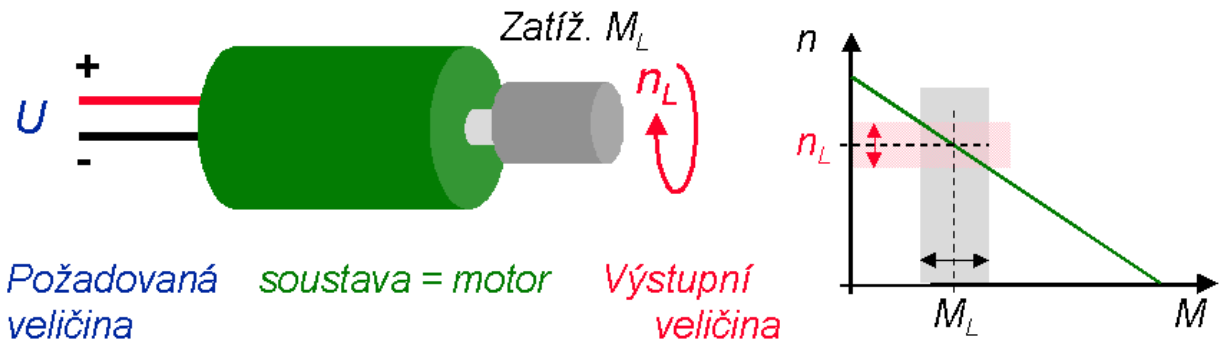
- **uzavřená smyčka**

- smyčka zpětné vazby
- výstupní veličina se měří a pak se upraví vstupní veličina do řídicí jednotky



Obr. 1 Řízení otevřenou smyčkou nebo uzavřenou smyčkou se zpětnou vazbou

- motor DC napájený konstantním napětím

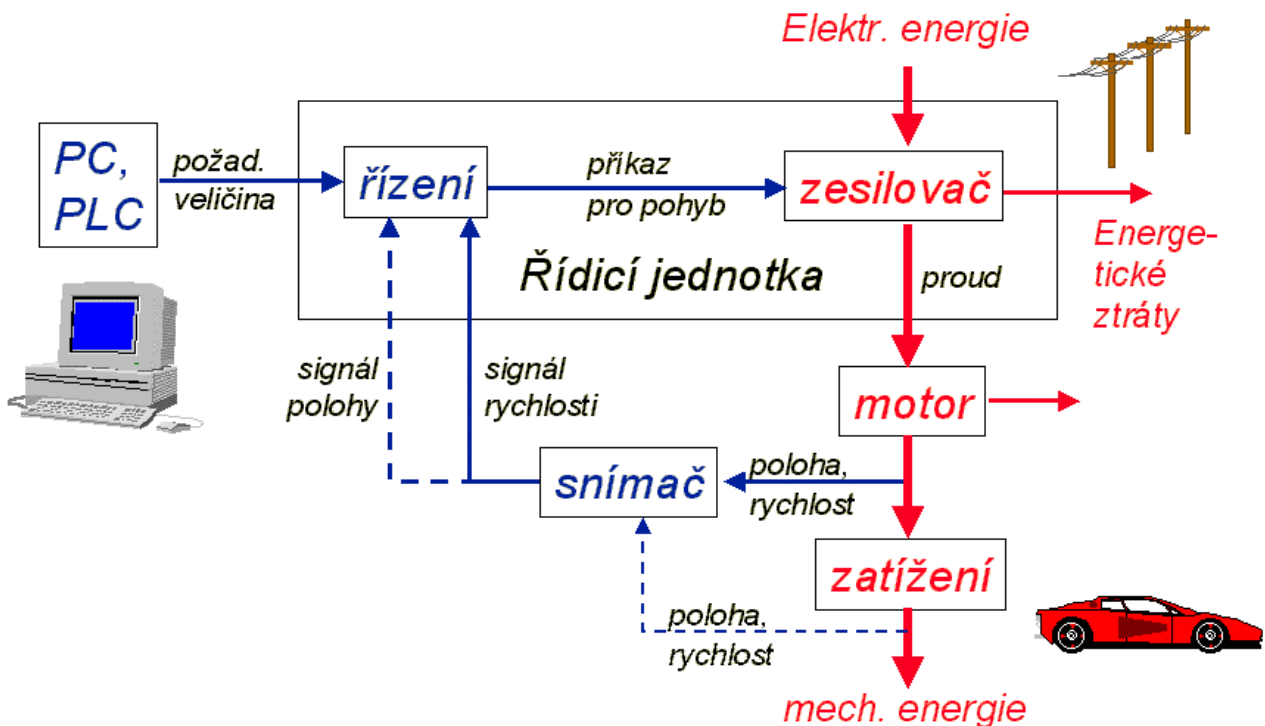


- další typický příklad: krokový motor s řídicí jednotkou

- požad. veličina : požadované kroky
- soustava: řídicí jednotka a motor
- výstupní veličina: kroky



Obr. 2 Příklady soustav s otevřenou smyčkou



Obr. 3 Řízení pohybu: servosystém

Snímač na motoru	Řídící jednotky rychlosti				
	DC	mód	řízení	EC	řízení
Bez snímače	LSC	I×R	4-Q	AEC 35/3	1-Q
	ADS	I×R	4-Q		
Tachodynamo	LSC	Tacho	4-Q		
	ADS	Tacho	4-Q		
Inkrementální snímač	LSC	Encoder	4-Q		
	ADS	Encoder	4-Q		
Hallovy sondy				DEC	1-Q
Hallovy sondy + inkrementální snímače				DES	4-Q
	Řídící jednotky polohy				
Inkrementální snímač	PCU MIP10 MIP50				
Hallovy sondy + inkrementální snímač				MIP50	

Obr. 4 Přehled řídicích jednotek

12. Řízení malých stejnosměrných motorů EC bez snímače polohy rotoru

Nové řídicí jednotky umožňují napájet i levnější motory EC bez Hallových sond. Řízení dosahuje nižší parametry při rozběhu a v malých rychlostech.

12.1. Náhrada Hallových sond

Základní schéma podává obr.1. Při otáčení permanentního magnetu v rotoru se mění magnetické pole v sekcích vinutí a indukují se v nich proměnná elektromotorická síla EMS. Řídící jednotka snímá její průběh a použije jej pro identifikaci polohy rotoru, podle které řídí obdélníkový proud do sekcí vinutí.

Za klidu rotoru a při malé rychlosti nemůže jednotka dokonale pracovat a parametry motoru v této oblasti jsou zhoršeny.

Uzel spojující konce vinutí tří sekcí cívky není u všech motorů vytvořen nebo není vyveden. Řídící jednotka proto snímá EMS z náhradního uzlu z jednotce, znázorněného na obr.2.

12.2. Motory EC bez snímačů

Obr.4 podává přehled motorů EC MAXON. Kromě válcových motorů obsahuje i diskové motory a motory s integrovanou řídicí elektronikou. Válcové motory EC22 s výkonem 20W a 50W a všechny uvedené diskové motory se dodávají i ve variantách bez snímačů, tj. bez Hallových sond.

12.3. Diskové motory EC

Obr.5 ukazuje řez diskovým motorem EC. Diskový motor má plochý tvar vhodný pro řadu rozměrově omezených aplikací. Permanentní magnety rotoru jsou umístěny na prstenci vně cívek statoru. Rotor má více pólů než rotor válcových motorů. Rychlost diskových motorů je proto 4x resp. 8x nižší a mechanický moment vyšší. Motor může často pracovat bez převodovky.

12.4. Integrovaná řídicí jednotka v motoru

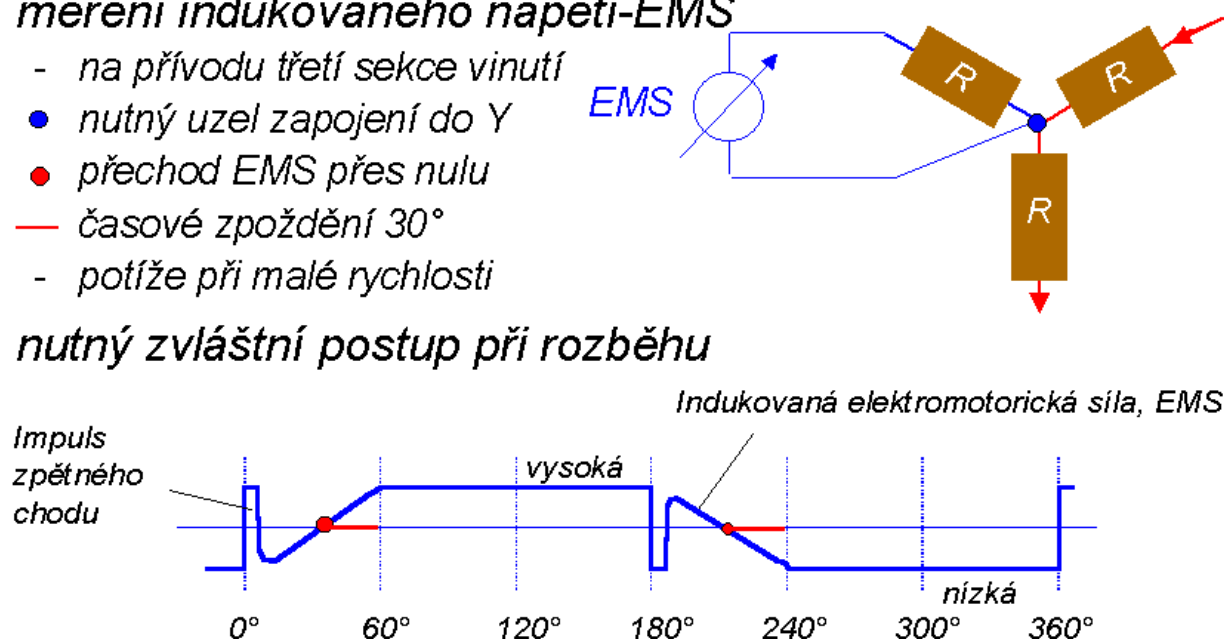
Na obr.2 je řídicí jednotka v externí jednotce. Válcové motory EC22 s Hallovými sondami existují i ve variantách s řídicí elektronikou na hybridním obvodu umístěném v motoru. Omezené chlazení neumožňuje využít plný výkon motorů, ale v určitých aplikacích je rozhodující malý rozměr celé jednotky a zmenšený počet přívodů.

12.5. Aplikace motorů EC s různým řízením

Obr.3 podává přehled vlastností tří způsobů řízení motorů EC. Komutace s využitím snímače s Hallovými sondami využívá plně možností motorů EC a dává jim dynamické vlastnosti stejnosměrných motorů pro náročné aplikace. V následující kapitole uvedeme přehled vlastností nové řady řídicích jednotek MAXON motorů EC. Motory se snímači s Hallovými sondami se uplatní s jednotkami v jednokvadrantovém řízení. Jednotky s čtyřkvadrantovým řízením mají sinusový výstup a vyžadují vstup z Hallových sond doplněný signálem inkrementálního snímače.

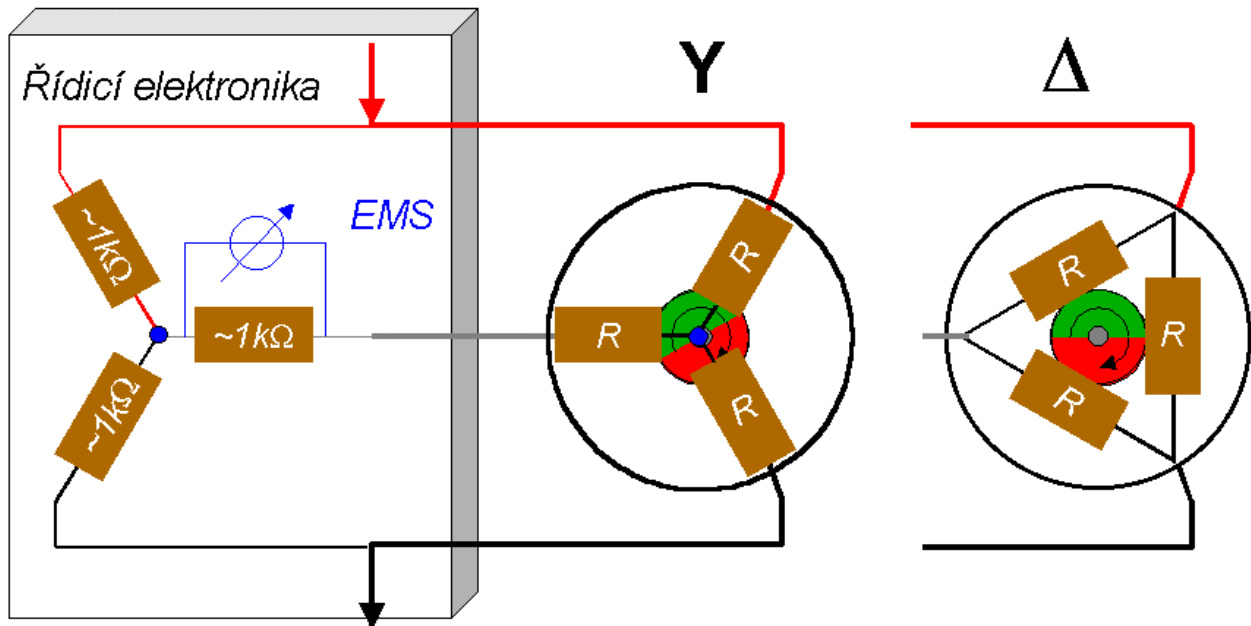
12.6. Obrázky

- *Snímání polohy rotoru bez snímače*
- *měření indukovaného napětí-EMS*
 - na přívodu třetí sekce vinutí
 - nutný uzel zapojení do Y
 - přechod EMS přes nulu
 - časové zpoždění 30°
 - potíže při malé rychlosti
- *nutný zvláštní postup při rozběhu*



Obr. 1 Komutace motoru EC bez snímače

- **Náhradní uzel zapojení** v řídicí elektronice pro vinutí se třemi přívody v zapojení **do trojúhelníka nebo do hvězdy**



Obr. 2 Komutace motoru EC bez snímače: náhradní uzel zapojení sekcí cívky

- **Komutace s Hallovými sondami**
 - řízený rozběh
 - umožňuje vysoký rozběhový moment
 - vysoké zrychlení
 - možná sinusová komutace pro plynulý běh při malé rychlosti
- **integrovaná řídicí elektronika do motoru s Hallovými sondami**
 - omezený napájecí proud
 - omezený rozsah napájecího napětí
 - snížená dynamika motoru
- **komutace bez snímače**
 - nedefinovaný rozběh
 - problémy při malé rychlosti
 - motor je bez dynamiky

• Dynamický pohon
• provoz start-stop

• Nižší dynamika pohonu
• pro plynulý provoz s nízkou nebo vysokou rychlostí

• Plynulý provoz vysokou rychlostí, ventilátory, jednoduchá čerpadla

Obr. 3 Systémy elektronické komutace

• Válcové motory EC

průměr	22mm	22mm	32mm	40mm	45mm	45mm	60mm
jmen. výkon	20 W	50 W	80 W	120 W	150 W	250 W	400 W
přípust. rychlost	50'000	50'000	25'000	18'000	15'000	12'000	7'000/min
trvalý moment	8.5	20	55	100	170	300	650 mNm

• diskové motory EC

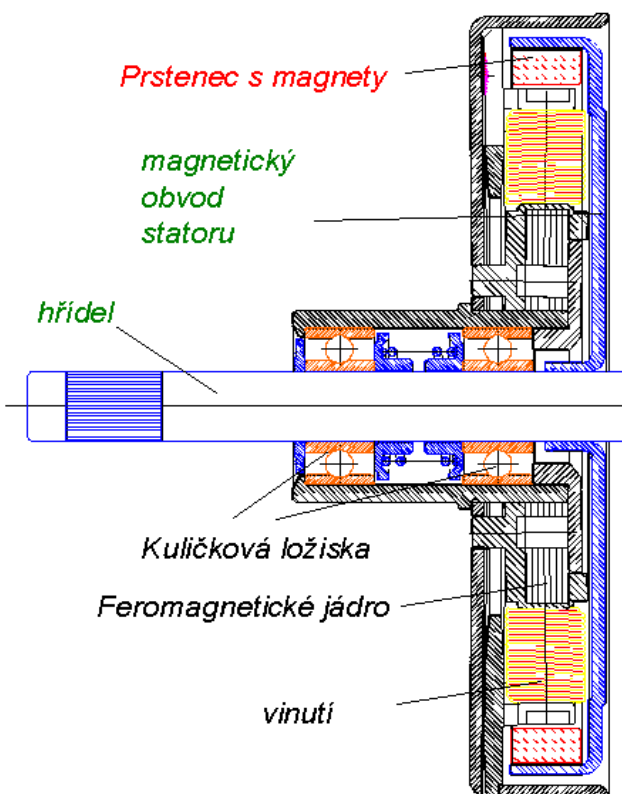
průměr	32mm	45mm	45mm
délka	8.9mm	8.1mm	16.3 mm
jmen. výkon	3 W	12 W	30 W
přípust. rychlost	12'000	10'000	10'000 ot.min ⁻¹

nejmenší 6mm EC
100'000 ot.min⁻¹



Obr. 4 Motory maxon EC: přehled

- vnější rotor
 - prstenec s permanentními magnety z NdFeB
 - EC d45 : 16 magnetických pólů
 - EC d32 : 8 magnetických pólů
- vnitřní stator
 - 3 fázové vinutí se železným jádrem
 - zapojení do hvězdy
 - EC d45 : 4 póly na fázi
 - EC d32 flat: 2 póly na fázi
- předepnutá kuličková ložiska
- varianta se 3 Hallovými sondami po elektrických 120°
- varianta bez Hallových sond



Obr. 5 Diskové motory EC

13. Řídicí jednotky malých stejnosměrných motorů EC

13.1. Řada řídicích jednotek rychlosti EC

Pro nové konstrukce je určena nová řada jednotek podle obr.1, která pokrývá jednoduché levné aplikace i náročné řízení. Starší jednokvadrantové jednotky neumožňovaly řízení nízkých rychlostí, přestože vyžadovaly motory vybavené Hallovými sondami. V nové řadě jsou nahrazeny jednokvadrantovou jednotkou AECS35/3, která má nedokonalou funkci v malých rychlostech, ale postačuje jí levnější motor bez Hallových sond. Jednotka může přitom pracovat s rychlostní zpětnou vazbou.

Dokonalejší jednokvadrantová jednotka DEC50/5 má kromě vyššího výkonu požadovanou rychlost nastavitelnou od nuly. Vyžaduje motor se snímačem s Hallovými sondami. Jednotka může v nastaveném směru pohybu i zabrzdit motor zkratováním vinutí.

Obě uvedené řídicí jednotky dodávají obdélníkové napájecí napětí.

Jednotka Sin-EC vytváří sinusové napájecí napětí pomocí signálu z resolveru na motoru. Má vysoký komfort ovládání i poskytovaných informací o stavu motoru a vysoký výkon včetně přesného řízení malých rychlostí.

Jednotka DES 50/5 je doplněna výkonnější verzí DES 70/10. Obě jednotky napájejí motor sinusovým napětím na základě signálu z Hallových sond a z inkrementálního snímače na motoru. Tato digitální koncepce nahrazuje i dosud nejdokonalejší výkonné jednotky sin-EC a nevyžaduje přitom snímání polohy resolverem.

13.2. Řídicí jednotky polohy motorů EC

Řídicí jednotka polohy PCU 2000 je původně určena pro řízení motorů DC s mechanickou komutací. Na objednávku se dodává její modifikace pro motory EC. Jednotka se naprogramuje externím personálním počítačem a pak řídí pohyb samostatně. Programují se rychlosti, zrychlení, zpoždění pohybů a místa zastavení. Jednotka řídí standardně jeden motor nebo současně dva motory.

Řídicí jednotka polohy MIP 50 je určena pro programové řízení polohy jednoho motoru. Její cena je pouze trojnásobná než cena jednotky DES 50/5 pro řízení rychlosti a je poloviční oproti PCU 2000. Jednotka MIP je regulátor PID polohy nebo regulátor PI proudu, který napětím s modulací šířky pulsů 60 kHz ovládá jeden motor vybavený Hallovými sondami a inkrementálním snímačem. Jednotka nemá vlastní řídicí systém pro určení sledu činností pohonu, ale jedna nebo několik jednotek se připojí osmi digitálními vstupy přes interface RS232 nebo RS485 k nadřazenému personálnímu počítači nebo průmyslovému kontroléru. RS485 dovoluje připojit až 64 jednotek. Nadřazený systém se vybaví kompatibilním řídicím programem ve Win95, WinNT-DLLs nebo Tools. Nadřazený systém zpracovává informace o stavu celého stroje a komunikuje s jednou nebo až 32, resp. 64 jednotkami MIP. Zjišťuje stav pohonů připojených po jednom k jednotkám MIP a dává příkazy pro jejich činnost. Mód pro komunikaci lze vybrat ze tří možností:

- Komplexní komunikace nadřazeného systému s jednotkami MIP probíhá v módu MIPbus Protocol definovanými příkazy. Až 64 jednotek MIP se propojí na společnou sběrnici, kterou nadřazený systém komunikuje s jednotlivými jednotkami MIP nebo jejich skupinami.
- Komunikace zjednodušeným souborem příkazů v módu ASCII je výhodná pro jednoduché aplikace nebo pro oživení systému.
- V módu I/O lze v jednoduchých případech řídit pohony i bez nadřazeného kontroléru pouhými spínači a stav pohonů indikovat pomocí LED. Mód I/O umožňuje použít 4 hodnoty rychlosti a 26 cílových hodnot polohy.

Jednotka MIP 50 má limit na výstupu 5 A trvale, 11 A krátkodobě do 5 s a 13 A krátkodobě do 200 ms. Obsahuje vnitřní indukčnost 1 mH. Napájí se 24 – 48 V stejnosměrnými. Další digitální

vstupy jsou „stop“, blokování výkonového výstupu „enable“, referenční poloha a limity rychlosti a proudu v obou směrech otáčení. K dispozici je i napětí pro inkrementální snímač na konektoru pro jeho připojení.

Typické aplikace jednotek MIP jsou ve výměnících nástrojů, robotech, lékařských přístrojích, infúzních pumpách, chemických přístrojích, analytických pumpách.

13.3. Obrázky

			V_{cc}	ΔV	I_{trvale}	$I_{krátkod.}$
• Řídicí jednotky DC zajišťují napájení a řízení						
• rychlosti						
- LSC	4 - Q	lineární	12-30 V	6 V	2 A	2 A
- ADS 50/5	4 - Q	PWM	12-50 V	2 V	5 A	10 A
- ADS 50/10	4 - Q	PWM	12-50 V	2 V	10 A	20 A
• polohy						
- PCU 2000	4 - Q	PWM	24-48 V (+)	2 V	5 A	10 A
- MIP 10	4 - Q	PWM	9-24 V		1.8 A	2 A
- MIP 50	4 - Q	PWM	24-48 V		5 A	13 A

- Řídicí jednotky EC zajišťují i elektronickou komutaci

			snímač	V_{cc}	ot/min	I_{trvale}	$I_{krátkod.}$
rychlosti							
- AECS35/3	1 - Q	ne		8-35 V	1000 - 90000	3 A	5 A
- DEC50/5	1 - Q	Hall		10-50V	0 - 120000	5 A	10 A
- DES50/5	4 - Q	Hall+inkr		12-50V	0 - 25000	5 A	15 A
- DES70/10	4 - Q	Hall+inkr		24-70V	0 - 25000	10 A	30 A
- Sin-EC	4 - Q	Resolver		24-70V	0 - 25000	8 A	14 A
polohy							
- MIP 50	4 - Q	Hall+inkr		24-48V	0 - 25000	5 A	13 A

pozn.: obě 1-Q jednotky lze přepnout na řízení s otevřenou smyčkou nebo se zpětnou vazbou

Obr. 1 Přehled řídicích jednotek



Obr. 2 Řídicí jednotka DES 70/10

14. Řízení malých stejnosměrných motorů DC

14.1. Řízení rychlosti motoru s uzavřenou smyčkou

Schéma podává obr.1. Požadovanou veličinou je požadovaná rychlost výstupního hřídele. Výstupní veličinou je skutečná rychlost. V soustavě MAXON ji lze vyhodnotit s využitím tachodynamu nebo inkrementálního snímače s dostatečnou hustotou impulsů, obvykle 500 na jednu otáčku. Třetí možnost je využít tzv. kompenzaci $l \times R$, která nevyžaduje žádný snímač. Bude popsána v příští kapitole. Řídicí jednotky mají přepínatelný vstup na jednu z uvedených možností. Na obr.1 je varianta s inkrementálním snímačem, jehož impulsy zpracuje převodník v řídicí jednotce na analogový signál ekvivalentní signálu z tachodynamu. Rychlostní regulátor porovnává skutečnou rychlost s požadovanou rychlostí. Jejich rozdíl je regulační odchylka. Regulační odchylka vznikne např. při změně zatížení mechanickým momentem nebo zadáním jiné požadované rychlosti. Rychlostní regulátor zpracuje regulační odchylku v režimu PID, tj. s respektováním proporcionální, integrované a derivační složky její změny. Výstupem rychlostního regulátoru je analogový slaboproudý signál požadované rychlosti. Proudový regulátor signál zesílí, aby odpovídal odběru připojeného motoru. Jednotlivé typy řídicích jednotek DC výrobce MAXON se liší zejména napětím a proudem proudového regulátoru. Pro malé proudy stačí ztrátová analogová regulace jednotky LSC, pro vyšší proudy se použijí jednotky ADS 50/5 nebo ADS 50/10 s regulací proudu změnou šířky impulsů, tj. PWM.

14.2. Vliv seřízení regulátoru rychlosti PID

Znázorníme časový průběh výstupní veličiny po skokové změně požadované rychlosti. Čárkovaný průběh rychlosti na levém diagramu obr.2 se dosáhne s využitím pouze proporcionálního filtru regulátoru. Doplněním integračního filtru získáme průběh podle plné čáry. Rychlost dosáhne požadované hodnoty, ale průběh je pomalý. Zařazením derivačního filtru se průběh urychlí podle středního diagramu, ale mohou vzniknout tlumené překmity. Nevhodným nastavením řídicí jednotky se vytvoří netlumené kmity a nestabilita podle pravého diagramu.

14.3. Řízení polohy motoru s uzavřenou smyčkou

Schéma podává obr.3. Požadovanou veličinou je požadovaná poloha výstupního hřídele. Skokovou změnu požadované polohy zpracovává jednotka s využitím vloženého průběhu zrychlení na průběh okamžité požadované polohy R. Výstupní veličinou je poloha výstupního hřídele motoru.

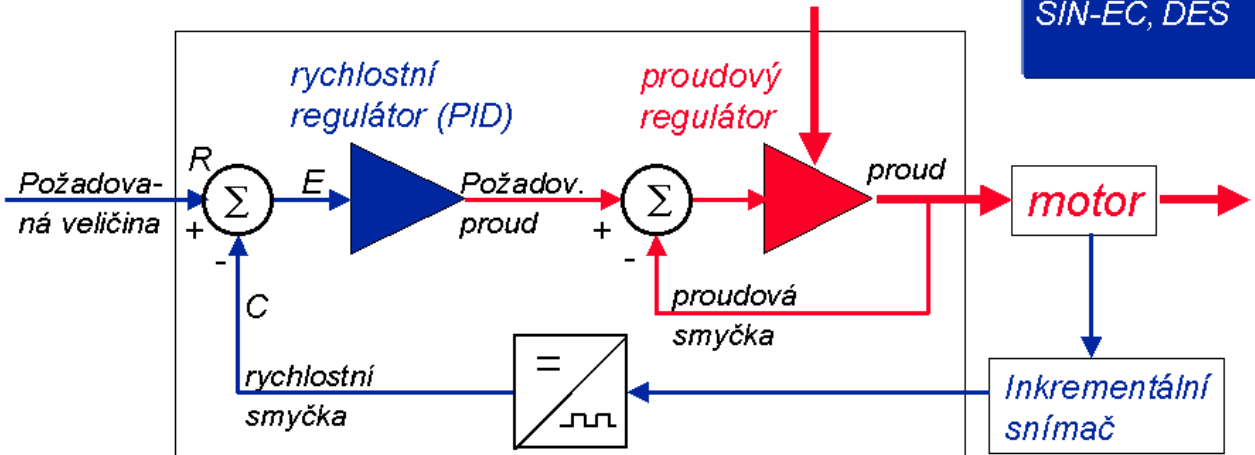
V soustavě MAXON ji lze vyhodnotit s využitím inkrementálního snímače s dostatečnou hustotou impulsů, obvykle 500 na jednu otáčku, jehož impulsy zpracuje dekodér v řídicí jednotce na okamžitou skutečnou polohu C v digitální podobě porovnatelné s požadovaným průběhem pohybu R. Rozdíl R-C je regulační odchylka E. Regulátor PID a převodník D-A zpracovává regulační odchylku v režimu PID, tj. s respektováním proporcionální, integrované a derivační složky její změny. Výstupem regulátoru je analogový slaboproudý signál požadované rychlosti. Proudový regulátor signál zesílí, aby odpovídal odběru připojeného motoru. Jednotlivé typy řídicích jednotek DC výrobce MAXON se liší zejména napětím a proudem proudového regulátoru. Pro malé proudy stačí jednotky MIP 10, pro vyšší proudy se použijí jednotky MIP 50 nebo PCU, všechny s regulací proudu změnou šířky impulsů, tj. PWM.

14.4. Vliv nastavení regulátoru polohy

Vliv nastavení řídicí jednotky polohy na průběh odezvy na regulační odchylku je obdobný jako u jednotky řízení rychlosti. Je patrný z obr.4. Zvýšenou pozornost si zaslouží nastavení zesílení derivačního filtru. Překmit výstupní polohy při vysokém zesílení působí potíže zejména u pohonů s převodovkou, která má vždy větší či menší vůli a ta se při překmitu vymezuje se vznikem rázů.

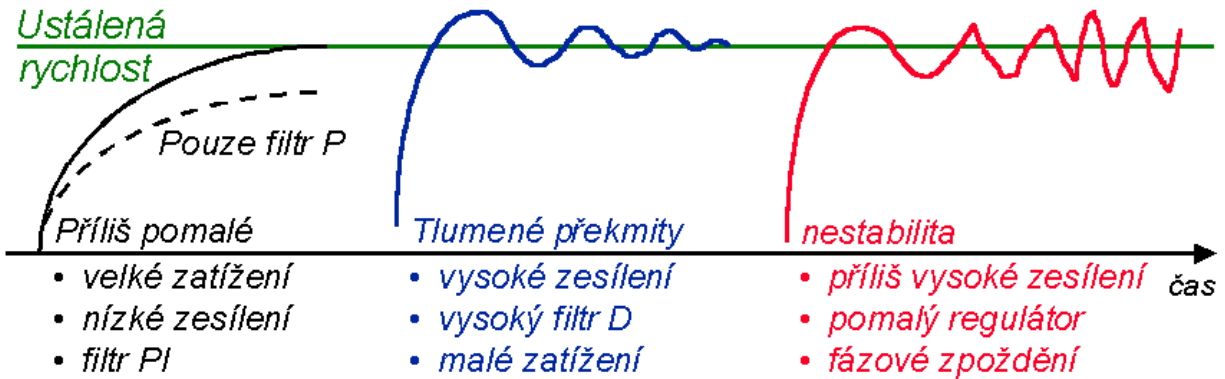
14.5. Obrázky

- **Rychlostní smyčka s inkrementálním snímačem**
 - zesílení záleží na nastavených parametrech (PID)
- **proudová smyčka**
 - výkonový zesilovač (MOSFET)
 - podřízená smyčka, zvyšuje dynamiku soustavy



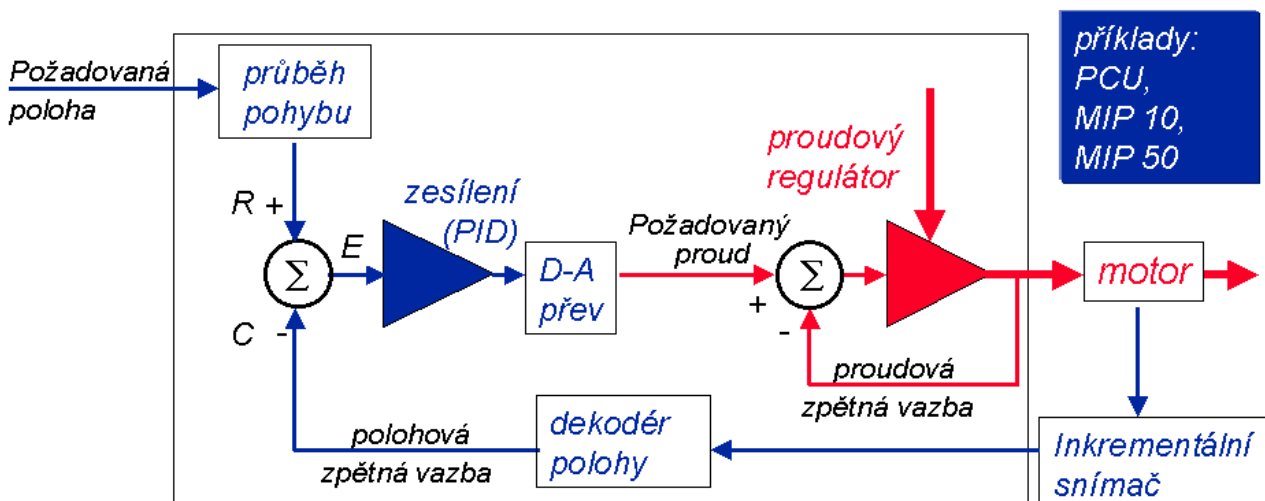
Obr. 1 Řízení rychlosti a nastavení řídicí jednotky

- Průběh dosažení *ustálené požadované rychlosti* po změně požadované rychlosti skokem
 - záleží na zesílení: nastavení potenciometru "gain" nebo X_p
 - *P* *proporcionální filtr*: nemůže zcela vyrovnat regulační odchylku při změně zatížení
 - *I* *integrační filtr*: koriguje zbylou část regulační odchylky ponechanou *proporcionálním filtrem*
 - *D* *diferenciální filtr*: zvyšuje rychlost odpovědi na odchylku



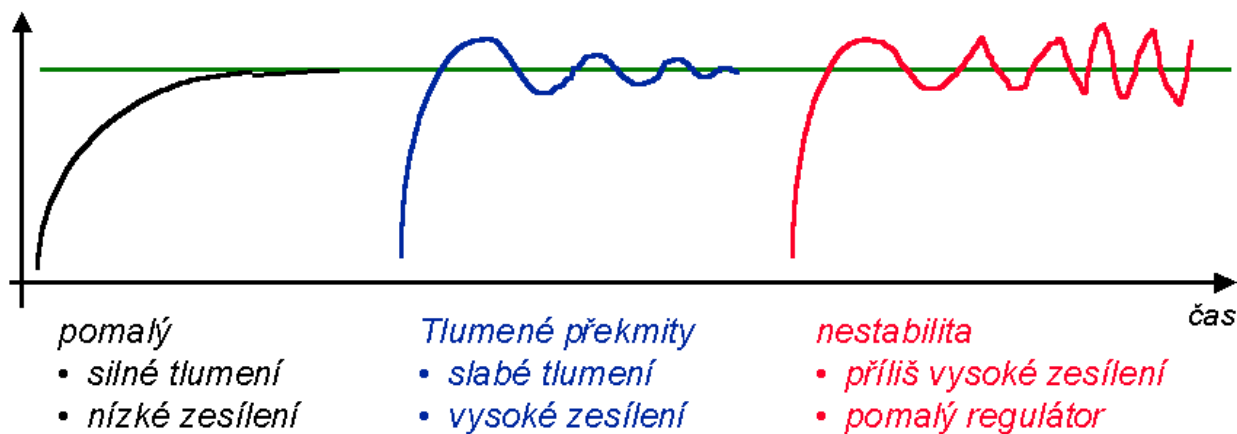
Obr. 2 Uzavřená regulační smyčka řízení rychlosti

- Vytváří průběh pohybu podle signálu nadřazeného PC nebo PLC.
- Zaručuje stabilitu soustavy (zesílení, filtr PID)
- obvykle digitální signaly (průběh, poloha, zesílení)
- analogový proudový regulátor



Obr. 3 Uzavřená regulační smyčka řízení polohy

- Průběh dosažení požadované polohy
 - záleží na tlumení a zesílení
 - doba cyklu regulátoru: proud < 0.2 ms, poloha < 1 ms (PLC!!)



Obr. 4 Uzavřená regulační smyčka řízení rychlosti

15. Řízení malých stejnosměrných motorů DC

15.1. Řízení rychlosti metodou $I \times R$ s uzavřenou smyčkou bez snímače

Metoda se může použít pro řízení rychlosti s uzavřenou rychlostní regulační smyčkou mechanicky komutovaného motoru. Schéma podává obr.1. Požadovanou veličinou na vstupu do řídicí jednotky je požadovaná rychlost výstupního hřídele. Na řídicích jednotkách MAXON se vkládá ve formě signálu v rozmezí $-10V$ až $+10V$. Výstupní veličinou je rychlost motoru. Řídicí jednotku máme přepnutu na řízení $I \times R$.

Metoda $I \times R$ je založena na skladbě celkového úbytku napětí na otáčejícím se motoru. Uvedli jsme ji už ve druhé kapitole při odvozování charakteristiky stejnosměrného motoru. Vznik úbytku napětí U_{mot} je patrný z pravé části obr.1. Skládá se z U_L, U_R, U_n .

Úbytek U_R vzniká na čistě ohmickém odporu vinutí jako součin odporu R_{mot} a proudu I_{mot} . Napětí U_R a proud I_{mot} můžeme naměřit na mechanicky zablokovaném motoru. Motor připojený na toto napětí vyvozuje v klidu moment daný součinem proudu I_{mot} a momentové konstanty motoru k_M . Z motoru se neodebírá žádná mechanická práce a veškerý příkon se mění v teplo.

Má-li se motor zatížený stejným momentem otáčet, je nutno zvýšit napájecí napětí o hodnotu úměrnou požadované rychlosti $U_n = \frac{n}{k_n}$, kde k_n je rychlostní konstanta motoru. Tento přidaný pří-

kon $U_n \cdot I_{mot}$ se odvede jako mechanický výkon motoru.

Třetí úbytek U_L na indukčnosti vinutí se uplatní pouze v průběhu změn proudu, tedy změn zatížení a v uvažovaném ustáleném stavu se nevyskytuje.

Z rozboru vyplývá, že odečtením úbytku U_R od celkového napětí na motoru U_{mot} získáme informaci o rychlosti motoru, aniž bychom museli motor vybavit snímačem.

15.2. Funkce řídicí jednotky rychlosti pracující metodou kompenzace $I \times R$

Měřenou veličinou informující o skutečné rychlosti motoru je napětí U_{mot} na svorkách motoru. Napětí se násobí součinitelem K a získá se signál v rozsahu, v němž se do řídicí jednotky vkládá požadovaná rychlost a v němž pracuje rychlostní zpětná vazba. Signál vstupuje do rychlostní smyčky zpětné vazby, kde se porovná se signálem napětí, odpovídajícím požadované rychlosti. Porovnáním se získá regulační odchylka, která se zpracuje regulátorem PID na signál požadovaného proudu. Regulátor proudu signál zesílí na proud odpovídající výkonu motoru.

Signál požadovaného napětí pro vstup do porovnávacího obvodu rychlostní smyčky se vytvoří na prvním součtovém členu jako součet signálu napětí U_R a signálu požadované rychlosti zadaného na vstupu do řídicí jednotky. Signál napětí U_R vytvoří jednotka jako součin okamžitého proudu do motoru I_{mot} , kompenzačního faktoru o velikosti blížíci se R_{mot} a součinitele K . Kompenzační faktor nastavíme potenciometrem na řídicí jednotce. Součinitel K upravuje napětí $I_{mot} \cdot R_{mot}$ na signál v rozsahu, v němž pracuje rychlostní zpětná vazba.

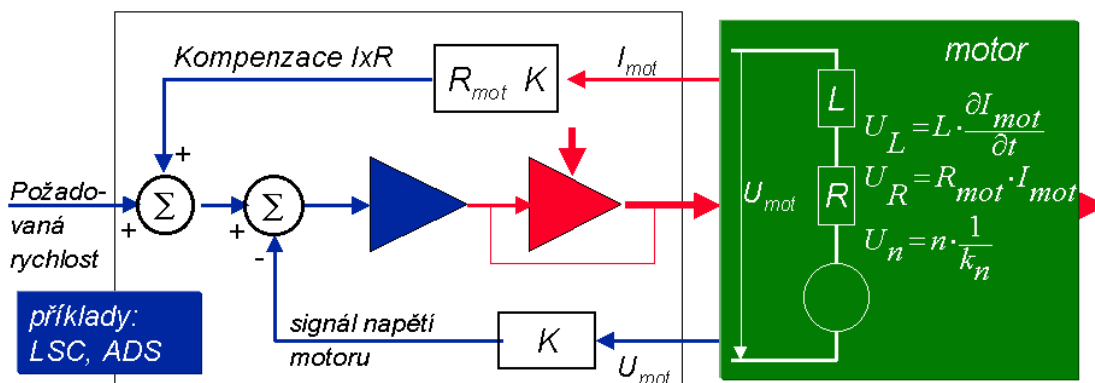
Přesnost řízení rychlosti metodou $I \times R$ je několik procent. Je ovlivněna změnou měrného odporu mědi vinutí motoru s teplotou, zatímco nastavená hodnota kompenzačního faktoru potenciometrem jednotky se nemění.

15.3. Jednokvadrantové a čtyřkvadrantové řízení

Vlastnosti obou typů řízení vyplývají z obr.2. Jednokvadrantové řízení používají zejména starší řídicí jednotky pro řízení motorů EC s elektronickou komutací. Jsou schopné vyvinout pouze moment ve směru pohybu, který se volí přepínačem nebo signálem na vstupu jednotky. Motor se u těchto jednotek zpomalí nebo zastaví jen mechanickými odpory. Nová jednokvadrantová řídicí jednotka MAXON AECS35/3 má navíc možnost rychle zastavit motor zkratováním vinutí, jestliže se na vstup přivede řídicí signál.

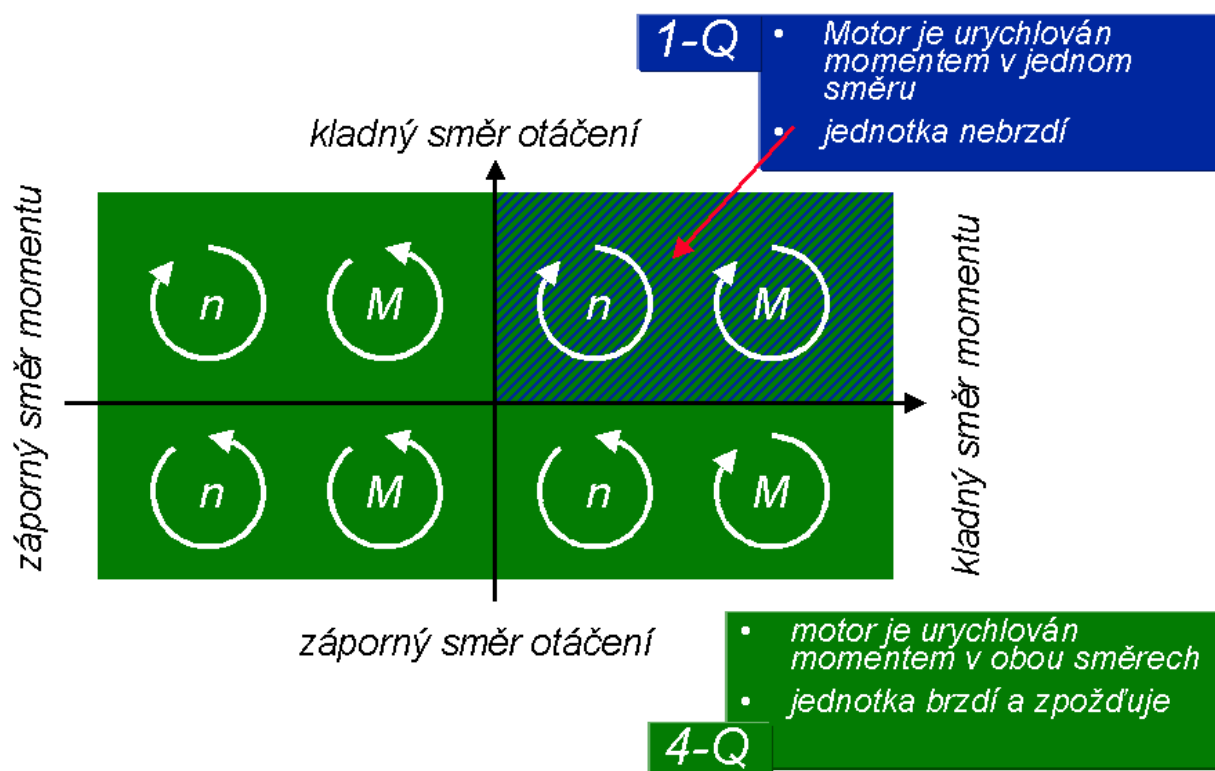
Čtyřkvadrantové řídicí jednotky urychlují i zpomalují motor v obou směrech podle průběhu řídicího signálu rychlosti a při nulovém signálu drží motor v klidu.

15.4. Obrázky



- Bez snímače, nízká cena, méně kabelů
- vstup do zpětné vazby rychlostní smyčky je napětí na svorkách motoru
- požadovaná rychlost se před vstupem do smyčky upraví podle proudu do motoru a tak se kompenzuje úbytek napětí na ohmickém odporu vinutí.
- nastaví se kompenzační faktor řídicí jednotky (ideálně = R_{mot})
- nízká dynamika, nižší přesnost, neboť R_{mot} závisí na teplotě mědi

Obr. 1 Řízení rychlosti bez snímače: $I \times R$



Obr. 2 1-Q a 4-Q řídicí jednotka

16. Řízení malých stejnosměrných motorů DC

16.1. Konstrukce proudového regulátoru

Proudový regulátor je výkonový stupeň řídicích jednotek rychlosti nebo polohy, a to jak pro motory DC s mechanickým komutátorem tak pro motory EC. Způsob práce výkonového stupně je vysvětlen na zjednodušené řídicí jednotce rychlosti motorů DC. Proudovému regulátoru je předřazen rychlostní regulátor, jak jsme uvedli v kapitole 14. Uvažovaná řídicí jednotka řídí svým výstupním napětím proud do motoru, aby se otáčel požadovanou rychlostí.

16.2. Lineární proudový regulátor

Jednokvadrantový proudový regulátor je na obr.1. Výkonový tranzistor řízený rychlostním regulátorem je schématicky znázorněn reostatem R . Celkové napájecí napětí V_{cc} se rozdělí na úbytek na výkonovém tranzistoru U_T a úbytek na motoru U_{mot} . Výkon $P_V = R \cdot I^2$ se přemění v teplo. Ztráty u malých výkonů jsou přijatelné a převáží pak výhoda slabého rušení a cena lineární jednotky.

Pro čtyřkvadrantovou řídicí jednotku rychlosti se může použít můstkové zapojení proudového regulátoru podle obr.2, které je použito v jednotce MAXON LSC. Jednotka je schopna napájet motor napětím obou polarit. Výkon při brzdění ve II. a IV. kvadrantu je u současně vyráběné jednotky LSC omezen na 5W oproti výkonu do 50W na urychlování.

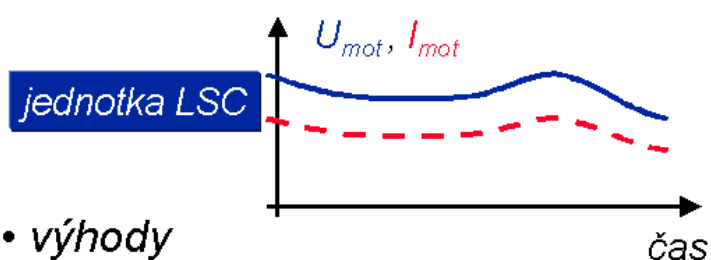
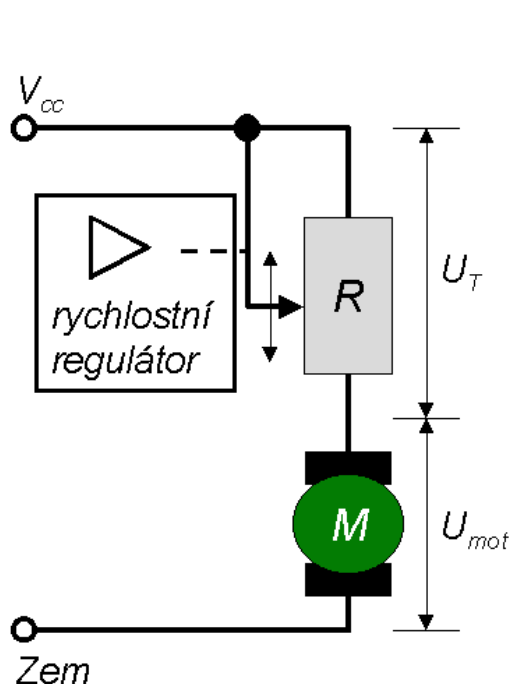
16.3. Pulsní proudový regulátor

Jednokvadrantový proudový regulátor je na obr.3. Konstantní napájecí napětí je časově rozděleno do impulsů s konstantní frekvencí a s řízenou šířkou. PWM (pulse width modulation). Protože

výkonové tranzistory jsou buď zcela otevřeny nebo zcela zavřeny, nevznikají na nich téměř žádné ztráty. Indukčnost vinutí motoru způsobí, že proud do vinutí nestačí sledovat rychlé změny napětí a průběh proudu je více nebo méně zvlněný. Proud se lépe vyhladí při vyšší frekvenci pulsů a při vyšší indukčnosti. Řídicí jednotky MAXON pracují s frekvencí 50 kHz a vyžadují určitou nejmenší indukčnost napájeného vinutí. Např. nejpoužívanější jednotka ADS50/5 má zabudovanou indukčnost 160 μH , která stačí pro napájení téměř všech motorů DC přes 10W. Motory pod 350 μH se musí v sérii doplnit přídatnou tlumivkou alespoň 200 μH . Nedostatečná indukčnost způsobuje přehřívání vinutí motoru i při běžných napájecích proudech.

Čtyřkvadrantové řídicí jednotky rychlosti používají můstkové zapojení proudového regulátoru podle obr.4. Výkon uvedené jednotky ADS50/5 stačí pro řízení prakticky všech motorů DC MAXON. Nejvyšší proudy na akceleraci i brždění jsou stejné. Jednotka ADS50/5 je v porovnání s lineární jednotkou LSC vybavena mnoha dalšími funkcemi včetně možnosti řízení proudu a tedy mechanického momentu motoru.

16.4. Obrázky



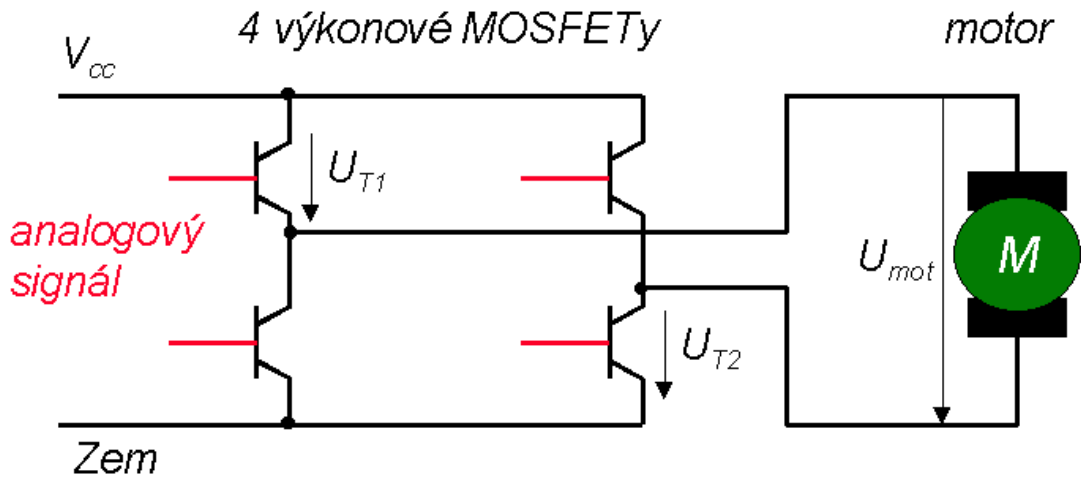
• výhody

- jednoduchá elektronika
- nízká cena
- slabé elektromagnetické rušení
- bez omezení indukčností motoru

• nevýhody

- velké ztráty při vysokých proudech do motorů pro nízká napětí
($P_v = R I^2$)
- pro malé jmenovité výkony do 30-50W

Obr. 1 Lineární proudový regulátor



Příklad ztrát :

- $V_{cc} = 30 \text{ V}$, $I = 2 \text{ A}$, $U_{mot} = 5 \text{ V}$, tedy $U_{T1} + U_{T2} = 25 \text{ V}$
- příkon motoru: 10 W , ztráty výkonu na tranzistorech 50 W
- účinnost napájení: 16%

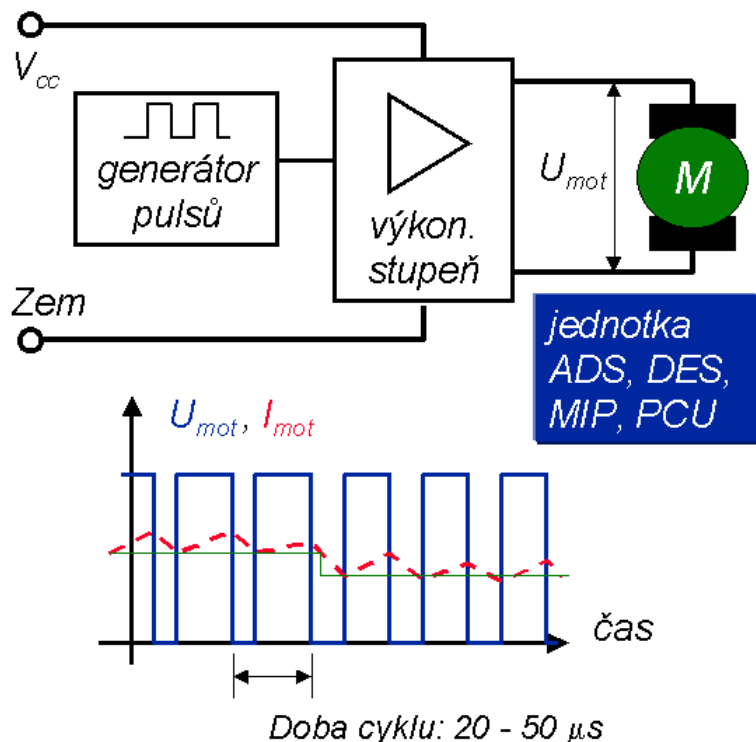
Obr. 2 Lineární 4-Q můstek proudového regulátoru

• **výhody**

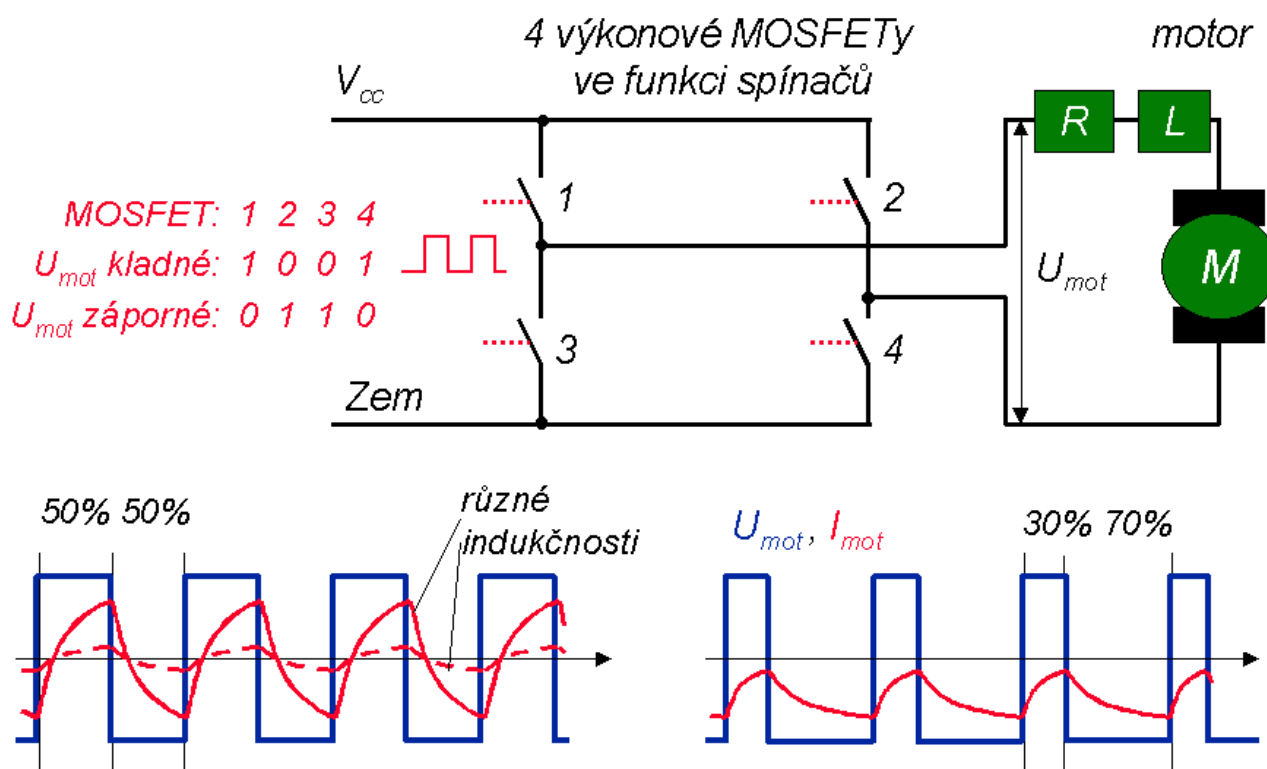
- nízké ztráty výkonu
- vysoká účinnost
- pro vysoké jmenovité výkony

• **nevýhody**

- elektromagnetické rušení na rozhlasových frekvencích
- vysoké ztráty se zastaveným motorem
- omezení minimální indukčnosti motoru



Obr. 3 Pulsní proudový regulátor (PWM)



Obr. 4 4-Q pulsní proudový regulátor

17. Výkon řídicích jednotek malých stejnosměrných motorů

Kapitola pokračuje v tematice řízení mechanicky komutovaných a elektronicky komutovaných stejnosměrných motorů. Uživatel si vybere pro své požadavky převodovku, potom přiřadí vhodný motor. Pokud požaduje i řízení rychlosti, polohy nebo momentu, zvolí vhodnou řídicí jednotku. Důležité jsou funkce jednotky a její výkonnost. Výkon je dán nejvyšším vstupním napájecím napětím jednotky a omezením výstupního proudu.

17.1. Meze výkonu řídicí jednotky

Na obr.1 je na vodorovná ose velikost výstupního proudu, na svislé velikost napětí. Nejvyšší trvalý proud I_{trv} je omezen teplotní odolností součástek jednotky. Nejvyšší špičkový proud $I_{špic}$ počítá s tepelnou kapacitou součástek, které se nezničí během krátkého trvání vyššího proudu.

Nejvyšší vstupní napětí jednotky $V_{cc, max}$ je omezeno napěťovou odolností součástek jednotky.

Na výkonové části jednotky, tj. regulátoru proudu, se vytváří úbytek napětí, o které je výstupní napájecí napětí nižší.

Nejnižší vstupní napětí jednotky $V_{cc, min}$ je napětí nezbytné pro napájení řídicích obvodů jednotky. Některé starší jednotky EC řídí rychlost motoru EC vstupním napájecím napětím jednotky. Napětí $V_{cc, min}$ u nich znemožňuje dosáhnout nízkou rychlost.

Jmenovité napětí motoru nevolíme zbytečně nízké. Využijeme tak výkon jednotky a nezvyšujeme proud do kartáčů, který ovlivňuje dobu života motoru. Indukčnost vinutí pro vyšší napětí je vyšší a lépe vyhoví pro řídicí jednotku s pulsní regulací.

17.2. Meze výkonnosti řídicích jednotek MAXON

Jednotky MAXON LSC mají nastavitelnou trvalou proudovou mez do 2A bez možnosti špičkového proudu. Úbytek napětí v jednotce je 6V a $V_{cc, max}$ je 30V

Jednotky ADS50/5 mají nastavitelnou mez trvalého proudu do 5A a mez špičkového proudu do 10A. Špičkový proud teče 0.1s, pak se proud omezí na trvalý proud a po 1s se špička může opakovat. Úbytek napětí v jednotce je 2V a $V_{cc, max}$ je 50V

Jednotky DES50/5 mají nastavitelnou mez trvalého proudu do 5A. Mez špičkového proudu je trojnásobek meze trvalého proudu. Špičkový proud teče po dobu závislou na jeho velikosti, pak se proud omezí na trvalý proud a po době, která závisí na minulém zatížení, se špička může opakovat. Úbytek napětí v jednotce je 2V a $V_{cc, max}$ je 50V

Jednotka MIP10 má mez trvalého proudu 1.8A a mez špičkového proudu 2A. Úbytek napětí v jednotce je 2V a $V_{cc, max}$ je 24V

Jednotka MIP50 má mez trvalého proudu do 5A a mez špičkového proudu 11A po dobu 5s nebo 13A po dobu 0.2s. Úbytek napětí v jednotce je 2V a $V_{cc, max}$ je 48V

17.3. Vliv mezí řídicí jednotky na motor

Meze z obr. 1 jsou na obr.2 převedeny do diagramu s rychlostními charakteristikami motoru. Tvar rychlostní charakteristiky jsme odvodili ve 2. kapitole.

Na vodorovné ose je mechanický moment, který je momentovou konstantou k_m konkrétního motoru jednoznačně svázán s proudem. Na vodorovné ose mohou být dvě stupnice, momentu a proudu. Proud I_{trv} je omezen přípustným oteplením motoru nebo jednotky v trvalém provozu. Proud $I_{špic}$ je omezen přípustným oteplením s respektováním tepelné kapacity součástek výkonového stupně jednotky v krátkodobém provozu. Motor je zpravidla krátkodobě přetížitelný podstatně více.

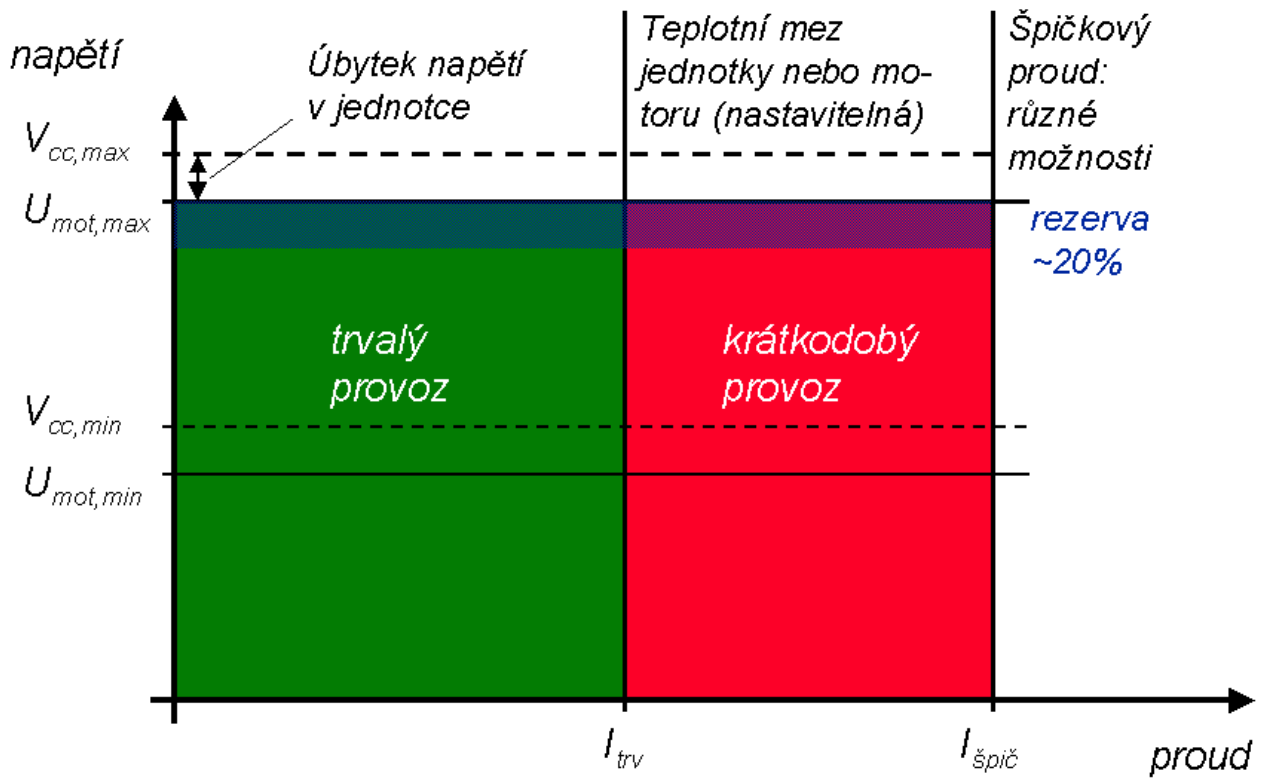
Na svislé ose je rychlost motoru. Rychlost bez zatížení n_0 je přímo úměrná napájecímu napětí motoru, kde konstanta úměrnosti je rychlostní konstanta konkrétního motoru, a proto je na této ose možno zobrazit i napětí při provozu s nulovým zatěžovacím momentem. Rychlost motoru při napájení napětím na vstupu do jednotky $V_{cc, max}$ by klesala se zatížením podle rychlostní charakteristiky zobrazené čárkovaně. Toto napětí však není k dispozici na výstupu jednotky. Od napětí $V_{cc, max}$ je nutno odečíst úbytek napětí v jednotce a 20% rezervu na různá kolísání a tolerance. Dostáváme tak rychlostní charakteristiku motoru s nejvyšší dosažitelnou rychlostí při každém zatížení. Charakteristika omezuje shora zelené a červené pole, ve kterých se mohou vyskytovat provozní body motoru při řízení zvolenou řídicí jednotkou.

Obr.3 formuluje vztahy motoru a jednotky matematicky. První rovnice umožňuje určit potřebné napájecí napětí jednotky V_{cc} pro rychlost n_{mot} a zatížení M_{mot} provozního bodu. Rychlostní konstanta k_n a sklon rychlostní charakteristiky $\Delta n / \Delta M$ jsou v katalogovém listu motoru. Úbytek napětí na jednotce ΔV je uveden v dokumentaci jednotky.

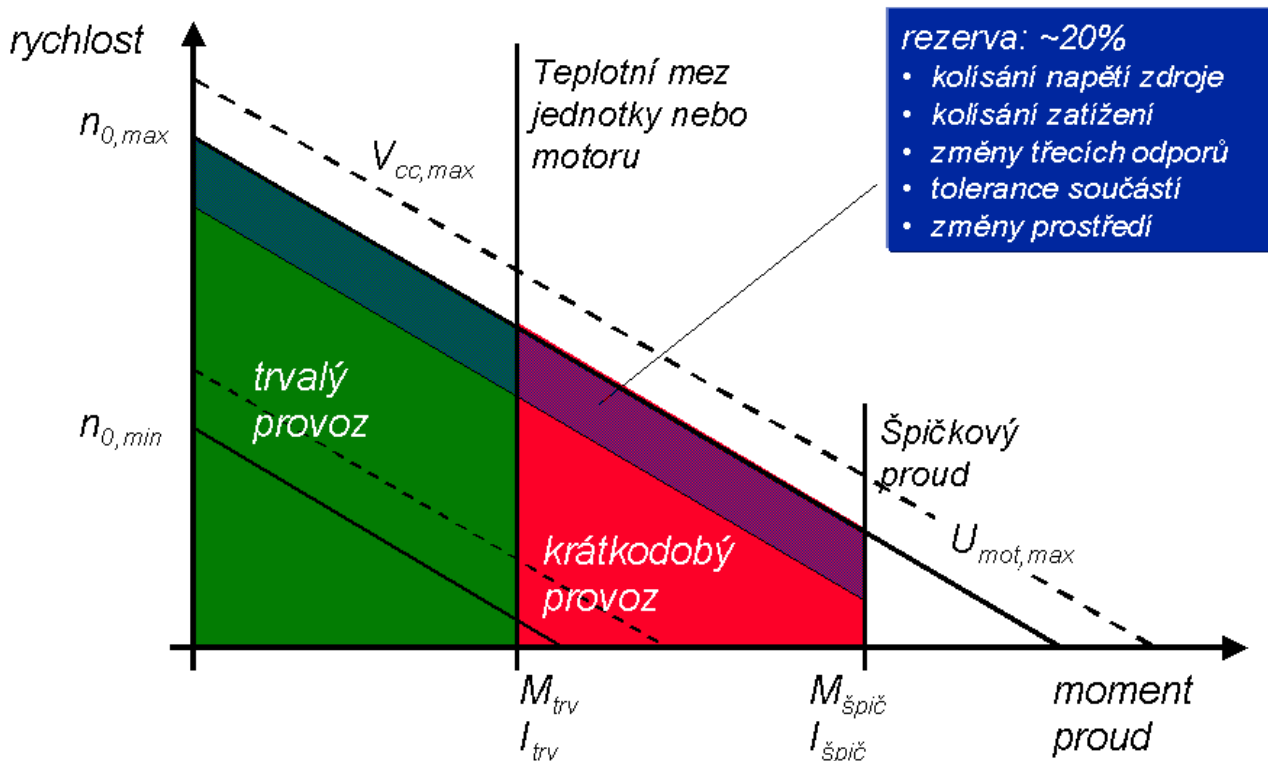
Druhá rovnice umožňuje určit rychlostní konstantu motoru k_n pro danou řídicí jednotku s daným mezním napětím V_{cc} . Podle rychlostní konstanty určíme z katalogovém listu motor pro vhodné jmenovité napětí, které tak nepřekročí mezní napětí jednotky.

Na obr. 3 je červeně naznačen pohyb provozního bodu při zrychlování z klidu do bodu s požadovanou rychlostí, který leží na čárkované charakteristice. Zrychlující moment je dán mezním nastaveným krátkodobým proudem. Další pohyb provozního bodu by v tomto případě probíhal vodorovně doleva do ustáleného provozního bodu daného požadovanou rychlostí a zatížením. Výstupní napětí jednotky se přitom postupně snižuje.

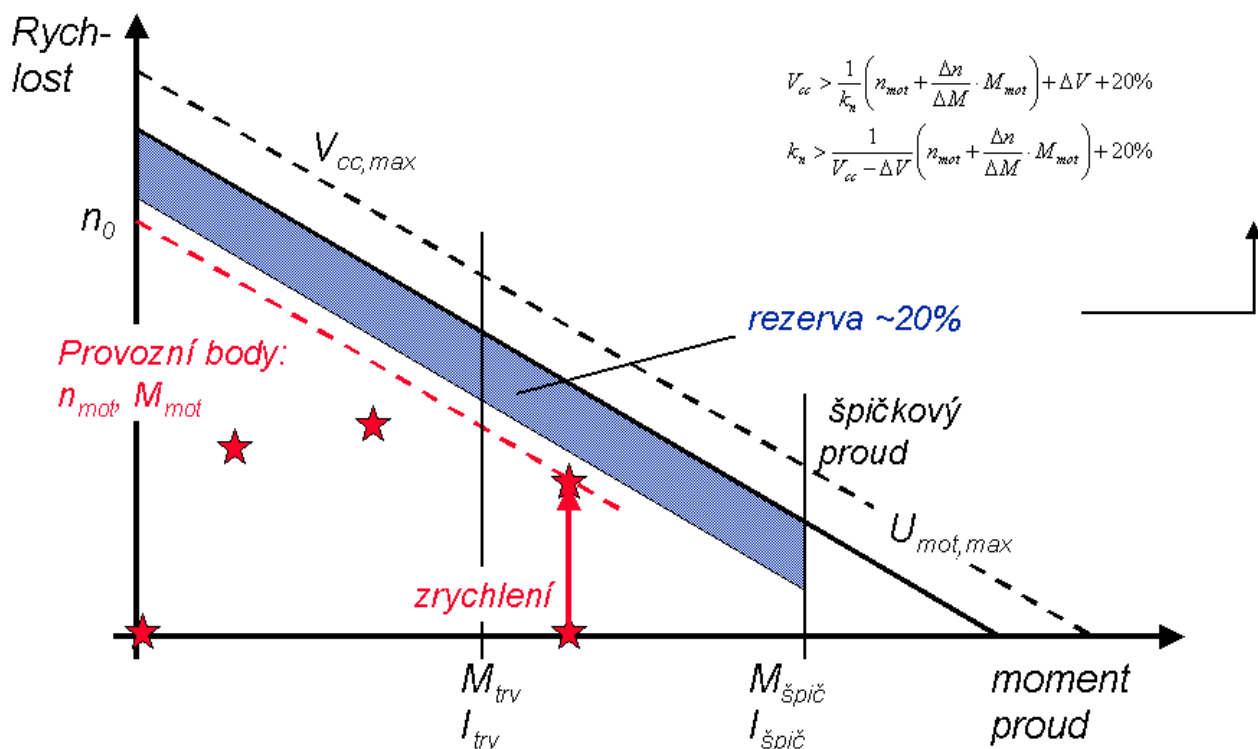
17.4. Obrázky



Obr. 1 Meze řídicích jednotek



Obr. 2 Meze řídicí jednotky – volba motoru



Obr. 3 Vztah napájecího napětí a vinutí motoru

18. Snímače otáčení malých stejnosměrných motorů

Kapitola pokračuje v tematice řízení mechanicky komutovaných a elektronicky komutovaných stejnosměrných motorů. Řídicí jednotka vyžaduje informaci o stavu motoru. Snímače rychlosti nebo polohy motoru v systému MAXON se připojují na hřídel motoru a vylučují tak ze zpětné vazby řídicí jednotky poddajnost a vůli převodovky.

Řídicí jednotka rychlosti může pracovat se signálem tachodynamy, který zajistí nejvyšší přesnost regulace nebo se signálem digitálního snímače úhlu s přesností závislou na hustotě dělení nebo bez snímače metodou měření proudu $I \times R$, která je nejméně přesná.

Řídicí jednotka polohy pracuje se signálem digitálního, obvykle inkrementálního snímače.

18.1. Tachodynamo

Tachodynamo je malý komutátorový motor s permanentními magnety a s výstupním napětím přímo úměrným rychlosti. Měřítkem kvality je zvlnění napětí vlivem konečného počtu lamel komutátoru, tuhost spojení s motorem a moment setrvačnosti rotoru tachodynamy. Tachodynamy pro motory s rotorem bez železného jádra jsou rovněž opatřeny rotorem bez železného jádra.

18.2. Digitální snímače

Na obr.1 jsou možnosti digitálního snímače. Obr.2 ukazuje rozdíl inkrementálního a absolutního digitálního snímače.

18.3. Optický inkrementální snímač

Každý kanál optického inkrementálního snímače podle obr.3 použije světlo svítící diody LED na fototranzistor přes čárovou mřížku na obvodu impulsního disku a obdobnou stojící mřížku se stejnou hustotou čar. Na vstupní ploše fototranzistoru se při otáčení disku střídá světlo a tma. Průběh výstupního signálu závisí na průběhu zatmívání světla mřížkou a na citlivosti fototranzistoru. Zá-

kladní provedení snímače zpracuje signál každého fototranzistoru na obdélníkový tvar s ostrými náběhovými hranami. Rozteč vzestupné a sestupné hrany signálu je ovlivněna nastavením citlivosti elektroniky snímače a může se lišit od přesné poloviny délky periody signálu, dané roztečí dvou vzestupných nebo dvou sestupných hran.

Přesazení hran kanálu A a B je ovlivněno přesností přesazení pevných mřížek obou diod. Přesazení je nutné pro rozeznání směru otáčení.

18.4. Magnetický inkrementální snímač MR s Hallovými sondami

Hallové sondy na obr.4 mění elektrický odpor podle intenzity magnetického pole. Hustota impulsů je u malých rozměrů magnetického disku omezena na několik desítek impulsů na otáčku minimálními použitelnými rozměry pólů pro dosažení potřebné intenzity magnetického pole. Hallové sondy totiž vyžadují poměrně silné magnetické pole.

18.5. Magnetický inkrementální snímač AMR s anisotropním prvkem

Snímač využívá změnu odporu materiálu NiFe v tenké vrstvě se směrem magnetického pole vzhledem ke směru proudu ve vrstvě. Na obr.5 je znázorněna změna elektrického odporu o několik procent s natáčením magnetického pole. Snímač MAXON používá anizotropní vrstvu ve tvaru pásky s průřezem 50 nm x 5 μm. Velmi malý průřez má dostatečně velký elektrický odpor pro další elektroniku. Pro vyvolání změny odporu stačí velmi slabé magnetické pole. Čtyři pásky pro každý kanál jsou uspořádány do Wheatstonova můstku, který eliminuje vliv teploty na odpor pásky, který se měří. Změna teploty o 10°C způsobí totiž větší změnu odporu než změna směru magnetického pole. Blokové schéma umístění pásek v magnetickém poli jednoho pólu zmagnetovaného disku je na obr.6. Pásky pro dva fázově posunuté kanály a pro referenční signál jednou za otáčku jsou součástí čipu snímače.

Počet magnetických pólů po obvodu zmagnetovaného disku je od 16 do 64 podle velikosti disku. Interpolací se dosáhne hustota do 1024 dílků na otáčku.

18.6. Obrázky

- **Požadavky řízeného pohonu**
 - informace o rychlosti
 - informace o směru rychlosti
 - informace o úhlu natočení
 - informace o referenčním bodu u řízení polohy
- **řešení: digitální snímač**
 - rozdělení otáčky na malé dílky(inkrementy)
 - každý dílek se indikuje elektrickým signálem
 - bez mechanického dotyku rotoru se statorem

Obr. 1 Proč digitální snímač?

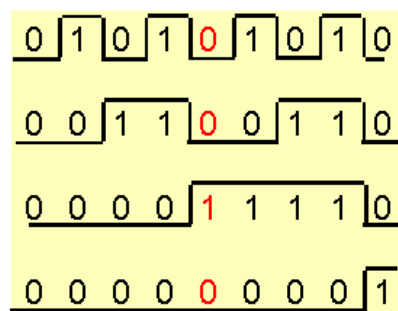
• **inkrementální snímač**

- každý dílek je indikován elektrickým impulsem
- elektrické impulsy jsou stejné při každém natočení
- výhoda: stačí malý počet kabelů
- nevýhoda: pouze relativní informace o poloze

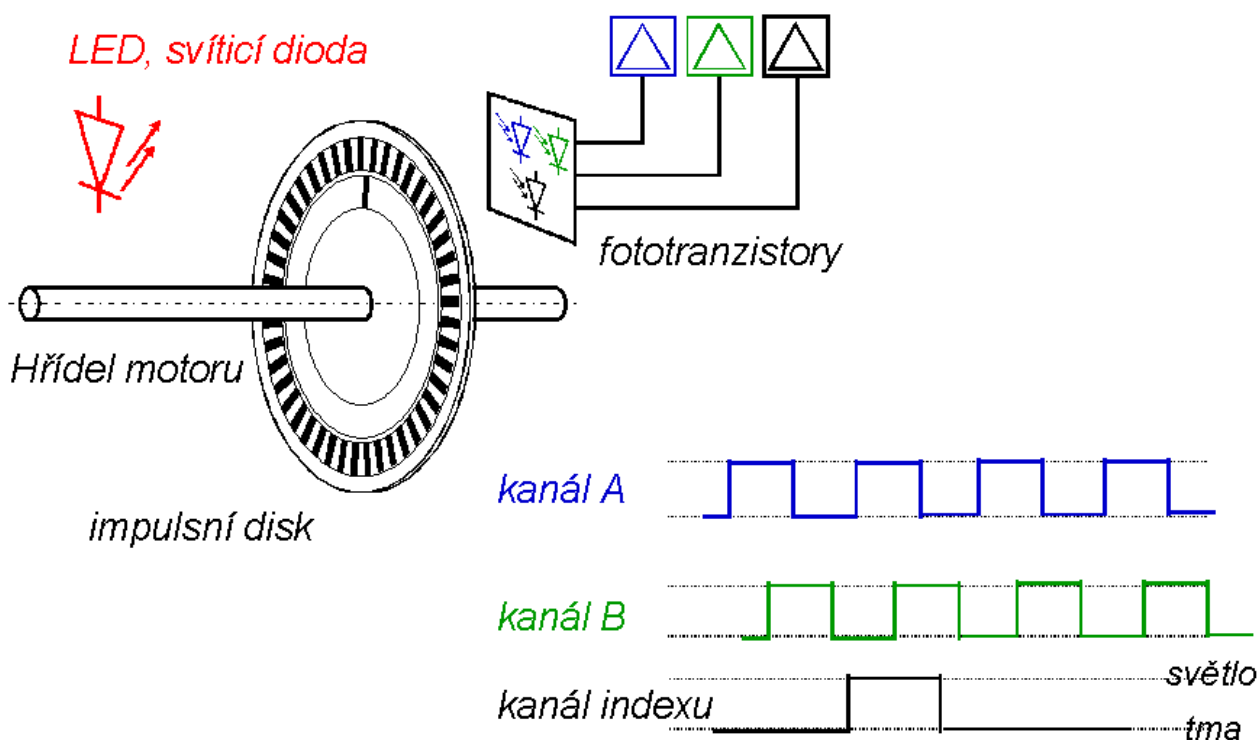


• **absolutní snímač**

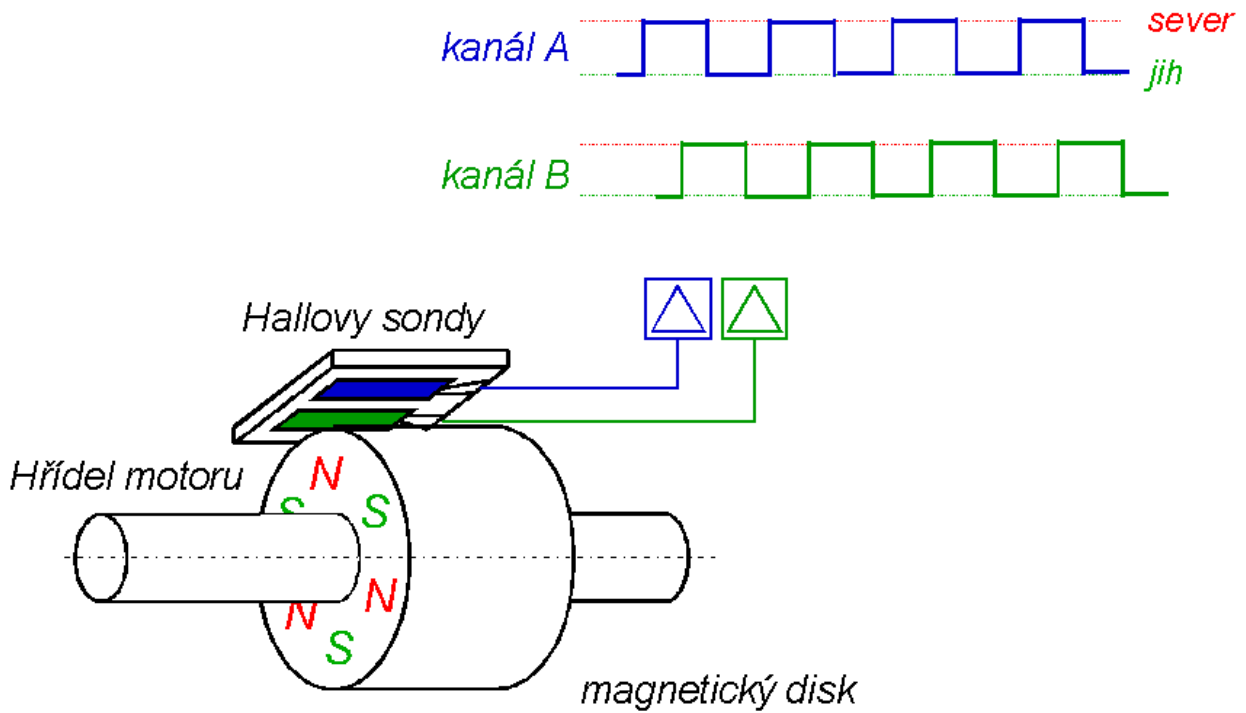
- každá poloha rotoru má svůj vlastní signál polohy
- výhoda : absolutní informace o poloze
- nevýhoda : nutný větší počet kabelů (tj. 10 kabelů pro 1024 dílků)



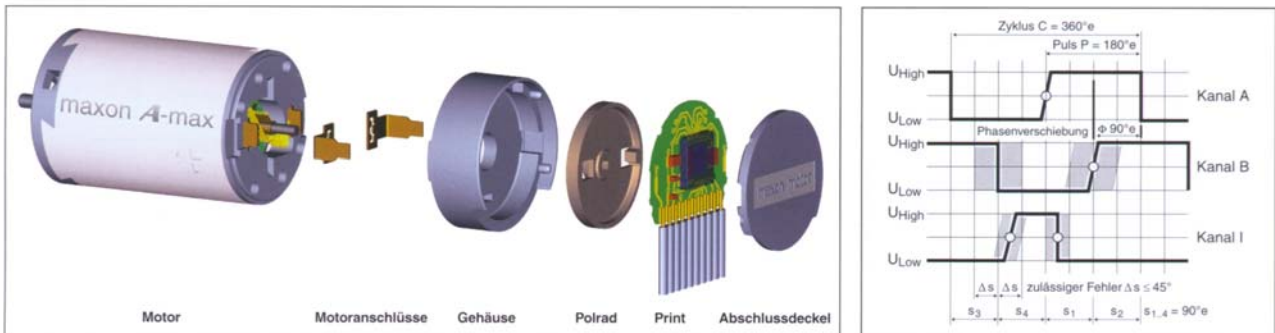
Obr. 2 Typy digitálních snímačů



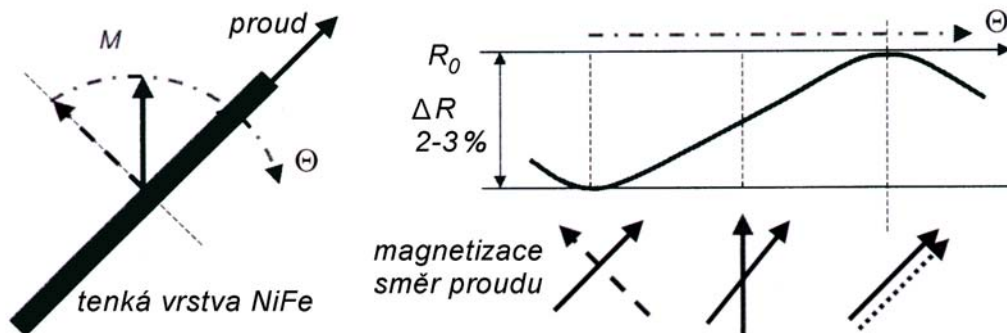
Obr. 3 Optický inkrementální snímač



Obr. 3 Magnetický snímač s Hallovým efektem



Obr. 4 Magnetický inkrementální snímač AMR s anisotropním prvkem (zmagnetovaný disk má na obrázku hnědou barvu)



Obr. 5 Uspořádání snímacích pásek v magnetickém poli jednoho pólu