

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

PEDAGOGICKÁ FAKULTA

KATEDRA FYZIKY

KONSTRUKCE MODELÁŘSKÉHO  
ELEKTROMOTORU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor : Zdeněk Tomášek

Studijní program : B2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Měřicí a výpočetní technika

Vedoucí práce : Ing. Michal Šerý

**České Budějovice**

**2007**

**Prohlášení :**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Konstrukce modelářského elektromotoru vypracoval samostatně, a že jsem veškerou použitou literaturu uvedl v seznamu použité literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích dne .....

Zdeněk Tomášek

## **Anotace**

Cílem této práce je konstrukce malého elektronicky komutovaného motoru z běžně dostupných komponent, který by byl použitelný v modelech letadel do hmotnosti 350g. Součástí práce je teorie fyzikální podstaty točivého stroje, popis druhů stejnosměrných motorů a způsobu řízení otáček. Na závěr je uveden výsledek provedeného měření statického tahu sestrojeného motoru s různými rotory a vrtulemi.

## **Annotation**

The main aim of this thesis is the construction of small electronically switched engine from currently available components. This engine would be usable in aeroplane prototypes into the weight of 350 g. The part of this thesis is the theory of physical principle of a turning engine, the description of kinds of a direct-current motors and the method of speed control. At the end of this thesis is shown the result of measurement of a static thrust of designed engine with different rotors and propellers.

Rád bych na tomto místě poděkoval Ing. Michalu Šerému za spolupráci, cenné rady a podnětné připomínky, které mi pomohly při vypracování této práce.

## Obsah

|          |                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod .....</b>                                                | <b>7</b>  |
| <b>2</b> | <b>Obecná teorie .....</b>                                       | <b>8</b>  |
| 2.1      | Závit s proudem v magnetickém poli.....                          | 8         |
| <b>3</b> | <b>Vysvětlení pojmů .....</b>                                    | <b>12</b> |
| <b>4</b> | <b>Princip a druhy stejnosměrných motorů s komutátorem .....</b> | <b>16</b> |
| 4.1      | Druhy a vlastnosti stejnosměrných motorů.....                    | 16        |
| 4.1.1    | Motor s cizím buzením.....                                       | 16        |
| 4.1.2    | Derivační motor .....                                            | 17        |
| 4.1.3    | Sériový motor .....                                              | 18        |
| 4.1.4    | Kompaundní motor .....                                           | 19        |
| <b>5</b> | <b>Magnety .....</b>                                             | <b>20</b> |
| 5.1      | Obecné vlastnosti magnetů .....                                  | 20        |
| 5.2      | Ferit .....                                                      | 23        |
| 5.3      | AlNiCo.....                                                      | 23        |
| 5.4      | NdFeB a SmCo .....                                               | 24        |
| <b>6</b> | <b>Stejnosměrný motor s komutátorem .....</b>                    | <b>25</b> |
| 6.1      | Konvenční konstrukce .....                                       | 25        |
| 6.1.1    | Rotor.....                                                       | 25        |
| 6.1.2    | Stator .....                                                     | 26        |
| 6.1.3    | Komutátor a kartáče .....                                        | 27        |
| 6.1.3.1  | Uhlíkové kartáče .....                                           | 28        |
| 6.1.3.2  | Kovové kartáče .....                                             | 28        |
| 6.2      | Konstrukce se samonosným vinutím.....                            | 30        |
| <b>7</b> | <b>Stejnosměrný motor bez komutátoru (BLDC motor).....</b>       | <b>32</b> |
| 7.1      | BLDC motor s rotorem s permanentním magnetem ve tvaru válce..    | 33        |
| 7.2      | BLDC motor s rotačním pláštěm (diskový motor) .....              | 33        |
| <b>8</b> | <b>Způsob řízení otáček stejnosměrných motorů.....</b>           | <b>35</b> |
| 8.1      | Změnou odporu .....                                              | 35        |
| 8.2      | Změnou napětí na kotvě .....                                     | 35        |
| 8.3      | Změnou napětí na budícím vinutí .....                            | 36        |

|           |                                                     |           |
|-----------|-----------------------------------------------------|-----------|
| 8.4       | Metodou IxR - s uzavřenou smyčkou bez snímače ..... | 36        |
| 8.5       | Jednokvadrantové řízení.....                        | 37        |
| 8.6       | Dvoukvadrantové řízení .....                        | 37        |
| 8.7       | Čtyřkvadrantové řízení .....                        | 37        |
| <b>9</b>  | <b>Řídící jednotky .....</b>                        | <b>39</b> |
| 9.1       | Lineární proudový regulátor .....                   | 40        |
| 9.2       | Pulzní proudový regulátor .....                     | 41        |
| <b>10</b> | <b>Brždění motoru .....</b>                         | <b>45</b> |
| 10.1      | Do brzdného rezistoru .....                         | 45        |
| 10.2      | Protiproudem .....                                  | 45        |
| 10.3      | Rekuperací.....                                     | 45        |
| <b>11</b> | <b>Snímání polohy rotoru .....</b>                  | <b>46</b> |
| 11.1      | Tachodynamo .....                                   | 46        |
| 11.2      | Resolver.....                                       | 47        |
| 11.3      | Optický inkrementální snímač .....                  | 47        |
| 11.3.1    | Princip IRC snímače .....                           | 48        |
| 11.3.2    | Princip ARC snímače .....                           | 49        |
| 11.4      | Hallovy sondy .....                                 | 49        |
| 11.5      | Zpětná vazba EMF .....                              | 50        |
| <b>12</b> | <b>Konstrukce BLDC motoru .....</b>                 | <b>51</b> |
| 12.1      | Materiál ke stavbě.....                             | 51        |
| 12.2      | Konstrukce .....                                    | 51        |
| <b>13</b> | <b>Měření.....</b>                                  | <b>59</b> |
| 13.1      | Pomůcky pro měření .....                            | 59        |
| 13.2      | Postup měření.....                                  | 59        |
| <b>14</b> | <b>Závěr .....</b>                                  | <b>61</b> |
| <b>15</b> | <b>Seznam použité literatury .....</b>              | <b>65</b> |
|           | <b>Přílohy .....</b>                                | <b>67</b> |

# 1 Úvod

V posledních několika letech se značně rozšířila nabídka elektropohonů pro modelářskou veřejnost. Od levných komutátorových motorů až po elektronicky komutované elektromotory. Velikost pohonů je od velmi malých až po velké a dosahují vzhledem k poměru své velikosti a hmotnosti velmi slušných výkonů. Velký význam pro rozšíření elektropohonů v modelářství přinesl rozmach výkonové polovodičové techniky používané pro řízení otáček motorů. Vše je dáno také nárůstem konkurence. Ceny materiálů a tím i ceny finálních výrobků klesají na přijatelnou hodnotu i pro běžného modeláře. Nedílnou součástí pohonů jsou také pohonné baterie (akumulátory), jejichž vývoj kráčí také velmi rychle kupředu a v současné době jsou k dispozici zdroje s velkou kapacitou, nízkou hmotností a schopností dodávat vysoké proudy v desítkách ampér a s relativně dlouhou životností (NiCd, NiMh, LiOn, LiPol, A123). A budoucnost chystá další alternativy. Příkladem jsou kapacitní články na bázi kondenzátorů.

V modelářské praxi jsou nejrozšířenějšími elektropohony stejnosměrný motor s komutátorem a elektronicky komutované (BLDC) motory. Elektropohon využívá každým rokem stále více modelářů. U elektropohonu odpadají problémy se startováním motoru, jaké se vyskytují u spalovacích motorů. Další výhodou je, že elektropohon neznečišťuje povrch modelu spaliny. Motor se nezastaví za letu, pokud nedojde k technické závadě nebo k vybití akumulátorů. Modeláři používající spalovací motory se stále častěji setkávají s negativním postojem, neboť hlukem motoru ruší okolí. Další stránka věci je ekologie. Nevýhoda elektropohonu je stále v jeho vyšších pořizovacích nákladech. Elektropohon neznamená totiž pouze motor, baterie a proudový regulátor, ale další nezanedbatelnou součástí je i kvalitní nabíječ, případně stabilizovaný zdroj (sítový), nebo akumulátor pro nabíjení na letišti.

Stejnosměrné motory a dynama jsou nejstarším typem elektromotorů a generátorů proudu. Tyto motory lze nalézt v mnoha aplikacích od hraček přes domácí spotřebiče, automobily až po uplatnění v průmyslu. I přes velký rozmach asynchronních a synchronních střídavých motorů nacházejí pro své vlastnosti a charakteristiky stále uplatnění. S rozvojem polovodičových součástek uplatňovaných při řízení a regulaci těchto pohonů se otevírají další možnosti jejich využití.

## 2 Obecná teorie – fyzikální podstata točivého stroje

Tato kapitola je zaměřena na fyzikální podstatu točivého stroje, působení sil na vodič a závit s proudem v magnetickém poli. [15]

### 2.1 Závit s proudem v magnetickém poli

Tato teorie je zaváděna pro pochopení dějů, které probíhají v motoru. Na počátku je potřeba zmínit vodič v magnetickém poli a síly, které na něj působí, protéká-li jím elektrický proud. Ampér dokázal, že velikost síly  $d\vec{F}$ , která působí v magnetickém poli na vodič o délce  $dl$ , kterým protéká elektrický proud, závisí na velikosti elektrického proudu a velikosti magnetické indukce. Tato síla je přímo úměrná velikosti proudu protékajícího vodičem a magnetické indukci. Velikost síly závisí také na velikosti sinu úhlu, který svírá magnetické pole se směrem elementu proudu. Pokud je magnetické pole kolmé na směr elementu proudu, je síla maximální, pokud je magnetické pole rovnoběžné se směrem elementu proudu, je síla nulová. To lze zapsat rovnicemi (2.1, 2.2).

$$d\vec{F} = I \cdot \vec{B} \cdot d\vec{l} \cdot \sin \alpha \quad (2.1)$$

a ve vektorovém tvaru:

$$d\vec{F} = I \cdot (d\vec{l} \times \vec{B}) \quad (2.2)$$

z vektorového tvaru zápisu vyplývá, že síla je kolmá na směr proudu a magnetického pole. Tento vztah se nazývá Ampérovým zákonem elektromagnetické indukce.

Ještě zbývá určit směr, kterým bude síla působit. Tento směr se určí pomocí Flemingova pravidla levé ruky. Pokud se položí levá ruka na vodič tak, že prsty ukazují směr proudu a indukční čáry vstupují do dlaně, pak palec ukazuje směr, kterým bude síla působit.

Pokud je tedy do magnetického pole (uvažujeme homogenní magnetické pole) vložen přímý vodič, kterým protéká proud, projeví se účinek síly posuvným pohybem.



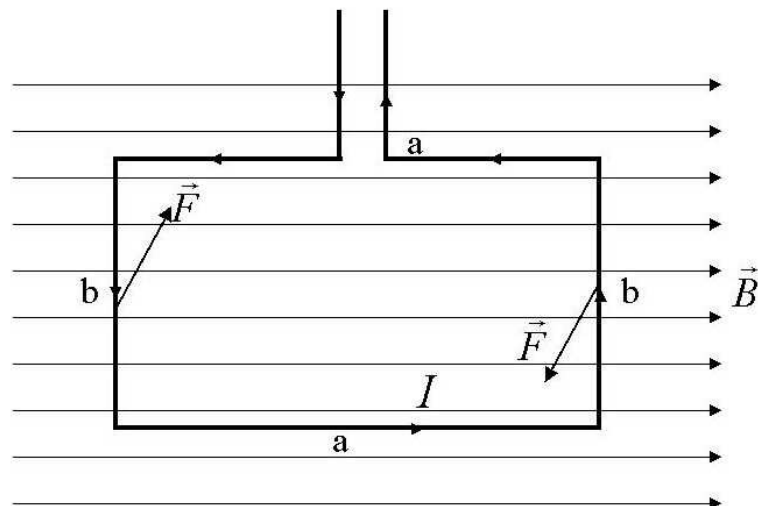
Dalším předmětem zkoumání je chování volně pohyblivého závitu o ploše  $S$  v magnetickém poli, kterým také protéká proud. Mnoha pokusy bylo zjištěno, že se snaží zaujmout rovnovážnou polohu, kdy kladná normála plochy závitu  $\mathbf{S}$  má stejný směr jako vektor magnetické indukce. Je-li tedy zátvit, kterým protéká elektrický proud v magnetickém poli, působí na něj moment dvojice sil, který se snaží otočit zátvit do rovnovážné polohy, ve které je moment dvojice sil nulový. Moment dvojice sil je maximální pokud je kladná normála plochy závitu  $\mathbf{S}$  kolmá na vektor magnetické indukce  $\mathbf{B}$ . Z toho plyne:

1. Pokud je magnetická indukce  $\mathbf{B}$  konstantní, závisí velikost momentu dvojice sil  $\mathbf{D}$  úměrně na proudu  $I$  a velikosti plochy  $S$  a roste úměrně se sinem úhlu, který svírají kladná normála plochy závitu  $\mathbf{S}$  a vektor magnetické indukce  $\mathbf{B}$ . Přitom bylo zjištěno, že nezáleží na tvaru závitu.
2. Pokud jsou proud  $I$ , plocha závitu  $S$  a úhel  $\alpha$  konstantní, roste moment dvojice sil  $\mathbf{D}$  úměrně s velikostí magnetické indukce  $\mathbf{B}$ .
3. Pokud jsou magnetická indukce  $\mathbf{B}$ , plocha závitu  $S$  a úhel  $\alpha$  konstantní, roste moment dvojice sil  $\mathbf{D}$  úměrně s velikostí proudu  $I$ .

Velikost momentu dvojice sil lze zapsat vztahem (2.3)

$$\vec{D} = I \cdot \vec{B} \cdot S \cdot \sin \alpha \quad (2.3)$$

Tento vztah lze odvodit pomocí rovinného závitu ve tvaru obdélníku zobrazeném na obr. č. 2.1.



Obr. č. 2.1 - Závít s proudem v magnetickém poli a síly na něj působící. Vodorovné čáry s šipkou naznačují směr vektoru magnetické indukce (indukčních čar). Šipky na závitu ukazují směr proudu  $I$ . Síly  $F$  zobrazují působení dvojice sil  $D$  na závít.

Moment dvojice sil lze vypočítat pomocí vztahu

$$\vec{D} = \vec{F} \cdot a \quad (2.4)$$

kde  $F$  je síla (síly jsou stejně velké, opačné, ale neruší se, protože každá působí v jiném bodě). Hodnota  $a$  je rameno dvojice sil.

Pokud je za sílu  $F$  dosazen vztah (2.5)

$$d\vec{F} = I \cdot \vec{B} \cdot b \cdot \sin \alpha \quad (2.5)$$

kde  $b$  je délka přímého vodiče v magnetickém poli, potom

$$\vec{D} = I \cdot \vec{B} \cdot a \cdot b \cdot \sin \alpha \quad (2.6)$$

místo součinu  $a, b$  lze napsat

$$S = a \cdot b \quad (2.7)$$

pak je výsledný vztah pro moment dvojice sil  $\vec{D}$

$$\vec{D} = I \cdot \vec{B} \cdot S \cdot \sin \alpha \quad (2.8)$$

a vektorově:

$$\vec{D} = I \cdot (\vec{B} \times \vec{S}) \quad (2.9)$$

Tento vztah platí pro jeden závit v homogenním magnetickém poli. Pokud se vloží do magnetického pole solenoid (rovinná cívka), který má všechny závity rovnoběžné, kolmé k ose solenoidu, a stejné velikosti, zvětší se moment dvojice sil působící na solenoid úměrně s počtem závitů. Výsledný vztah pro výpočet dvojice sil vyjadřuje vztah (2.10).

$$\vec{D} = N \cdot I \cdot \vec{B} \cdot S \cdot \sin \alpha \quad (2.10)$$

a vektorově:

$$\vec{D} = N \cdot I \cdot (\vec{B} \times \vec{S}) \quad (2.11)$$

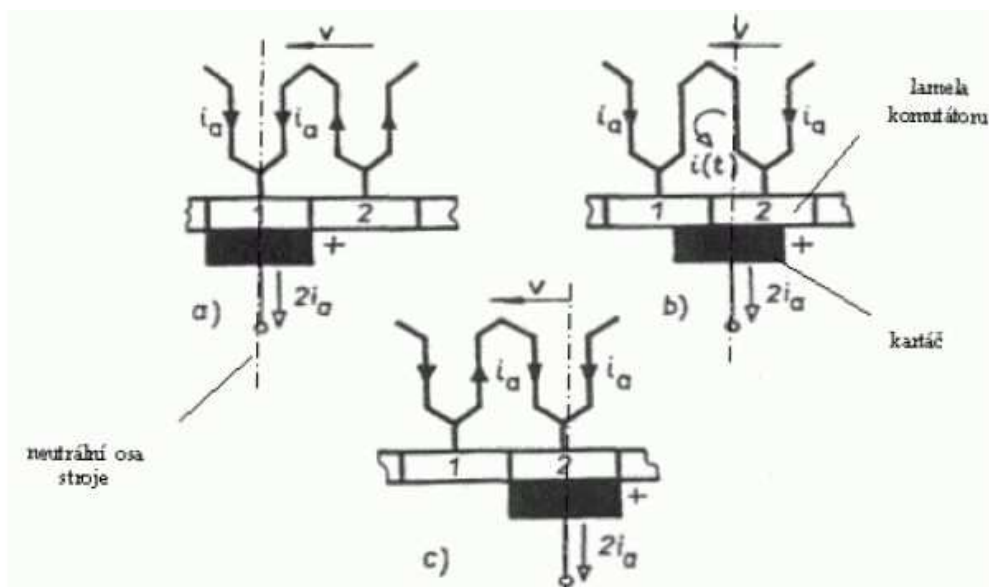
kde  $S$  je plocha průřezu solenoidu a  $\alpha$  je úhel, který svírá osa solenoidu s vektorem magnetické indukce.

### 3 Vysvětlení pojmů

#### Komutace

Komutace je proces, kdy v cívce vinutí kotvy dochází ke změně směru proudu. Na začátku komutace leží kartáč na lamelu číslo 1 (obr. č. 3.1) a cívkou zapojenou mezi lamelami 1 a 2 protéká proud jedním směrem. V další fázi spojí kartáč lamely 1 a 2 a dojde k jejich zkratování. V tomto okamžiku neprotéká cívkou žádný proud. V poslední fázi se dostane kartáč na lamelu číslo 2. Cívkou mezi lamelou 1 a 2 protéká proud stejné velikosti jaký protékal ve fázi jedna tou samou cívkou mezi lamelami 1 a 2, ale opačného směru.

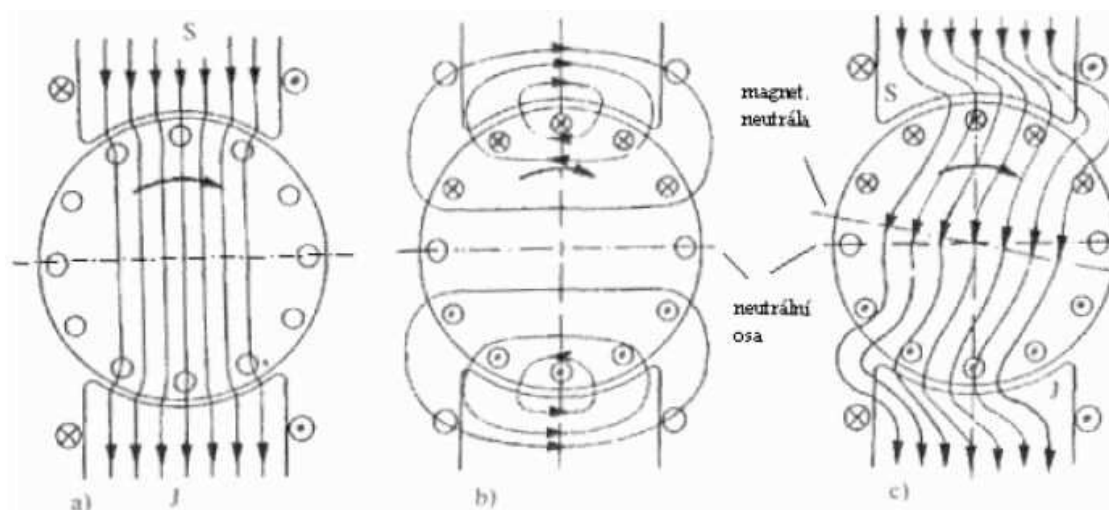
Během komutace se v komutované cívce indukuje tzv. pohybové napětí, které vzniká na základě pohybu cívky v magnetickém poli a reaktanční napětí indukované časovou změnou proudu v komutující cívce. Pohybové napětí bude nulové pokud se bude komutující cívka nacházet v magnetické neutrále. V té je magnetická indukce nulová. Při zatížení hřídele se mění i poloha magnetické neutrály vlivem reakce kotvy (u motoru se neutrální osa posune proti smyslu otáčení, u dynama ve směru otáčení rotoru). Tak se nachází komutující cívka v magnetickém poli o nenulové magnetické indukci a indukuje se v ní napětí. Díky tomuto napětí dochází ke zpožděné komutaci, kdy se před ukončením komutace do cívky indukuje velké reaktanční napětí. Jeho velikost je dána indukčností cívky a velikostí časové změny proudu v cívce. Ke zlepšení komutace a omezení jiskření na komutátoru se používají pomocné póly umístěné mezi póly hlavní, nebo kompenzační vinutí, které je uloženo v pólových nastavcích hlavních pólů. Jejich vinutí je zapojeno do série s vinutím kotvy tak, že proud jím procházející budí magnetické pole, které působí proti magnetickému poli kotvy, takže se navzájem vyruší (potlačí se reaktanční napětí) a ve statoru zůstane pouze magnetické pole hlavních pólů. Kompenzační vinutí se používá pouze u velkých strojů, protože je výrobně nákladné. Zlepšení komutace lze dosáhnout také natočením zadního víka statoru s kartáči proti směru otáčení kotvy motoru. [9]



Obr. č. 3.1 - Komutace jedné cívky a) proud protéká cívkou jedním směrem, b) lamely jsou zkratovány, proud cívkou neprotéká, c) proud protéká cívkou opačným směrem

## Reakce kotvy

Je zpětné působení magnetického pole kotvy na magnetické pole hlavních pólů. To je zeslabováno a deformováno. U velkých strojů je reakce kotvy značná, protože kotvou prochází proud v desítkách až tisíci ampér. Na obr. č. 3.2 je znázorněna reakce kotvy. Obrázek a) zobrazuje magnetické pole hlavních pólů motoru bez zatížení, obrázek b) magnetické pole rotoru (kotvy). Při zatížení hřídele je výsledné magnetické pole pootočené, magnetická neutrální osa je posunutá od neutrální osy obrázek c). [9]



Obr. č. 3.2 - Průběhy magnetických polí a) magnetické pole statoru nezatíženého motoru, b) magnetické pole rotoru, c) magnetické pole zatíženého motoru

### Vířivé proudy

Vznikají v masivních vodičích. Vlivem proměnlivého magnetického pole se ve vodičích indukují lokální proudy, které tvoří uzavřené smyčky (uzavírají se po cestách nejmenšího odporu). Tyto indukované proudy dosahují velkých hodnot vzhledem k nízkému odporu vodiče. Tím vzniká Jouleovo teplo, které značně zahřívá vodič. Vzhledem k tomu, že jádro točivého stroje je vyrobeno z vodivého materiálu, indukují se v něm také vířivé proudy. To zhoršuje magnetické vlastnosti kovového jádra a dochází tak ke ztrátám přeměnou části energie přivedené na zmagnetování a také k hysterezním ztrátám. Jádro točivého stroje se zahřívá tedy jak, Jouleovým teplem při vzniku vířivých proudů, tak i teplem vzniklým při hysterezních ztrátách v železném materiálu. Velikost vířivých proudů stoupá se zvyšující se frekvencí změny magnetického pole. Dalším negativním účinkem vířivých proudů je jejich brzdicí účinek. Podle Lencova zákona vznikají při pohybu vodiče v magnetickém poli ve vodiči vířivé proudy takového směru, že síly magnetického pole působí proti směru jeho pohybu. Tím tedy dochází k brždění. Proto jsou jednotlivé plechy jádra izolované a zvyšuje se jejich měrný odpor například příměsí křemíku. Jednotlivé plechy jader točivých strojů nebo transformátorů jsou od sebe izolovány lakem, oxidační vrstvou nebo tenkým hedvábným papírem a jsou uspořádány tak, aby magnetický tok procházel ve směru roviny plechů. Lištěním magnetických obvodů se dosáhne toho, že vířivé

proudy procházejí po delších cestách o tenkém průřezu a nabývají proto menších hodnot. [15]

### **Hysterezní ztráty**

Ztráta magnetickou hysterezí je nazývána práce úměrná velikosti plochy hysterezní smyčky. Je to práce ztracená, neboť je vynaložená na natáčení elementárních magnetů v materiálu, přičemž vzniká tření a energie na jeho překonání se mění v teplo. Při trvalé střídavé magnetizaci se musí přivádět do cívky vinutí výkon, který přestoupí do železa, aby pokryl hysterezní ztráty a přeměnil se v neužitečné teplo. Proto se jádro vinutí vyrábí z materiálu, který má úzkou hysterezní smyčku, aby byly ztráty magnetickou hysterezí co nejmenší. [15]

### **Magnetická anizotropie**

Každý typ magneticky tvrdého materiálu má své fyzikální hranice parametrů, kterých může dosáhnout. Pokud je třeba dosáhnout většího součinu  $BH_{\max}$ , je nutné použít jiný materiál, nebo využít magnetickou anizotropii. Pomocí magnetické anizotropie lze dosáhnout lepších vlastností magnetu ze stejného materiálu než u klasického izotropního magnetu. Anizotropní magnet lze získat působením silného magnetického pole nebo napětí jistého směru. Výsledný magnet má pak ve směru hlavní osy výrazně lepší parametry než izotropní magnet ze stejného materiálu, ale v ostatních rovinách naopak výrazně nižší. Aby bylo možné využít vlastností anizotropního magnetu, musí být magnetován ve směru hlavní osy. [16, 17]

## **4 Princip a druhy stejnosměrných motorů s komutátorem**

Stejnoseměrný motor je zařízení (stroj), který slouží k přeměně elektrické energie v energii mechanickou. Stejnoseměrný stroj je nejstarší točivý elektrický stroj. Zpočátku se stejnoseměrný stroj používal jako generátor stejnoseměrného napětí – dynamo. Později se začaly využívat i jako motory. Z toho plyne, že stejnoseměrné stroje se dělí na generátory stejnoseměrného napětí a na stejnoseměrné motory. V dnešní době jsou stejnoseměrné motory vytlačovány motory střídavými (asynchronními, synchronními). Jejich výroba je nákladnější, jsou náročnější na údržbu a životnost je omezená jejich konstrukcí. Nicméně jsou odvětví, kde je jejich použití výhodné (domácí spotřebiče, nářadí, trakční motory, regulační pohony obráběcích strojů, v automobilovém průmyslu, v těžních strojích).

Základním problémem mechanicky komutovaných stejnoseměrných motorů je jejich omezená životnost z důvodu životnosti komutátoru. Další nevýhodou je jiskření, které vzniká odpojováním lamel od napájení a tím dochází k rušení. Komutátor omezuje rychlost otáčení motoru. Brždění motoru komutátorem je dáno typem kartáčů. Toto vše vedlo k vylepšování těchto motorů a tak vznikla například konstrukce se samonosným vinutím.[2 - 6].

### **4.1 Druhy a vlastnosti stejnoseměrných motorů**

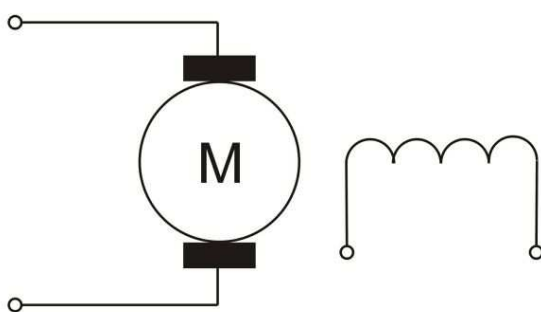
Stejnoseměrné motory s komutátorem se dělí podle zapojení vinutí kotvy s budícím vinutím na motory s cizím buzením, derivační, sériové a kompaundní.

#### **4.1.1 Motor s cizím buzením**

U tohoto typu motoru je vinutí statoru (budící) napájeno samostatným zdrojem napětí (obr. č. 4.1). Budící napětí je většinou stálé, nemění se. Proto je i konstantní magnetický tok. Není to však pravidlem. U motorů s cizím buzením lze řídit otáčky jak změnou napětí na kotvě, tak změnou napětí na budícím vinutí. Otáčky se mohou pohybovat v širokém rozsahu, který není závislý na kmitočtu sítě. Pokud se řídí otáčky motoru pouze změnou napětí na kotvě, jedná se o lineární prvek. Změnu smyslu otáčení



motoru lze dosáhnout změnou polarity napájení do kotvy, nebo změnou polarity napájení budícího vinutí. Otáčky motoru závisí na svorkovém napětí přiváděném do kotvy motoru (rotoru). Svorkové napětí je v rovnováze s indukovaným napětím ve vinutí kotvy a úbytkem napětí na kotvě. Úbytek je asi 10 % svorkového napětí při odebíraném proudu, takže otáčky klesají velmi pomalu. Moment motoru při stálém magnetickém toku závisí na odebíraném proudu v kotvě (zatížení). Momentová charakteristika motoru je přímka, která se při velkém zatížení ohýbá k ose x vlivem zvětšující se reakce kotvy. Záběrový moment motoru je dobrý, protože je omezen pouze hodnotou spouštěcího rezistoru. Motor lze brzdít rezistorem, protiproudem i rekuperací. U tohoto motoru lze nahradit budící vinutí permanentními magnety. Tím odpadá zdroj napětí pro budící vinutí. Zjednoduší se tím konstrukce. Permanentní magnety se používají převážně pro motory malých výkonů. Velikost magnetického toku ve vzduchové mezeře je závislá na použitém druhu magnetu a jeho vlastnostech. Pokud je motor vybaven pomocnými komutačními póly nebo kompenzačním vinutím, je vinutí kotvy zapojeno do série s vinutím pomocných pólů a s kompenzačním vinutím. [2-6]

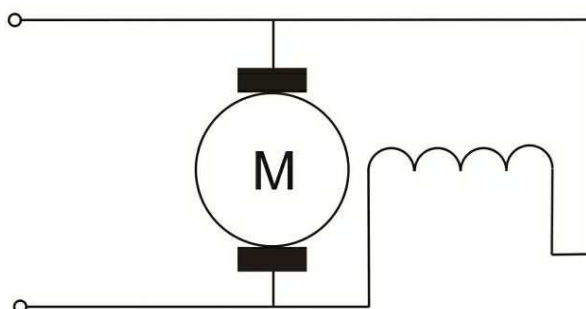


Obr. č. 4.1 - Schéma zapojení motoru s cizím buzením

#### 4.1.2 Derivační motor

Derivační motor má budící vinutí statoru připojené paralelně k vinutí kotvy (obr. č. 4.2). Spouštěcí rezistor kotvy je zapojen v sérii s kotvou. Budící vinutí je zapojeno před spouštěcím rezistorem kotvy přímo na zdroj napětí. Je to odůvodněno tím, že je potřeba dosáhnout velkého magnetického toku budícího vinutí. K jeho dosažení je potřeba dostatečně velký proud do budícího vinutí. Do obvodu budícího vinutí je zapojen rezistor, kterým se řídí velikost budícího proudu a tím i otáčky motoru.

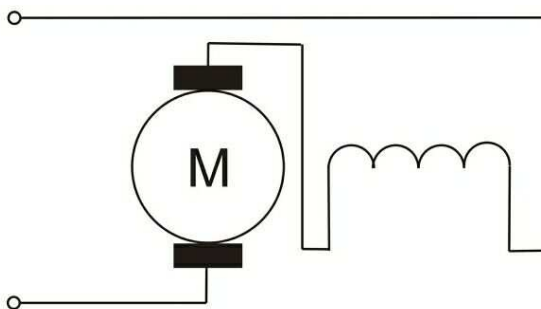
Při spouštění motoru je rezistor vyřazen. Pokud je potřeba zvýšit otáčky, snížíme velikost proudu do budícího vinutí, tím se sníží i velikost magnetického toku. Pokud by se při malých otáčkách přerušil budící obvod, v budícím vinutí by zůstal pouze zbytkový magnetismus, otáčky by nebezpečně stouply a motor by se mohl poškodit. Derivační motor lze brzdít rezistorem, protiproudem i rekuperací. Při brždění rekuperací je nutné zvětšit magnetický tok, to je ale omezeno nasycením magnetického obvodu. Derivační motory se používají všude tam, kde potřebujeme dosáhnout konstantních otáček nezávisle na zatížení motoru. [2-6]



Obr. č. 4.2 - Schéma zapojení derivačního motoru

#### 4.1.3 Sériový motor

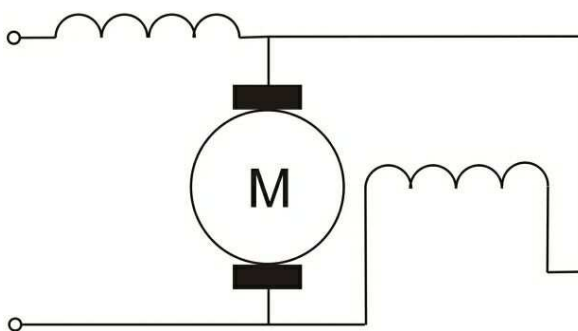
Sériový motor má vinutí kotvy i budící vinutí zapojeno v sérii (obr. č. 4.3). Pokud se zanedbají ztráty (úbytek napětí) ve vinutí motoru, je na svorkách motoru konstantní napětí a otáčky nepřímo závisí na magnetickém toku. Dokud není magnetický obvod nasycen, je magnetický tok přímo úměrný proudu. Otáčková charakteristika má tvar hyperboly. Při zatížení otáčky motoru rychle klesají. Momentová charakteristika je úměrná druhé mocnině proudu dokud není nasycen magnetický obvod a má tvar paraboly. Z toho plyne, že motor má při nízkých otáčkách velký záběrný moment. Otáčky motoru lze řídit paralelně připojeným rezistorem k budícímu vinutí. Pokud se sníží proud do budícího vinutí, sníží se magnetický tok a zvýší se otáčky. Otáčky lze snižovat také předřadným rezistorem. Sériový motor se brzdí pomocí rezistoru. Aby se při brždění nepotlačoval remanentní magnetismus, musí se budící vinutí přepólovat. Používají se například k pohonu jeřábů. Otáčky naprázdno mohou být teoreticky nekonečně velké, proto by motor neměl pracovat bez zatížení, jinak by se mohl poškodit. [2-6]



Obr. č. 4.3 - Schéma zapojení sériového motoru

#### 4.1.4 Kompaundní motory

Je to takzvaný sdružený motor, který má sériové i paralelní (derivační) vinutí (obr. č. 4.4), které magnetují souhlasně nebo proti sobě. Pokud působí obě vinutí souhlasně, má motor větší záběrný moment než má motor derivační a otáčky neklesají tolik jako u sériového motoru. Při náhlém odlehčení nehrozí poškození motoru. Působí-li sériové vinutí proti paralelnímu, neklesají otáčky při zatížení. Pokud vzroste zatížení, poklesnou otáčky, proud v sériovém budícím vinutí vzroste, buzení se sníží a otáčky vzrostou. Charakteristiky motoru také závisí na poměru závitů sériového a paralelního vinutí. Při brždění se odpojí sériové vinutí a motor se brzdí jako derivační. Tyto motory se používají k pohonu výtahů, bagrů. U některých trolejbusů se používají z důvodu brždění rekuperací. [2-6]



Obr. č. 4.4 - Schéma zapojení kompaundního motoru

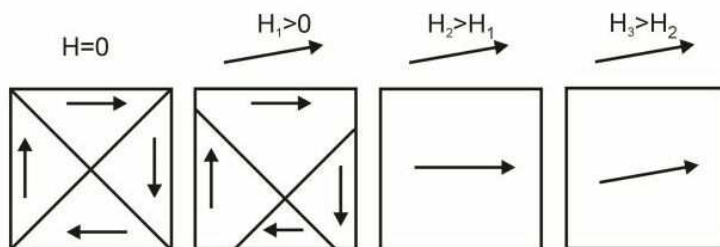
## 5 Magnety

V této kapitole jsou uvedeny základní vlastnosti a druhy magnetů.[15, 16, 17, 18].

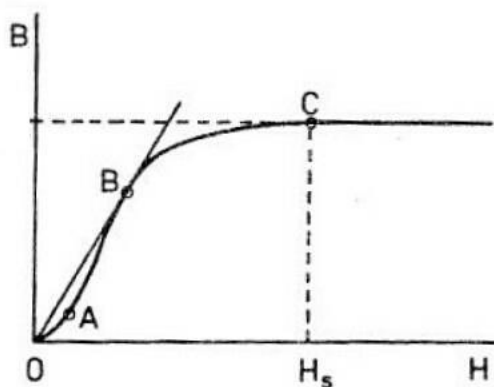
### 5.1 Obecné vlastnosti magnetů

Pro výrobu permanentních magnetů se používají tzv. magneticky tvrdé materiály, které mají schopnost uchování magnetické polarizace  $J$  a vyznačují se vysokou hysterezí. Permanentní magnety se vyrábějí tak, že se magnetují elektromagnety, do jejichž cívek je pulzně pouštěn velký proud. Mezi jednotlivými pulzy se měří pracovní bod magnetu. Feromagnetické látky mají na rozdíl od ostatních látek jiné magnetické vlastnosti jež jsou podmíněny existencí spontánní magnetizace a existencí doménové struktury. Feromagnetické vlastnosti látek jsou vázány pouze na určitý obor teplot. S rostoucí teplotou magnetizace feromagnetika postupně klesá a při teplotě zvané Curie mizí feromagnetické vlastnosti látky a látka se chová jako paramagnetická. Feromagnetický materiál pod Curie teplotou je tvořen doménami. Pokud není feromagnetikum zmagnetováno, mají jednotlivé domény různý směr (magnetický moment elektronů v atomech je orientovaný nahodile, proto je výsledný magnetický moment látky nulový a látka se nechová jako magnet). Vloží-li se feromagnetický materiál do magnetického pole o intenzitě  $H$ , začnou se domény orientované podobným směrem jaký má intenzita magnetického pole  $H$  zvětšovat na úkor domén orientovaných jiným směrem (obr. č 5.1). Ke změně objemu domén dochází posunem doménových stěn. Zvyšováním intenzity  $H$  se dosáhne toho, že ostatní domény vymizí a feromagnetikum je tvořeno pouze jednou doménou a pokud je intenzita  $H$  dostatečně velká, má výsledná doména feromagnetika směr intenzity pole  $H$ . Tím se stane magnetizace feromagnetika nasycenou. Dalším zvyšováním intenzity magnetického pole se už magnetizace feromagnetického materiálu prakticky nemění. Proces magnetizace feromagnetického materiálu probíhá ve třech dějích. Posunem doménových stěn, stáčením vektoru spontánní magnetizace a paraprocem Magnetizační děj se zobrazuje pomocí magnetizační křivky. Vychází-li tato křivka z bodu nulové magnetizace, nazývá se křivkou panenskou nebo křivkou prvotní magnetizace (obr. č. 5.2). Nulový stav magnetizace je charakterizován chaotickým uspořádáním domén ve feromagnetickém materiálu. V magnetickém poli o malé

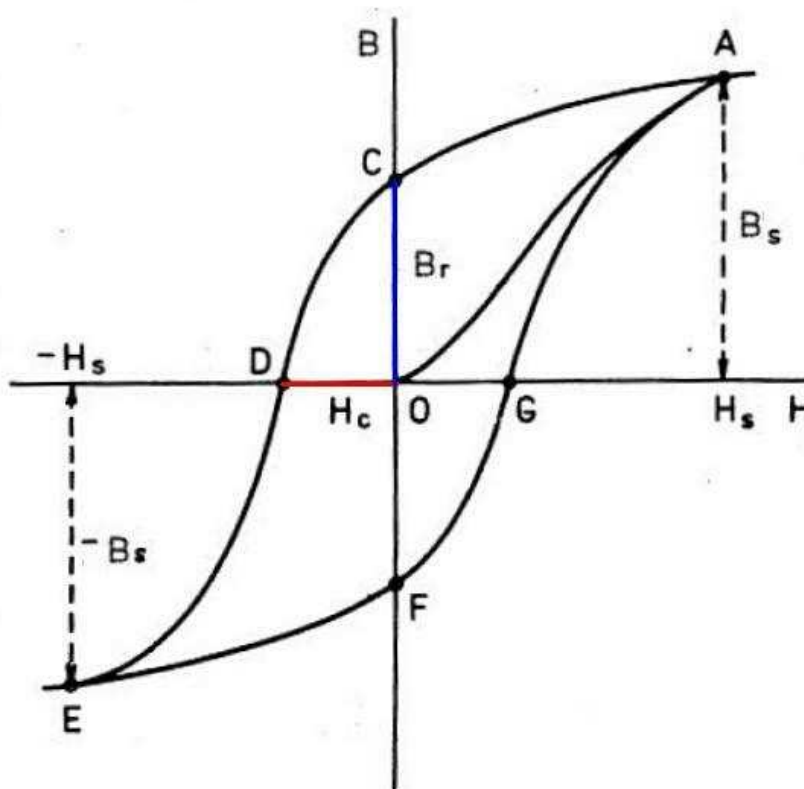
intenzitě dochází nejprve k posuvu doménových stěn, což je většinou děj vratný. Část křivky (obr. č. 5.2) mezi body 0-A. Mezi body A a B dochází k dějům nevratným. Nedochází k nim plynule, ale po skocích. Blíže k bodu B se začíná uplatňovat i stáčení vektoru spontánní magnetizace a mezi body B a C už probíhá magnetizace téměř pouze stáčením vektoru spontánní magnetizace. V bodě C je již magnetizace nasycená a směr spontánní magnetizace se natočí ve směru pole. Začne-li se velikost magnetického pole snižovat, tak magnetizace nesleduje původní křivku, ale zpožďuje se vůči magnetickému poli. V okamžiku, kdy klesne intenzita magnetického pole na nulu, magnetizace si udržuje určitou hodnotu OC (obr. č. 5.3). Ta se nazývá remanentní (zbytková) magnetizace  $B_r$ , nebo-li remanence. Aby se remanentní magnetizace zrušila, musí se působit magnetickým polem opačného směru o intenzitě  $H_c$ . To se nazývá koercivitou. Dalším zvyšování magnetického pole v záporném směru se dosáhne záporné hodnoty nasycení. Postupuje-li se pak opět do kladných hodnot magnetického pole, dostane se křivka opět do kladné hodnoty nasycení. Smyčka, která takto vzniká je nazývána hysterezní smyčkou (obr. č. 5.3). Vlastnosti magnetu jsou většinou charakterizovány remanencí  $B_r$ , koercivitou  $H_c$  a maximálním součinem  $HB_{max}$ .



Obr. č. 5.1 - Změna doménové struktury feromagnetika v magnetickém poli



Obr. č. 5.2 - Křivka prvotní magnetizace



Obr. č. 5.3 - Hysterezní smyčka

Remanencí  $B_r$  [T] se nazývá velikost magnetické indukce  $B$ , na které se ustálí pracovní bod magnetu po ukončení působení vnějšího magnetického pole (zbytkový magnetismus).

Koercivita  $H_c$  [A.m<sup>-1</sup>] je intenzita magnetického pole, která působí proti magnetizaci tak, aby výsledná magnetická indukce  $B$  byla rovna nule. Je mírou odolnosti magnetu proti odagnetování (vyjadřuje míru snahy magnetu dostat se na nulovou energetickou hladinu).

Maximální součin  $HB_{\max}$  [J.m<sup>-3</sup>] udává celkovou míru magnetické energie magnetu. Odpovídá síle, kterou magnet působí na jiné feromagnetické materiály. Nejčastěji na železo. Čím je větší hodnota součinu  $HB_{\max}$ , tím menší může být objem magnetu potřebný pro danou aplikaci.

Magnetická polarizace  $\vec{J}$  vyjadřuje rozdíl mezi magnetickou indukcí ve feromagnetické látce a ve vakuu. Magnetickou polarizaci lze vyjádřit vztahem (5.1).

$$\vec{J} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} - \mu_0 \cdot \vec{H} = \vec{B} - \vec{B}_0 \quad (5.1)$$

## 5.2 Ferit

Feritové magnety jsou nejrozšířenější skupinou magnetů. Jejich roční celosvětová produkce se pohybuje kolem 300 000 tun. Vyrábí se metodou sintrování (spékání práškové směsi za vysoké teploty a tlaku) z oxidů železa, baria a stroncia. Výsledným produktem je velmi tvrdý a křehký materiál. K jejich výhodám patří jejich nízká cena v přepočtu na kilogram a možnost výroby v různých tvarech a velikostech. Feritové magnety se používají jako přídržné, v elektromotorech, generátorech, hračkách, senzorech atd. Co se týče elektromotorů, používají se hlavně v jednoduchých a levných stejnosměrných motorech s komutátorem.

Curie teplota se pohybuje kolem 450 °C.

## 5.3 AlNiCo

Alnico magnety se vyrábějí metodou slévání. Pomocí přesného odlévání se vyrábějí i v různých tvarech. Alnico magnety jsou tvrdé a jiné opracování než broušení je obtížné. Během vývoje se vylepšily magnetické vlastnosti a stoupla Curie teplota, která se pohybuje v rozmezí 810 – 860 °C. Díky vysoké Curie teplotě je lze používat v systémech, kde jsou vyžadovány materiály odolné vysoké teplotě. Vyrábí se jako izotropní a anizotropní. Anizotropie se dosahuje nejčastěji působením silného magnetického pole v jednom směru. Anizotropií lze dosáhnout větší přídržné síly magnetu. Alnico magnety se používají do středně velkých elektromotorů, reproduktorů, měřících přístrojů, elektroměrů, průmyslových přídržných systémů.

## 5.4 NdFeB a SmCo

Magnety vyráběné na bázi vzácných zemin obsahujících Neodym (Nd) nebo Samarium (Sm) byly vyvinuty teprve v nedávné době. Tyto permanentní magnety se vyznačují zatím největší intenzitou magnetického pole z dosud známých materiálů. Vyrábějí se metodou sintrování z práškových směsí, protože jejich odlévání není možné. Díky velké intenzitě magnetického pole nacházejí uplatnění všude tam, kde je potřeba dosáhnout velké přídržné síly a přitom zachovat malé rozměry zařízení. Jako například malé elektromotory, lineární elektromotory, v automatizaci, v separátorech, polarizátorech atd. Jsou velmi tvrdé a křehké a jejich povrch je často upravován niklováním, pasivací, epoxidovou pryskyřicí, nebo zinkem z důvodu zabránění korozi. Lze je pouze brousit. Přitom je potřeba dát pozor na magnetický prach, který vzniká při broušení a na to, aby se při broušení příliš nezahřály. Vyrábějí se už v hotových tvarech. Při manipulaci s těmito magnety je nutné dbát zvýšené opatrnosti, aby se nedostaly do blízkosti magnetických médií, nebo do blízkosti železných materiálů. Díky velké přídržné síle se dokáží velmi rychle přiblížit k železnému materiálu a při nárazu se mohou poškodit.

U NdFeB magnetů se podle způsobu výroby pohybuje teplota použití maximálně od 80 °C do 200 °C. U SmCo je teplota použití maximálně od 250 °C do 300 °C.

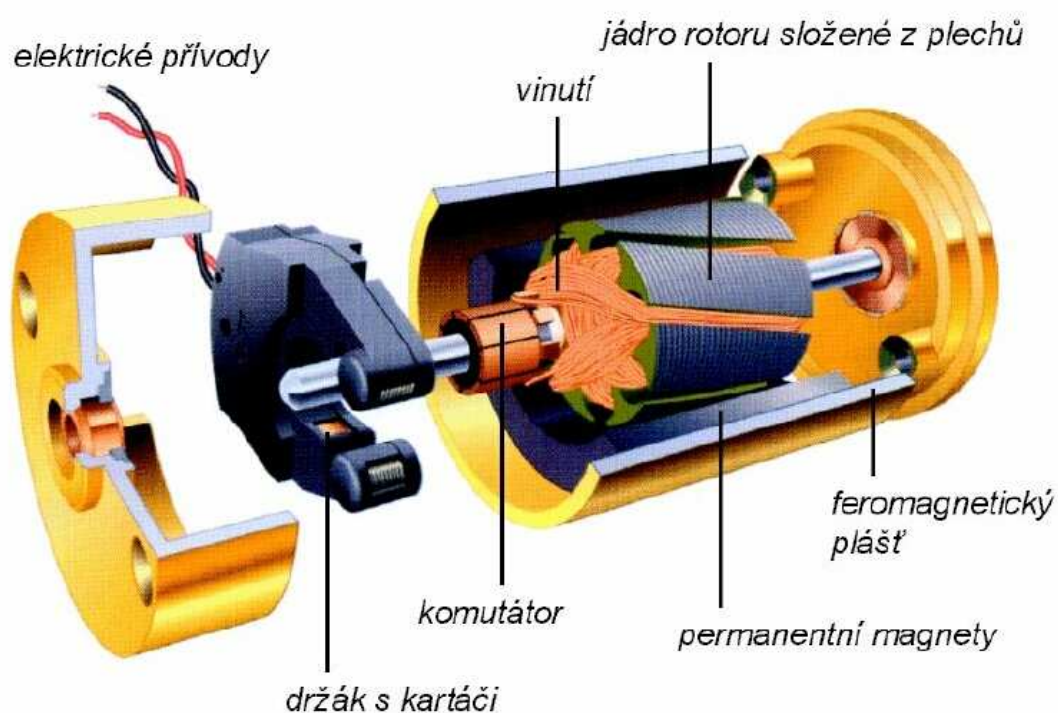


## 6 Stejnosměrný motor s komutátorem

Tato kapitola, jak už název napovídá, se zabývá konstrukcí stejnosměrného motoru s komutátorem. Jsou zde zmíněny dvě konstrukce. Konvenční a se samonosným vinutím.[1 – 14]

### 6.1 Konvenční konstrukce

Motor konvenční konstrukce je tvořen statorem, rotorem s plechy a komutátorem se sběrným ústrojím jak je zobrazeno na obr. č. 6.1.



Obr. č. 6.1 - Klasická konstrukce komutátorového motoru

#### 6.1.1 Rotor

Rotor je tvořen železnými plechy, které jsou tenké a navzájem izolované, v jejichž drážkách je uloženo vinutí cívek. Ty jsou vyvedeny na komutátor. Rotorové plechy jsou většinou vyrobeny z technické oceli (nelegované plechy, dynamové plechy s velkým

měrným odporem, transformátorové plechy, orientované plechy). Ztráty v železe se počítají pomocí empirických vzorců nebo se určují měřením. Výrobci je většinou udávají jako ztráty ve wattech na kilogram při indukci  $B = 1 \text{ [T]}$  a frekvenci 50 Hz jako měrné ztráty plechů. Vyrábějí se například s příměsí křemíku (také se lze setkat s termínem „křemíkové plechy“), protože křemík zvyšuje měrný odpor plechů. Tím, že jsou rotorové plechy od sebe izolovány a mají velký měrný odpor, se omezuje tvorba vířivých proudů.



Obr. č. 6.2 – Rotor stejnosměrného motoru, komutátor je značně opotřeben

### 6.1.2 Stator

Stator je tvořen pláštěm z feromagnetického materiálu (není podmínkou – speciální motory mohou mít plášť z jiných materiálů) a cívkami statorového vinutí. Statorové vinutí zpravidla bývá, ale nemusí být navinuto na pólových nástavcích (u větších motorů se používá též kompenzační vinutí uvnitř pólových nástavců nebo pomocných komutačních pólů). U malých motorů se používá místo cívek s vinutím permanentních magnetů. Permanentní magnety vytvářejí stálé magnetické pole statoru a zároveň odpadá nutnost napájení budícího vinutí (proto u těchto motorů nejdou otáčky řídit změnou velikosti intenzity magnetického pole).



Obr. č. 6.3 – Stator stejnosměrného motoru, stálé magnetické pole zajišťují dva feritové magnety, uprostřed je vidět kluzné ložisko

### 6.1.3 Komutátor a kartáče

Komutátor zajišťuje optimální úhel natočení magnetických polí rotoru a statoru  $90^\circ$  ve všech rychlostech a při jakémkoli zatížení. Je tvořen navzájem izolovanými, většinou měděnými lamelami. Měděné lamely se opotřebovávají rychleji než izolace mezi nimi, proto jsou mezi jednotlivými lamelami drážky o hloubce 1-2 mm (podle velikosti motoru). Pokud je opotřebení lamel velké, může izolace mezi lamelami vyčnívat nad úroveň lamel. Pak je třeba izolaci mezi lamelami proříznout, aby drážky měly opět uváděnou hloubku. Kvalita motoru je lepší s větším počtem lamel komutátoru. Větší počet lamel snižuje amplitudu zvlnění mechanického momentu motoru. Komutátor je jedním z důležitých hledisek životnosti motoru. Kartáče přivádějí napětí na lamely komutátoru, mohou být z různých materiálů. Vždy by měly na motoru být kartáče od jednoho výrobce a měl by se dodržet přítlak udávaný výrobcem tak, aby docházelo ke správnému kontaktu, ale nedocházelo k brždění motoru.



Obr. č. 6.4 – Zadní víko stejnosměrného motoru s uhlíkovými kartáči, patrné je znečištění materiálem z obroušených kartáčů a komutátoru

#### 6.1.3.1 Uhlíkové kartáče

Uhlíkové kartáče doléhají na komutátor větší plochou než kartáče kovové a i přítláčná síla je značně vyšší. Tím více mechanicky brzdí rotor a dochází k jejich většímu opotřebení. Uhlíkový prach značně znečišťuje motor, ale zároveň slouží k mazání komutátoru. Dokáží však přenést větší proudy. Přechodový odpor uhlíkových kartáčů a komutátoru není stejnoměrný, při nižších proudcích se zvyšuje. Průběh proudu během otáčení vykazuje ostré proudové špičky. Tím dochází k elektromagnetickému rušení. Používají se tam, kde je třeba přenášet velké proudy, kde dochází k častým rozběhům motorů, krátkodobým přetížením a velkým mechanickým momentům.

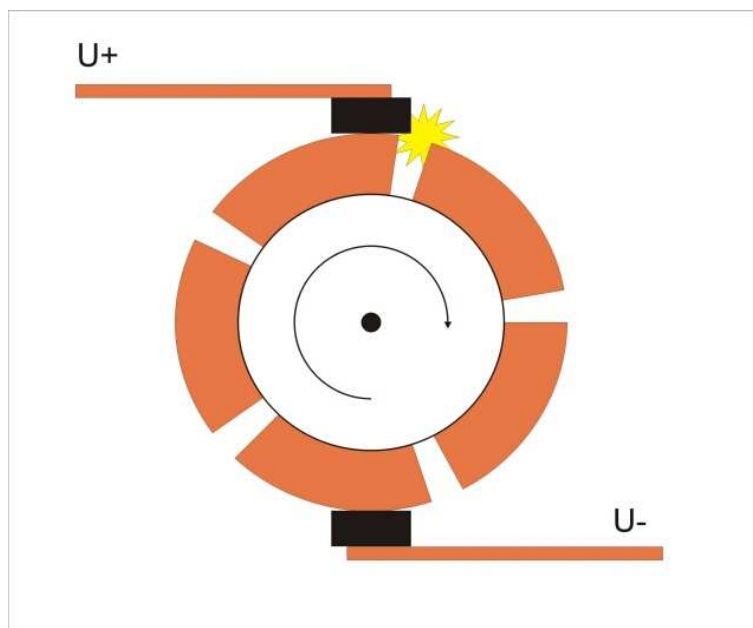
#### 6.1.3.2 Kovové kartáče

Doléhají na povrch komutátoru pouze svou pružností. I tato malá přítláčná síla stačí k dokonalému elektrickému kontaktu. Přechodový elektrický odpor kontaktu kartáče a komutátoru je během otáčení motoru malý a stejnoměrný. Malé je i mechanické brždění motoru a proud při běhu naprázdno. Motor se dobře rozbíhá i po dlouhé době,

kdy nebyl v provozu. Kovové kartáče jsou vyrobeny podle šířky komutátoru ze slitin vzácných kovů jako je stříbro, paladium, měď.

Během otáčení motoru se při odpojení kartáče od lamely komutátoru vytváří oblouk. K oblouku dochází na výstupní straně kartáče. Cívka má velkou indukčnost, takže se v ní vlivem změny proudu indukuje reaktanční napětí. Uvažujeme-li změnu proudu z kladné hodnoty na zápornou, proud zaniká a indukované reaktanční napětí má podle Lencova pravidla takový smysl, že se snaží trvání proudu v komutující cívce prodloužit. Jeho působením klesá proud v cívce zpočátku pomalu, takže na konci komutace je jeho změna velká. Touto změnou se indukuje velké reaktanční napětí právě v okamžiku, kdy lamela opouští kartáč, proto dochází ke vzniku oblouku mezi kartáčem a lamelou. Stroj jiskří. Jiskření na komutátoru jsou v podstatě vysokofrekvenční výboje, které ruší elektromagnetické vlnění. Ke zničení komutátoru může přispět i velké lamelové napětí. Pokud je napětí na sousedních lamelách dostatečně vysoké, aby udrželo oblouk mezi lamelou a kartáčem protáhl by se oblouk od jednoho kartáče ke druhému a zničil by komutátor i sběrací ústrojí. Zlepšení komutace a zároveň i snížení jiskření lze dosáhnout například pootočením kartáčů proti směru otáčení, vložením komutačních pólů mezi póly hlavní nebo kompenzačního vinutí do hlavích pólů. Komutační napětí se indukuje pohybem cívky v jejich magnetickém poli. Aby toto komutační napětí rušilo reaktanční napětí při zatížení, je vinutí komutačních (pomocných) pólů zapojeno do série s kotvou tak, aby polarita kotvy a pomocných pólů byla opačná. U motoru následuje za hlavním severním pólem ve směru otáčení severní komutační pól.

Životnost komutátorových motorů je pouze ve stovkách hodin, podle kvality zpracování, a je dána především životností komutátoru a ložisek (kluzná/kuličková ložiska). Výhodou kluzných ložisek je jejich nízká cena a malé rozměry. Používají se především tam, kde nedochází k častým změnám otáček a k velkému zatížení hřídele. Kuličková ložiska jsou naopak vhodná do aplikací, kde se rychlost a zátěžový moment hřídele výrazně mění. Ale i tak svou životností převyšují životnost komutátoru.

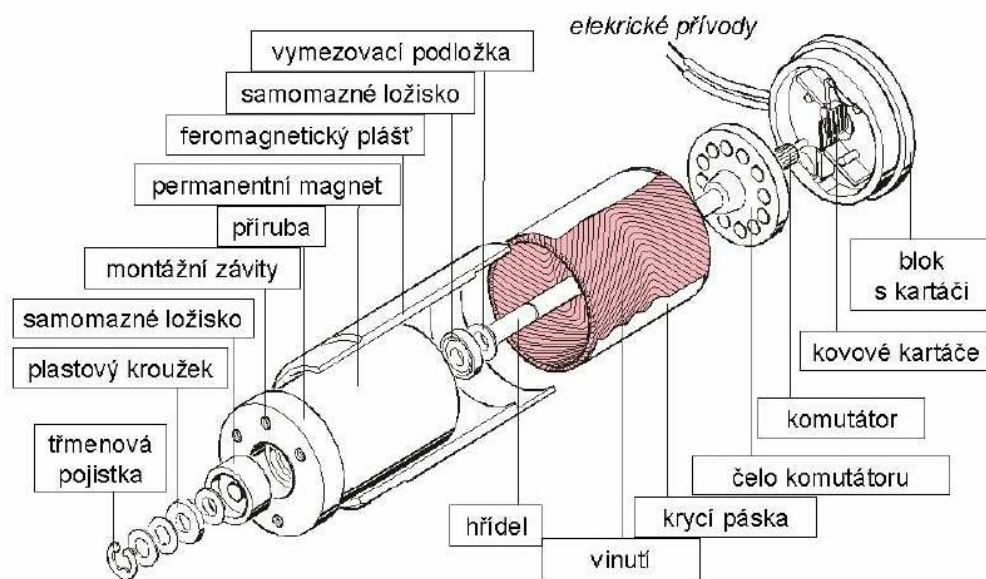


Obr. č. 6.5 - Oblouk vznikající po odpojení lamely vinutí od napájení

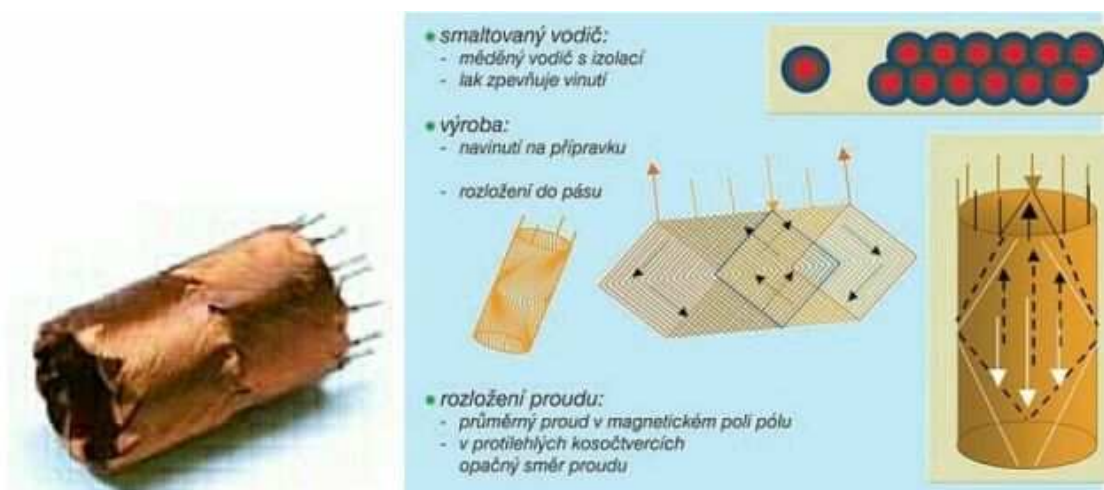
## 6.2 Konstrukce se samonosným vinutím

Použití samonosného měděného vinutí umožňuje zmenšit rozměry motoru tím, že se dvupólový válcový magnet vloží dovnitř vinutí. Permanentní magnet se neotáčí, kolem něho se otáčí samonosné vinutí. Celý motor je uzavřen ve feromagnetickém jádru. Motor se samonosným vinutím je pro daný výkon menší a lehčí než konvenční komutátorový motor. Energie zanikajícího magnetického pole po odpojení lamely nezahrnuje energii plechového jádra, je tedy nižší, proto i jiskření je menší. Tím se i méně opotřebovávají lamely komutátoru a neopalují hrany kartáčů a prodlužuje se tak jejich životnost. Rotorem lehčím o rotorové jádro se celkově zlepšují dynamické vlastnosti motoru. Reakce motoru na změnu napájecího napětí je okamžitá. Moment setrvačnosti rotoru je nižší o moment setrvačnosti jádra. Kromě toho se používá nová konstrukce komutátoru, který má menší průměr a je tenčí, takže nedochází k tak velkému opotřebení kartáčů a prodlužuje se životnost motoru. Další výhodou je, že lze přímo do samonosného vinutí vložit odrušovací kondenzátory. Samonosné vinutí se vyrábí například navíjením na šablonu, která se po navinutí odstraní. Vinutí je pak fixováno lakováním a krycí páskou. Nízká indukčnost samonosného vinutí snižuje jiskření na komutátoru. [11]





Obr. č. 6.3 - Konstrukce motoru se samonosným vinutím firmy Maxon



Obr. č. 6.4 - Samonosné vinutí firmy Maxon

## 7 Stejnosměrný motor bez komutátoru (BLDC motor)

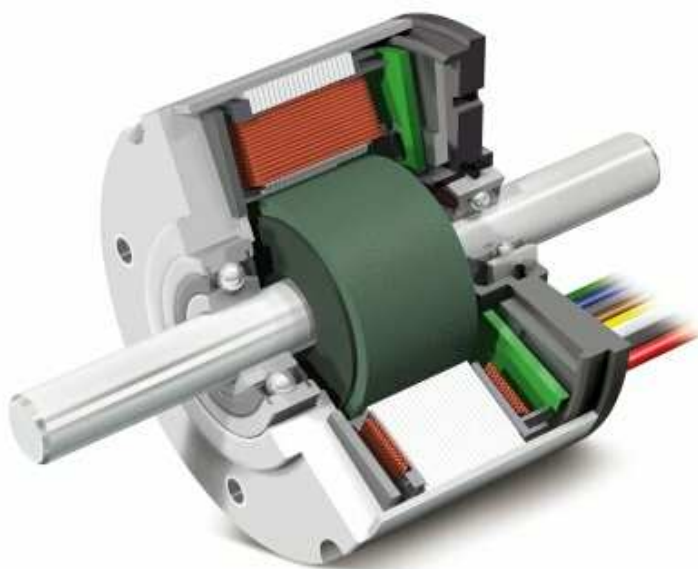
Konstrukce synchronního, elektronicky komutovaného, případně krokového motoru je v podstatě stejná. Pouze na základě různého způsobu řízení motoru se jedná o různé druhy motorů. Výrobci elektronicky komutovaných motorů uvádějí i různé názvy. Lze se setkat s názvy AC motory, střídavé motory. Každý motor musí, aby se otáčel, mít vytvořeno proměnné magnetické pole. U motorů napájených stejnosměrným napětím to zajišťuje mechanický komutátor, nebo elektronická komutace. U motorů napájených střídavým napětím stačí přivést střídavé napětí na svorky motoru. Již dříve se v některých aplikacích začala používat konstrukce tzv. BLDC (bezkartáčového - brushless DC) motoru a to například ve ventilátorech nebo videích k pohonu rotující magnetické hlavy, kde byly nastaveny na konstantní rychlost otáčení. Nazývaly se servomotory, třífázové servomotory nebo AC motory a byly napájeny pouze střídavým napětím se sinusovým průběhem. Aby dosahovaly BLDC motory stejných vlastností jako stejnosměrné motory, je třeba udržovat vzájemnou polohu magnetického pole statoru a rotoru. Tím, že se odstranil mechanický komutátor, se musely do statoru přemístit cívky, které jsou napájeny třífázově a do rotoru se umístily magnety. Použité magnety ovlivňují vlastnosti motoru. Nejúčinnější jsou NdFeB magnety, které jsou v současné době nejsilnější, mohou být menší, čímž se snižuje hmotnost rotoru, tím jeho setrvačnost a celkově i hmotnost celého motoru. Přepínání proudu do jednotlivých cívek zajišťují elektronické spínací obvody, které spínají na základě informací o natočení rotoru vůči statoru. Směr magnetického pole statoru tak udržuje optimální úhel k magnetickému poli rotoru, podobně jako je to u mechanického komutátoru.

Tato konstrukce motoru se začala rozvíjet s možností využívání polovodičových součástek. Vinutí je zapojeno buď do hvězdy, u modelářských motorů bez vyvedení společného vodiče (v jiných aplikacích se používá vyvedeného společného vodiče při zapojení do hvězdy k detekci zpětné vazby EMF), nebo do trojúhelníku. Obě zapojení dovolují stejný výkon motoru, ale k jeho dosažení je u každého zapojení zapotřebí jiné napětí a proud. Problém u řízení tohoto motoru spočívá v tom, že je nutné znát přesnou polohu natočení rotoru vůči statoru, aby ke komutaci docházelo ve správný okamžik. K tomu, aby se zjistila přesná poloha rotoru se může použít několik metod (Hallový sondy, resolver, metoda IxR nebo měření zpětné vazby EMF). [1-14]



## 7.1 BLDC motor s rotorem s permanentním magnetem ve tvaru válce

Tělo motoru (plášť) je tvořeno válcem, na jehož vnitřním povrchu je upevněno převážně třífázové statorové vinutí. V čelech statoru jsou ložiska s trvalou tukovou náplní, kterými prochází hřídel. Na hřídeli je připevněn (nalisován) vícepólový permanentní magnet. Motor není vybaven komutátorem. Spínání jednotlivých fází je prováděno elektronicky. Magnetický tok permanentních magnetů a vinutí se většinou uzavírá feromagnetickým prstencem pláště sendvičové konstrukce. Sendvičový prstenec pláště zmenšuje ztráty přemagnetováním a hysterezí.

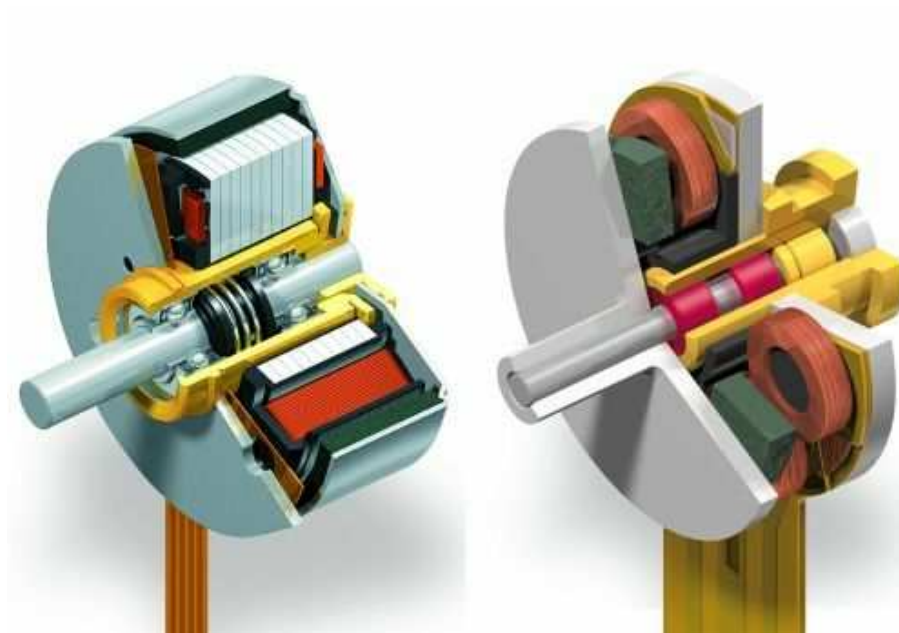


Obr. č. 7.1 - Řez BLDC motorem s rotorem s permanentním magnetem ve tvaru válce

## 7.2 BLDC motor s rotačním pláštěm (diskový motor)

Stator motoru tvoří dynamové plechy (nelegované, dynamo, transformátorové, orientované plechy) s drážkami s pólovými nástavci. Do drážek je vloženo třífázové vinutí. Počet pólů je závislý na tom, pro jakou aplikaci je motor navrhován. V ose statoru jsou většinou dvě ložiska s trvalou tukovou náplní. Ložisky prochází hřídel, na níž je připevněn disk do něhož jsou vloženy permanentní magnety, které se při otáčení disku (rotoru) pohybují vně cívek vinutí. Tyto motory se také nazývají motory s rotačním nebo oběžným pláštěm, zkráceně oběžky, nebo diskové motory.

Výhodou tohoto uspořádání je lepší chlazení motoru, nevýhodou je nutnost zabezpečit motor tak, aby se rotující plášť nedostal do kontaktu s jiným předmětem. Životnost takového motoru je dána pouze životností ložisek.



Obr. č. 7.2 - Řez BLDC motorem s rotorem s rotačním pláštěm

## 8 Způsob řízení otáček stejnosměrných motorů

Tato kapitola je zaměřena na popis několika možných způsobů řízení otáček stejnosměrného motoru. [2-6, 10, 11, 22]

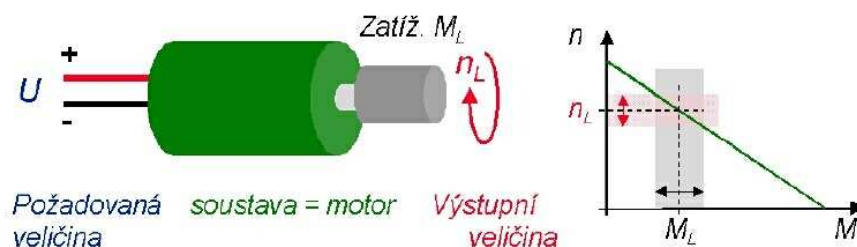
### 8.1 Změnou odporu

Tento způsob řízení uplatňuje zařazení rezistoru, kaskády rezistorů nebo reostatu do série s vinutím kotvy motoru. Při řízení otáček změnou odporu je rychlost naprázdno konstantní. Rozsah možnosti řízení klesá s klesajícím zatěžovacím momentem. Na rezistorech, reostatu, dochází k trvalým ztrátám přeměnou elektrické energie na Jouleovo teplo, proto se řízení změnou odporu téměř nepoužívá, výjimku mohou tvořit aplikace s velmi malým výkonem, nebo při rozběhu motoru.

### 8.2 Změnou napětí na kotvě

Nejjednodušší způsob řízení stejnosměrných motorů je řízení změnou velikosti stejnosměrného napájecího napětí přivedeného na kartáče komutátoru. Rychlost otáčení motoru bez zatížení je určena velikostí vstupního napětí. Pokud se hřídel zatíží mechanickým momentem, klesá rychlost otáčení po přímce.

- motor DC napájený konstantním napětím



Obr. č. 8.1 – Závislost otáček na zatěžovacím momentu

### 8.3 Změnou napětí na budícím vinutí

Změnou napětí na budícím vinutí se dosáhne změny velikosti magnetického toku. Snížením magnetického toku se zvýší otáčky motoru nad jmenovité otáčky a zároveň klesne zátěžový moment. Toto se také nazývá odbuzování. Naopak při zvýšení magnetického toku klesají otáčky a zátěžový moment hřídele vzroste.

### 8.4 Metoda IxR – s uzavřenou smyčkou bez snímače

Může se použít pro řízení otáček s uzavřenou regulační smyčkou stejnosměrného motoru s mechanickým komutátorem. Tato metoda je založena na celkovém úbytku napětí na motoru v chodu. Úbytek  $U_{\text{mot}}$  se skládá z  $U_R$ ,  $U_L$ ,  $U_n$ .

Úbytek napětí  $U_R$  vzniká na ohmickém odporu jako součin odporu vinutí  $R_{\text{mot}}$  a proudu  $I_{\text{mot}}$ , který motor odebírá. Napětí  $U_R$  a proud  $I_{\text{mot}}$  lze naměřit na mechanicky zablokovaném motoru. Motor připojený na toto napětí vyvozuje v klidu moment  $M$  daný součinem proudu  $I_{\text{mot}}$  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 nutné zvýšit napětí o hodnotu úměrnou požadované rychlosti.

$$U_n = \frac{n}{k_n} \quad (8.1)$$

Kde  $k_n$  je mechanická konstanta motoru. Tento přidaný příkon

$$P = U_n \cdot I_{\text{mot}} \quad (8.2)$$

se odvede jako mechanický výkon motoru.

Úbytek  $U_L$  na indukčnosti vinutí se projeví pouze při zatížení při změně proudu. V uvažovaném ustáleném stavu se neprojeví.

Z uvedeného vyplývá, že odečtením úbytku  $U_R$  od celkového napětí na motoru  $U_{\text{mot}}$  získáme informaci o rychlosti otáčení motoru.

## **8.5 Jednokvadrantové řízení**

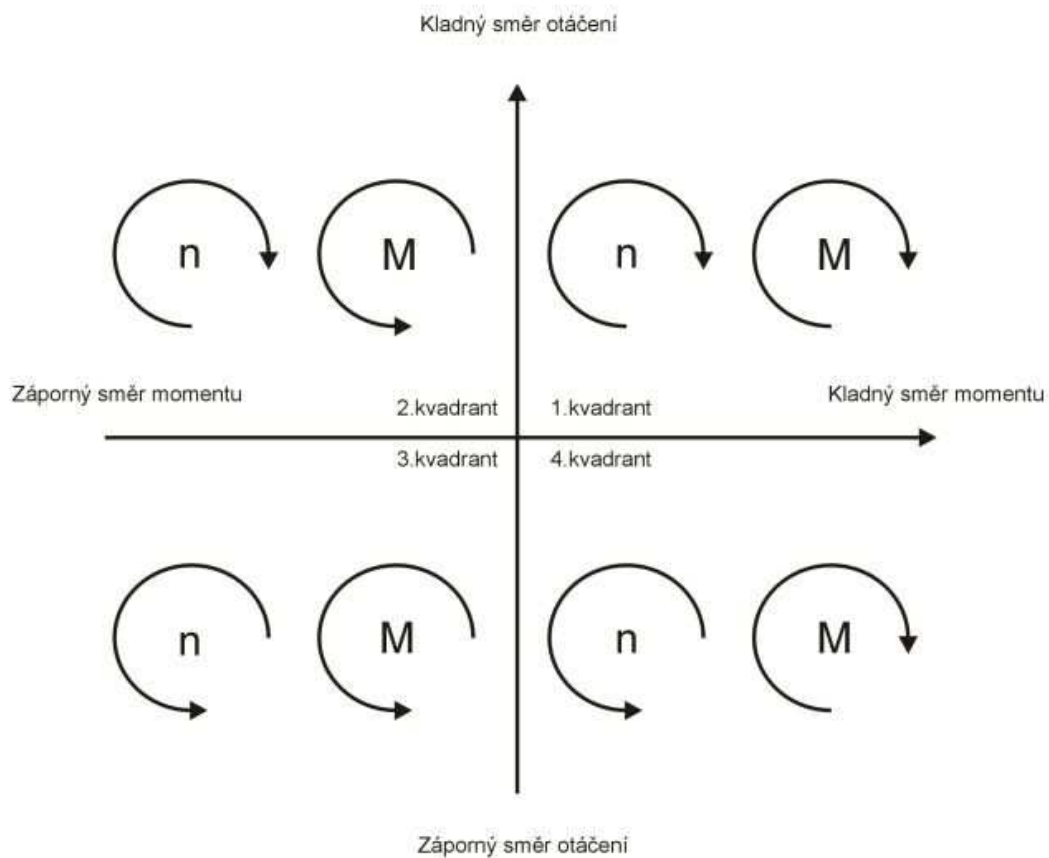
Jednokvadrantové řízení je používáno především staršími řídicími jednotkami pro řízení motorů. Jsou schopny vyvinout pouze moment ve směru otáčení hřídele motoru. Brždění je prováděno buď do brzdného rezistoru nebo v novějších případech zkratováním vinutí pokud je na vstup přiveden řídicí signál. Tento způsob řízení umožňuje provoz motoru pouze v jednom směru. Pokud je třeba obrátit směr otáčení, musí se změnit polarita napájecího napětí.

## **8.6 Dvukvadrantové řízení**

Dvukvadrantové řízení umožňuje regulaci otáček motoru v jednom směru a brždění. V prvním kvadrantu probíhá řízení otáček, ve druhém kvadrantu je pak možné rekuperační brždění motoru, nebo brždění přeměnou energie na teplo. V prvním případě je motor v generátorickém stavu a elektrická energie je dodávána zpět do zdroje, ve druhém je třeba zajistit dobré chlazení motoru.

## **8.7 Čtyřkvadrantové řízení**

Čtyřkvadrantové řízení umožňuje plně využít vlastností motoru, protože umožňuje řízení otáček i brždění motoru v obou směrech podle průběhu řídicího signálu na vstupu. V prvním a třetím kvadrantu jsou řízeny otáčky pro jeden a druhý směr, ve druhém a čtvrtém kvadrantu je možné brždění motoru. Pokud je řídicí signál nulový, motor je v klidu. Pro tento způsob řízení se používá nejčastěji zapojení do H-můstku, kdy pro komutátorový motor se používají čtyři výkonové spínače a pro třífázový BLDC motor šest výkonových spínačů.



Obr. č. 8.2 - Vyznačení směru otáčení  $n$  a momentu  $M$  pro jednotlivé kvadranty.

V 1. kvadrantu jsou otáčky urychlovány momentem, regulace otáček motoru

V 2. kvadrantu moment brzdí otáčky

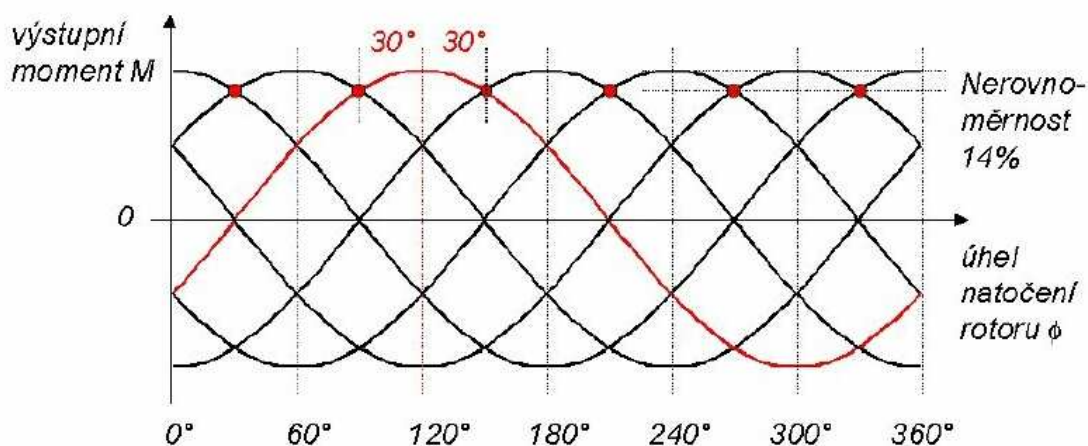
V 3. kvadrantu má motor opačný chod, regulace otáček motoru

Ve 4. kvadrantu moment brzdí otáčky

## 9 Řídící jednotky

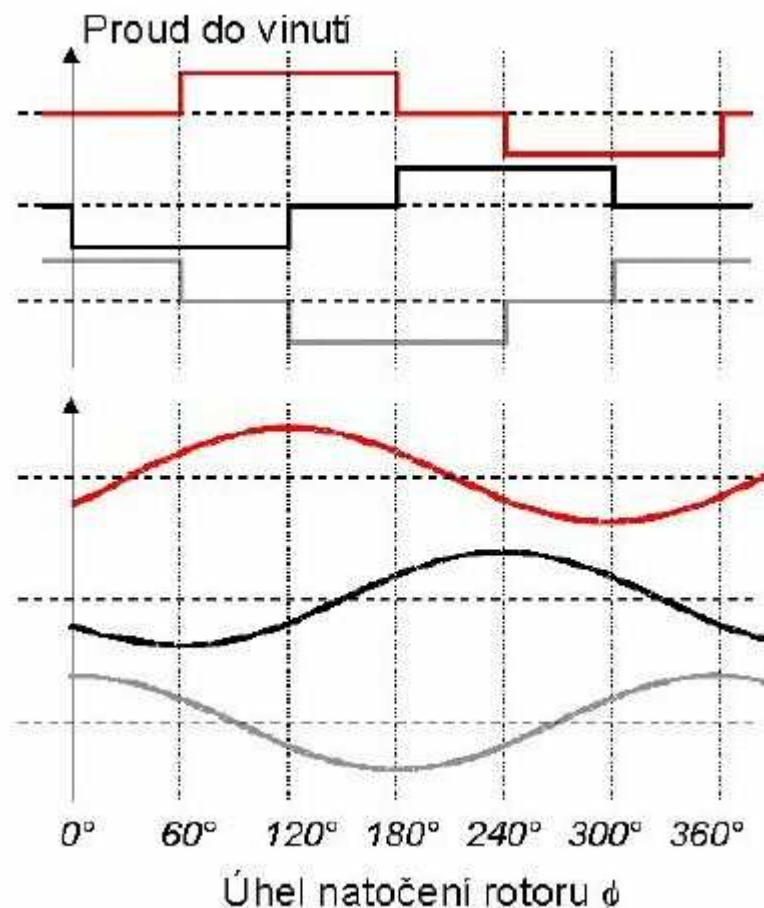
Jednodušší řídicí jednotky vytvářejí napájecí proud s obdélníkovým průběhem. K elektronické komutaci (napájení jednotlivých sekcí) dochází  $30^\circ$  úhlových před a  $30^\circ$  úhlových za optimální polohou vůči rotoru. Vzájemné natočení magnetických polí rotoru a statoru se během rotace rotoru mění v uvedených mezích, než dojde k přepojení sekcí vinutí. V optimální poloze, kdy jsou směry magnetických polí kolmé, se vyvozuje největší mechanický moment, směrem od optimální ke krajním polohám klesá ve tvaru sinusovky. Obdobné je to i u mechanického komutátoru. [10, 11, 20-24].

V modelářských regulátorech bývají nejčastěji k řízení používány procesory ATMEL z důvodu dobré ceny. Někteří výrobci používají procesory DSP nebo specializované motorové kontrolery se šesti PWM na čipu. Jinak lze použít prakticky jakýkoliv procesor. [Citace Ing. Dvorský, MGM Compro]



Obr. č. 9.1 – Zvlnění mechanického momentu během komutace pomocí mechanického komutátoru a při obdélníkovém průběhu proudu do motoru

Složitější řídicí jednotky vytvářejí průběh proudu ve tvaru sinusovky, nebo lichoběžníkový průběh. Sinusový průběh komutace odstraňuje kolísání mechanického momentu.



Obr. č. 9.2 - Obdélíkový a sinusový průběh proudu do motoru

### 9.1 Lineární proudový regulátor

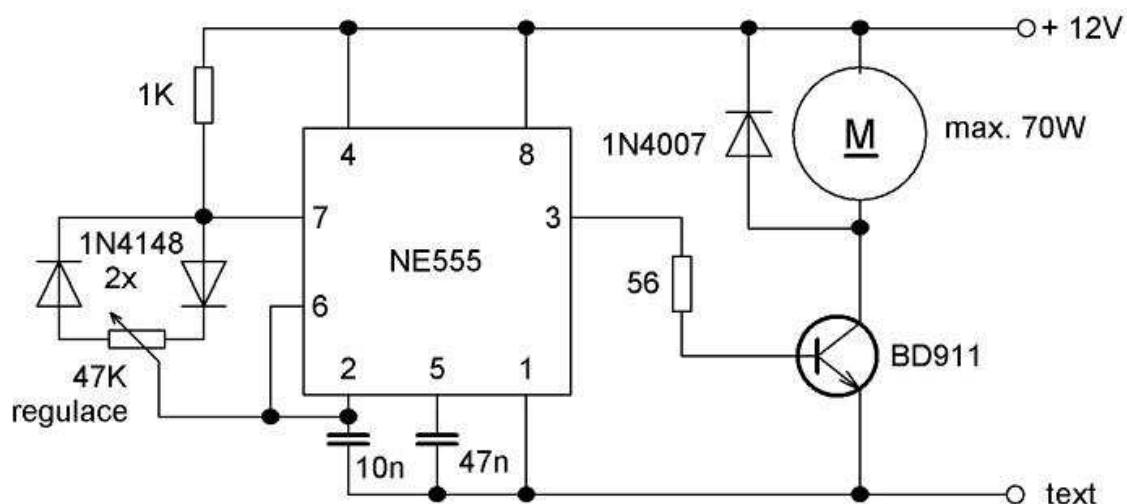
Pro jednokvadrantové řízení je tvořen výkonovým tranzistorem s proudovým regulátorem. Ztráty u malých výkonů jsou malé a převažuje zde cena a slabé rušení lineární řídicí jednotky. U čtyřkvadrantového řízení se použije zapojení lineárních proudových regulátorů do můstku. Jednotka je pak schopna napájet motor napětím obou polarit. Lineární zesilování je výhodné do výkonu  $10^2 \text{ W}$ , pro vyšší výkony je nevhodné. Proto se pro řízení vyšších výkonů používá některý typ pulzní modulace.



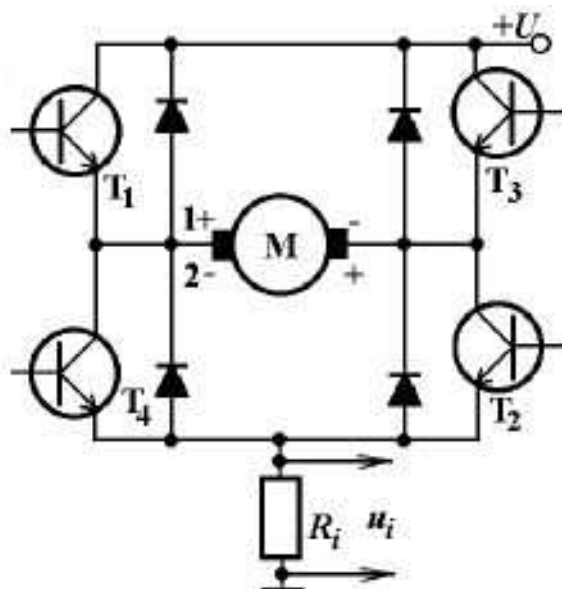
## 9.2 Pulzní proudový regulátor

Existuje několik typů pulzní modulce. Pulzní kódová modulace PCM, pulzní amplitudová modulace PAM, pulzní poziční modulace PPM, pulzní šířková modulace PWM. Nejčastěji se však pro řízení výkonové elektroniky používá PWM - Pulzní šířková modulace. Konstantní napájecí napětí je časově rozděleno do impulsů s konstantní frekvencí a s řízenou šířkou PWM (Pulse width modulation). Při PWM regulaci zůstává velikost proudu i napětí do motoru stejná, mění se jen aktivní doba průchodu proudu motorem. Na výkonových tranzistorech nedochází téměř k žádným ztrátám, protože jsou buď otevřeny nebo zavřeny. Levnější a jednodušší řídicí jednotky s PWM řídicím signálem generují obdélníkový řídicí signál. Kvalitnější řídicí jednotky generují signál se sinusovým, respektive s lichoběžníkovým průběhem.

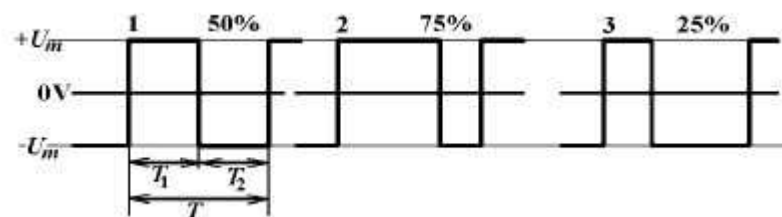
Generování signálu PWM je řízeno procesorem (softwarově) podle předem určeného programu. Obecně vše funguje tak, že z PWM modulu je vyvedeno šest výstupů (při použití pro třífázový motor) (PWM modulací lze řídit i stejnosměrný komutátorový motor. Pro tento účel lze použít můstkové zapojení se čtyřmi výkonovými tranzistory při řízení ve čtyřech kvadrantech nebo jen s jedním tranzistorem v jednokvadrantovém řízení). Pro ovládání každé jedné fáze jsou přiděleny dva výstupy z PWM jednotky. Jeden výstup ovládá kladnou a druhý zápornou půlperiodu signálu. Signál z PWM je přiveden na bázi výkonových tranzistorů (MOSFET, IGBT). Pro každou (jednu) fázi jsou dva výkonové tranzistory. Jako spínače v modelářských regulátorech se většinou používají nejlepší MOSFETy z důvodu nízkého odporu v sepnutém stavu. Spínací frekvence je v rozmezí od 1 kHz (vyjíměčně) do 44 kHz, ale většinou se pohybuje spínání v rozsahu 8-10 kHz. Po přivedení signálu z PWM se tranzistory otevřou a proud teče do motoru. Vždy jsou sepnuty pouze dvě fáze po dobu odpovídající 120° elektrické otáčky v posunutí o 60°. Třetí fáze je v okamžiku, kdy jsou sepnuty ostatní dvě fáze bez napájení. V cívce této fáze se vlivem změny magnetického pole indukuje elektromotorické napětí EMF, které je přiváděno zpět do regulátoru. Toho se využívá k detekci polohy natočení rotoru vůči statoru.



Obr. č. 9.3 - Příklad zapojení regulátoru řízení otáček stejnosměrného motoru pomocí PWM signálu s obvodem NE555, jednokvadrantové řízení, řídí otáčky motoru pouze v jednom směru, obvod umožňuje řízení otáček plynulou změnou napětí na kotvě motoru, neumožňuje však reverzaci a brždění motoru.

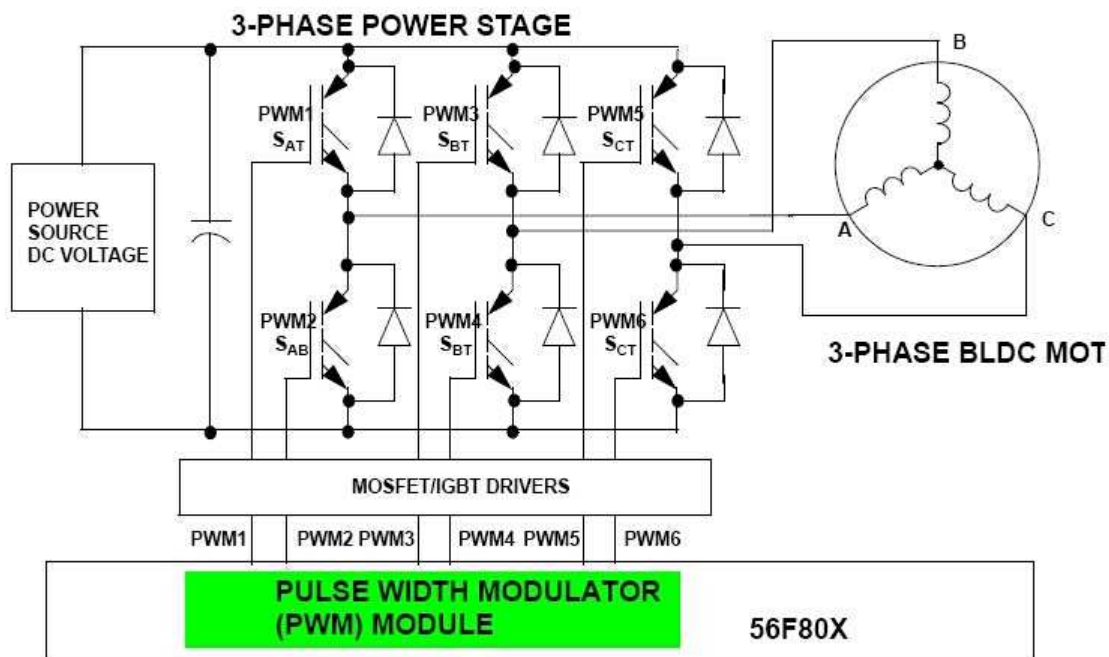


Obr. č. 9.4 - Zapojení tranzistorů do H – můstku, použití pro čtyřkvadrantové řízení otáček stejnosměrného motoru, toto zapojení umožňuje řízení otáček v obou směrech v I. a III. kvadrantu i rekuperační brždění motoru ve II. a IV. kvadrantu.

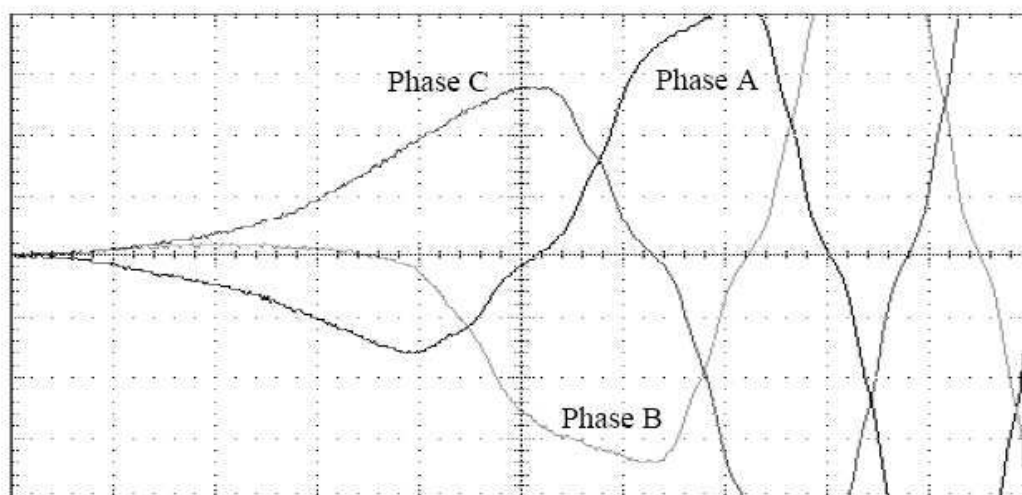


Obr. č. 9.5 - Signál obou polarit s konstantní amplitudou a vyznačenými časovými konstantami  $T_1$  a  $T_2$ ,  $T=T_1+T_2$

Řízení můstku může probíhat dvěma způsoby. Během doby  $T_1$  jsou sepnuty tranzistory  $T_1$  a  $T_2$ , během doby  $T_2$  jsou sepnuty tranzistory  $T_3$  a  $T_4$ . Platí  $T_1+T_2=T$ . Pokud  $T_1=T_2$ , je střední hodnota napětí přivedeného do motoru rovna nule a motor se neotáčí. Pokud je  $T_1$  různé od  $T_2$ , tak podle znaménka výsledného napětí se motor otáčí na příslušnou stranu. Velikost napětí lze regulovat spojitě. Při tomto způsobu řízení je však i při stojícím motoru a střední hodnotě napětí rovné nule efektivní hodnota napětí na kotvě motoru nenulová a veškerý proud se mění na Jouleovo teplo. Tento způsob řízení je vhodný pro rychlostní aplikace. Při použití v polohových aplikacích je nutné zabezpečit dobré chlazení. Druhý a výhodnější způsob je takový, že je trvale sepnut tranzistor  $T_1$  a pomocí PWM je napětí do motoru řízeno tranzistorem  $T_2$  pro jeden směr a pro druhý směr je trvale sepnut tranzistor  $T_3$  a PWM signálem je napětí do motoru řízeno tranzistorem  $T_4$ . Pro stojící motor jsou zavřeny všechny čtyři tranzistory, nedochází tedy ke ztrátám Jouleovým teplem, protože motorem neprochází žádný proud.



Obr. č. 9.6 - Schéma třífázového regulátoru s PWM modulací, můstkové zapojení výkonových spínačů



Obr. č. 9.7 - Obrázek zobrazuje průchod nulou napětí indukovaného ve fázi A, která není napájena. Fáze B, C jsou napájeny.

## **10 Brždění motoru**

V této kapitole je popsáno několik způsobů brždění stejnosměrných motorů. [2-6, 10, 11, 20-24].

### **10.1 Do brzdného rezistoru**

Brždění do rezistoru se provede odpojením svorkového napětí (odpojení zdroje napájení motoru) a na svorky motoru se připojí brzdný rezistor. V kotvě se obrátí směr proudu a s ním i směr momentu a motor se chová jako dynamo. Indukované napětí se mění na rezistoru v teplo. Je nutné zabezpečit dobré chlazení.

### **10.2 Protiproudem**

Brždění protiproudem se provádí přivedením napětí opačné polarity na svorky motoru. Přitom vzniká ve vinutí kotvy proudový náraz, proto se do obvodu kotvy zapojí rezistor, který tento náraz zmírní. Energie napájecího zdroje a motoru se přeměňuje v teplo na vřazeném rezistoru. Při tomto způsobu brždění je nutné včas odpojit motor od napájení a dobrzdit ho mechanicky, neboť by se mohl rozběhnout v opačném směru.

### **10.3 Rekuperací**

Při rekuperaci se motor chová jako generátor a část energie se vrací z motoru zpět do napájecích zdrojů. Baterie se dobíjejí. Dochází tak k částečné úspoře elektrické energie, která se nejvíce spotřebuje při rozběhu motoru. Nastává, když jsou otáčky motoru větší než při chodu naprázdno. Podmínkou je, aby motor dodával vyšší napětí než je napětí napájecích zdrojů. Tento způsob brždění je používán při řízení většiny modelářských elektromotorů.

## 11 Snímání polohy rotoru

Při řízení motoru elektronickou komutací je důležité znát přesnou polohu rotoru (natočení rotoru vůči statoru) na rozdíl od řízení motoru s komutátorem. Podle natočení (polohy) rotoru se upravuje komutace. K získávání informace o poloze rotoru se používají různé metody. Několik je jich popsáno v následujících odstavcích. [11, 20, 25-30]

### 11.1 Tachodynamo

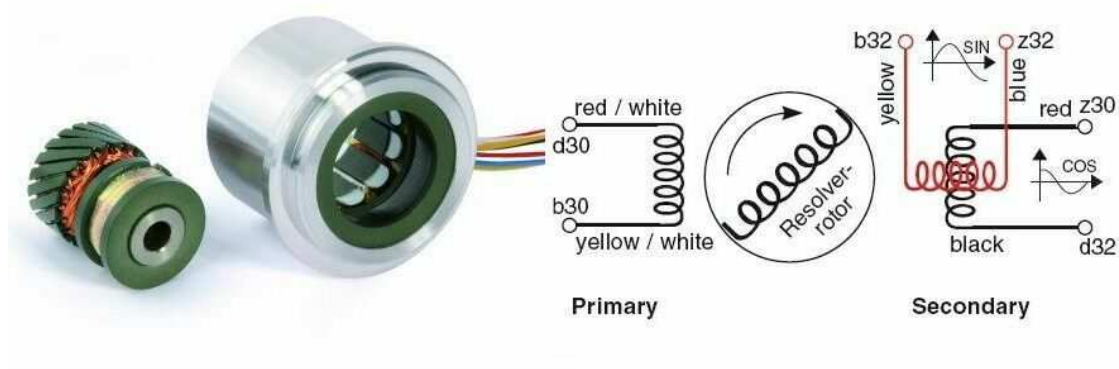
Na hřídeli motoru je připevněn stejnosměrný motor, který se otáčí rychlostí hřídele a funguje jako dynamo. V něm se vlivem otáčení hřídele indukuje napětí, jehož velikost je úměrná rychlosti otáčení hřídele. Velikost napětí je snímána přímo ze svorek tachodynamu voltmetrem, který bývá často cejchován v ot./min., nebo řídicí jednotkou, která následně upravuje otáčky motoru. Problematickou součástí je komutátor s kartáčky. Proto je nutná jeho častá kontrola. Vhodné jsou kartáčky ze slitiny vzácných kovů, protože zaručují stálý přechodový odpor mezi nimi a komutátorem.



Obr. č. 11.1 – Tachodynamo

## 11.2 Resolver

Resolver je zařízení, které snímá natočení rotoru a umožňuje přenášet tuto informaci na dálku. Používá se tam, kde není možné odečítat hodnoty na místě. Na druhém konci je buď stejné zařízení, na kterém lze odečítat polohu rotoru, nebo elektronické zařízení převádějící signál z resolveru na údaj o poloze. Obvykle se používá pro měření dvoufázové vedení. Je tvořen primárním vinutím, rotorem, který je buzen střídavým proudem k vytvoření proměnlivého magnetického pole a sekundárním vinutím, jež tvoří dvě cívky navzájem kolmé. V nich se vlivem otáčení rotoru indukuje napětí fázově posunuté o  $90^\circ$ . Resolver neobsahuje polovodičové prvky a je odolný účinkům záření. [28-30]



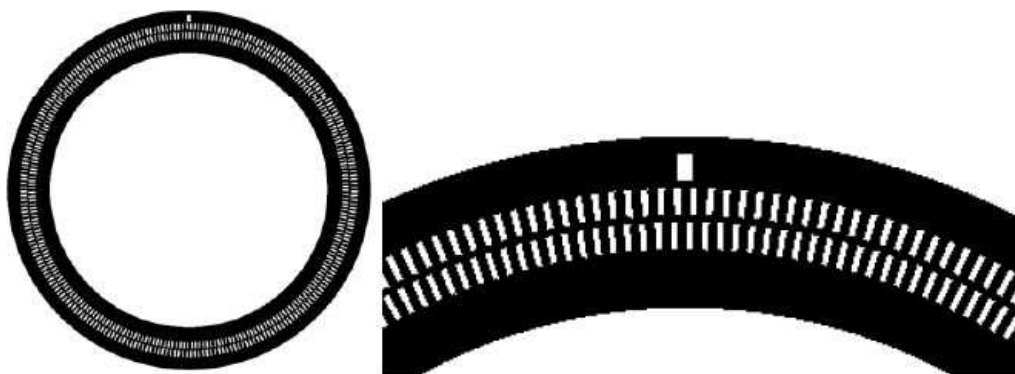
Obr. č. 11.2 – Resolver

## 11.3 Optický inkrementální snímač

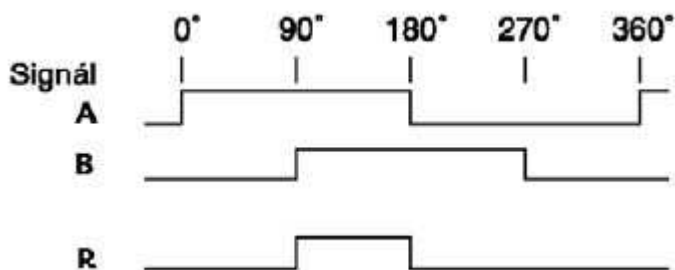
Činnost optického snímače je založena na snímání intenzity světelného toku. Jako zdroj světla je použita obyčejně LED dioda a jako snímače je užito některého fotocitlivého prvku (fotodioda, fototranzistor). [11, 25-27]

### 11.3.1 Princip IRC snímače

Na hřídeli rotoru je připevněn optický disk s mřížkou (obr. č. 11.3). Druhý disk s mřížkou je umístěn napevno a neotáčí se. Pokud jsou mřížky proti sobě, prochází maximum světla a signál ze snímače má maximální amplitudu, při pootočení disku se průchod světla mřížkou sníží a zároveň klesá amplituda signálu ze snímače. Při zakrytí mřížky je signál ze snímače nulový. Sekvence impulsů se načítá v čítači. Druhý snímač je posunut o  $\lambda/4$  a slouží k detekci směru otáčení. Třetí snímač je tzv. indexní a udává jeden impuls za otáčku. Nevýhodou IRC snímače je v tom, že nemůže udávat aktuální polohu hned od počátku otáčení. Udává relativní polohu, která musí být vztažena k referenčnímu bodu. Směr otáčení je určován tak, že pokud signál A předbíhá signál B, tak se motor otáčí jedním směrem, pokud signál B předbíhá signál A, otáčí se směrem opačným (obr. č. 11.4).



Obr. č. 11.3 – Optický disk IRC snímače

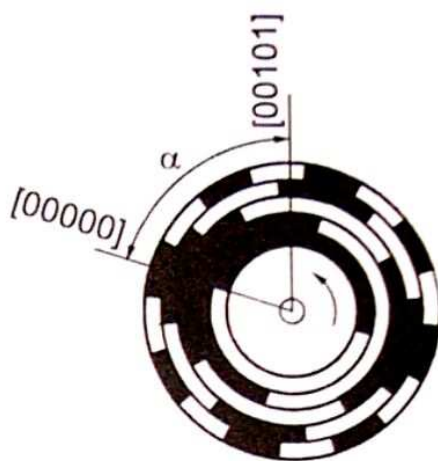


Obr. č. 11.4 – Průběhy snímaných signálů z IRC snímače



### 11.3.2 Princip ARC snímače

ARC snímač je snímač absolutní polohy natočení hřídele a jeho výstupem je přímo binární číslo. Na průhledném kotouči (obr. č. 11.5) jsou stopy jejichž počet odpovídá rozlišení snímače. Každá stopa má svůj snímač.



Obr. č. 11.5 – Optický disk absolutního snímače

### 11.4 Hallové sondy

Snímání polohy rotoru pomocí Hallových sond je velice přesné. To usnadňuje rozbíhání a řízení motoru v malých otáčkách. Na hřídeli rotoru je umístěn magnetický disk, který se otáčí současně s rotorem, nebo se využívá přímo magnetického pole rotoru. K snímání se používají tři Hallové sondy. Ty jsou umístěny na statoru v blízkosti rotujícího magnetického disku, nebo rotoru. Při otáčení disku se vlivem měnícího se magnetického pole mění i odpor v Hallových sondách, který je snímán pomocnými vodiči do řídicí jednotky, která softwarově vyhodnotí polohu rotoru a upravuje komutaci. Nevýhodou tohoto řešení je další sada vodičů, která vystupuje z motoru. Řídicí jednotka motoru pracuje převážně pouze s motorem pro který byla navržena. Tohoto typu pohonu se sice v modelářství používá, ale jen u velmi speciálních typů pohonů.

Jsou vyráběny i motory s integrovanou řídicí jednotkou přímo na motoru, takže z motoru vystupují pouze přívody napájení. Tyto motory jsou však určeny pro nižší výkony. Důvodem je nutnost zabezpečit kvalitní chlazení.

Řídicí jednotky snímající polohu rotoru pouze Hallovými sondami se uplatňují při jednokvadrantovém řízení. Jednotky s čtyřkvadrantovým řízením mají sinusový výstup a vyžadují vstup z Hallových sond doplněný signálem z inkrementálního snímače.

### 11.5 Zpětná vazba EMF

Pro potřeby modeláře je výhodnější způsob řízení motoru pomocí detekce zpětné vazby EMF, tzv. Back EMF. Toto řízení otáček motoru umožňuje použití jednoho univerzálního regulátoru otáček pro motory různých výrobců. Výkon regulátoru musí být dimenzován na příkon motoru, aby nedošlo ke zničení regulátoru.

Využití řízení pomocí detekce zpětné vazby EMF spočívá v tom, že v jednom okamžiku jsou napájeny pouze dvě fáze a třetí je bez napájení. Vlivem změny magnetického pole (otáčením rotoru s magnety) se v cívce nenapájené fáze indukuje elektromotorické napětí, které je přiváděno zpět do regulátoru. V regulátoru se vyhodnocuje průchod indukovaného napětí nulou. Během jedné elektrické otáčky se snímá průběh nulou šestkrát. Průběh nulou musí být vždy, jinak by se motor netočil. Software musí na tyto stavy umět reagovat. [Citace Ing. Dvorský, MGM Compro]

Na základě těchto informací vyhodnocuje procesor polohu rotoru a upravuje komutaci. Problém nastává při rozběhu motoru, protože zpětná vazba EMF funguje pouze při motoru v chodu. Proto se využívá předprogramování regulátoru pro rozběh motoru a v okamžiku, kdy se rotor otáčí se již detekuje zpětná vazba EMF a upravuje se komutace. Při řízení motoru pomocí detekce zpětné EMF má motor zhoršené vlastnosti při nízkých otáčkách.

## 12 Konstrukce BLDC motoru

Následující kapitola se zabývá praktickou částí práce. Je zde uveden popis konstrukce a varianty BLDC motorku včetně problémů, které se při konstrukci vyskytly.

### 12.1 Materiál ke stavbě

Ke stavbě motorku je vhodné použít díly z vyřazených optických mechanik. Obstarat dostatečné množství vyřazených CD nebo DVD mechanik zcela zdarma nebo za bezvýznamnou cenu dnes již není problém. Z takovéto mechaniky lze získat mnoho použitelných součástek pro stavbu motoru. Nejdůležitější je BLDC motorek, další vhodnou komoditou jsou hřídelky, po kterých se pohybuje čtecí hlava. Z čtecí hlavy lze použít NdFeB magnety.

Nejprve je potřeba udělat několik úprav, než lze započít se stavbou nového motorku. Oddělit rotor od statoru, poté stáhnout stator z plechu, na který je nalisován a zbavit drátu vinutí. Lepší motorky jsou vybaveny kuličkovými ložisky, ty levnější kluznými. Hřídelky, po kterých se pohybuje čtecí hlava mají průměr 3 mm, jsou kalené a mají kvalitní povrchovou úpravu. Lze je s úspěchem použít jako hřídeli do motoru, protože ve většině případů jak ložiska kuličková, tak kluzná mají vnitřní průměr 3 mm. Stejně tak otvor uložení hřídele v rotoru. Tyto hřídelky lze využít také jako náhradní, po přizpůsobení délky, do komerčních motorů, protože většina výrobců používá pro menší motory hřídele s průměrem 3 mm.

### 12.2 Konstrukce

Podle množství dostupných součástek z optických mechanik byly vybrány následující tři konstrukce motorků.

Motor č. 1     stator průměr 23,9 mm, hloubka 4,7 mm, počet plechů 9, 9 pólových nástavců, 2x kuličkové ložisko, zapojení do trojúhelníku, vinutí dvojitém drátem o průměru 0,35 mm, 15 závitů na jeden pólový nástavec, různé rotory (obr. č. 12.1 –12.7)

- Motor č. 2      2x stator průměr 23,7 mm, hloubka 4,6 mm, počet plechů 9, 9 pólových  
nástavců = výsledný stator s hloubkou 9,2 mm a 18 plechy, zapojení  
do trojúhelníku, vinutí dvojitým drátem o průměru 0,35 mm, 15 závitů  
na jeden pólový nástavec (obr. č. 12.9 –12.12)
- Motor č. 3      2x stator průměr 23,88 mm, hloubka 4,8 a 3,5 mm, počet plechů 13 a 10,  
9 pólových nástavců = stator s hloubkou 8,3 mm a 23 plechy, zapojení  
do trojúhelníku, vinutí dvojitým drátem o průměru 0,35 mm, 15 závitů  
na jeden pólový nástavec (obr. č. 12.13)

U motoru č. 1 se testovaly čtyři různé druhy rotorů. Měřením se porovnávaly vlastnosti motoru.

První rotor byl ponechán z optické mechaniky (obr. č. 12.1). Rotor byl vybrán s vlepeným tvrdým pásovým magnetem. V některých rotorech byly vlepeny měkké magnety z plastoferitu, ale ty jsou nepoužitelné pro svou malou přídržnou sílu. Jediná úprava tohoto rotoru spočívala ve vyvrtání chladících otvorů v čele rotoru. Tato varianta motoru je nejlevnější.

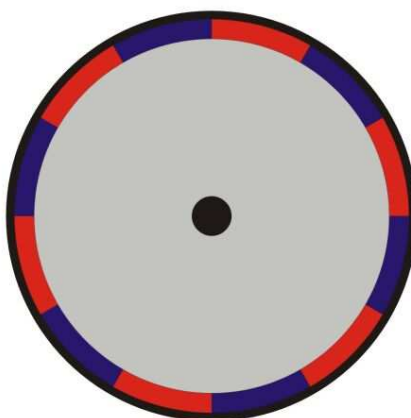
Druhou variantou je rotor vysoustružený z duralu. Do něho byly vlepeny NdFeB magnety 4x4x1,6 mm. NdFeB magnety mají velkou magnetickou energii. Dural je paramagnetický materiál. Proto nebude uzavírán magnetický obvod pláštěm rotoru, ale vzduchem. Tím by se měla snížit intenzita magnetického pole rotoru a nemělo by docházet k tak velkému přesycení statorových plechů. (obr. č. 12.3, 12.5)

Třetí testovaný rotor je z optické mechaniky, který byl zbaven plastoferitu a místo něho bylo vlepeno 12 NdFeB magnetů 4x4x1,6 mm. Rotor je železný, proto bude magnetický obvod uzavírán pláštěm rotoru (obr. č. 12.6).

Posledním rotorem je soustružený ze železa s 12 ks NdFeB magnetů 4x4x1,6 mm (obr. č. 12.7).



Obr. č. 12.1 - Rotor z optické mechaniky s vlepeným magnetem z výroby ve tvaru pásu, pro lepší upevnění hřídele je na hřídeli nasunut a přilepen mosazný kroužek



Obr. č. 12.2 - Rotor s vlepeným pásovým magnetem. Barevně je znázorněna polarizace jednotlivých částí pásového magnetu



Obr. č. 12.3 - Finální motor č. 1 s rotorem z duralu



Obr. č. 12.4 – Stator motoru č.1



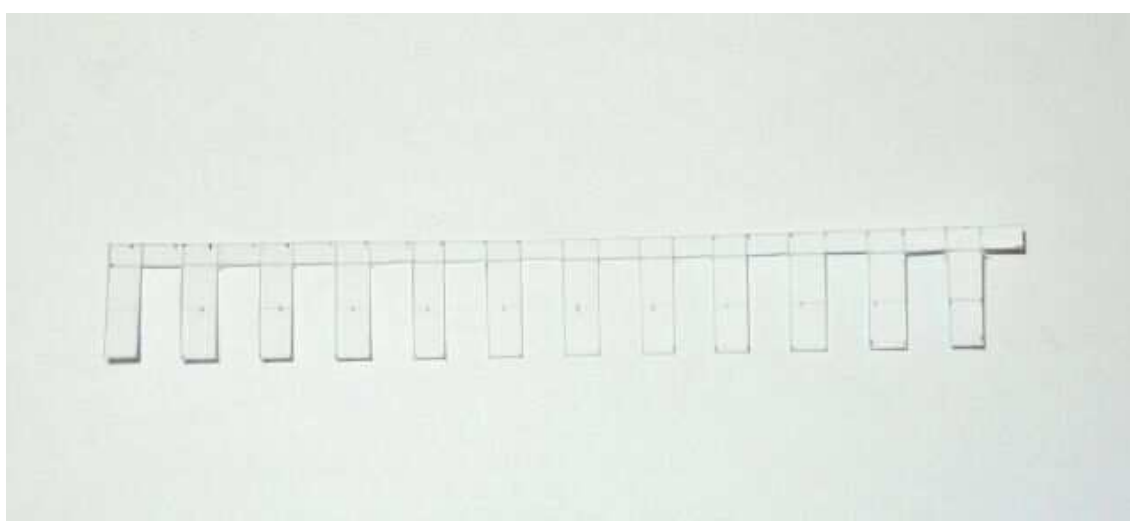
Obr. č. 12.5 - Rotor z duralu pro motor č.1, vlepeno 12 ks NdFeB magnetů 4x4x1,6 mm, polarizace jednotlivých magnetů je naznačena barevně, detail magnetu



Obr. č. 12.6 - Rotor z optické mechaniky zbavený pásového plastroferitu pro motor č. 1



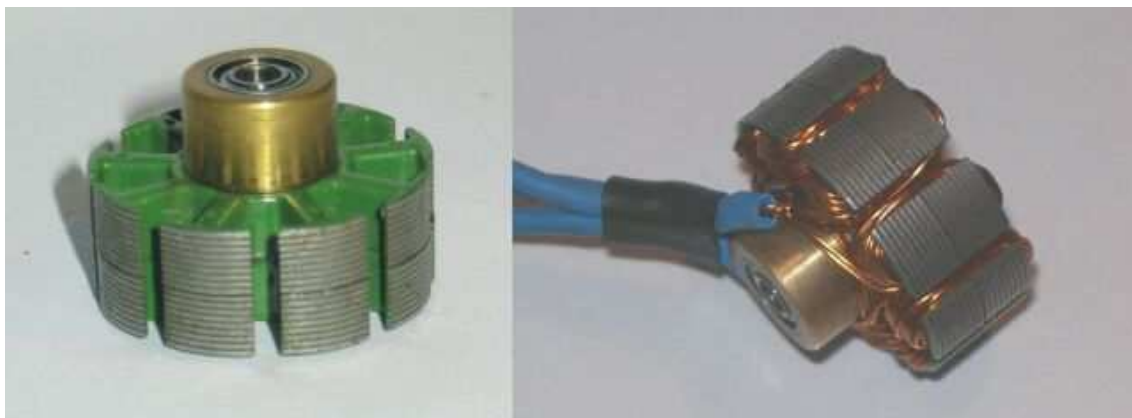
Obr. č. 12.7 - Rotor soustružený ze železa s 12 ks NdFeB magnety 4x4x1,6 mm



Obr. č. 12.8 - Pomocná šablona pro vlepení magnetů do rotoru

U motorů číslo 2 a 3 je zdvojený stator. To ovšem znamenalo vyrobit nové rotory a pořídit do nich nové magnety. Statory jsou na jedné straně zbaveny barvy smirkovým papírem a páry slepeny lepidlem EPOXY 1200. Tím vznikly statory o průměru 23,7 mm a 23,88 mm hloubce a 9,2 mm a 8,3 mm. Pro oba statory byl vyroben jeden rotor ze železa. Do rotoru bylo vlepeno 12 ks NdFeB 8x4x1,6 mm s povrchovou úpravou pasivací. Magnety byly vlepeny pomocí šablony do rotoru lepidlem Alteco 3 - TON EPOXY Adhesive s kovovým plničem odolným vodě a olejům a teplotám od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Všechny statory byly navinuty měděným lakovaným drátem o průměru 0,35 mm. Na každém pólovém nástavci je 15 závitů zdvojeným drátem (odpovídá 30 závitům na jeden pólový nástavec). Počet závitů a tloušťka drátu byla zvolena pokusně.



Obr. č. 12.9 - Dvojitý stator pro motor č. 2, lepeno epoxy 1200



Obr. č. 12.10 - Stejný stator jako na obr. č. 12.9, navinutý Cu lakovaným drátem o průměru 0.35 mm





Obr. č. 12.11 - Rotor soustružený ze železa pro motory č. 2 a č. 3, vlevo šablona pro vlepění magnetů, vpravo 12ks NdFeB magnety 8x4x1,6 mm



Obr. č. 12.12 - Finální motor č. 2



Obr. č. 12.13 - Dvojitý stator pro motor č. 3, navinuta jedna fáze dvojitým lakovaným drátem Cu průměr 0,35 mm

Zabývat se složitými výpočty by v tomto případě nebylo efektivní a také jednoduché. Zpočátku byl předpoklad pokusit se motory sestavit na základě výpočtu, ale pro složitost výpočtů a nedostatek informací o použitých materiálech bylo od tohoto upuštěno. Pokus kontaktovat firmy, které se tomuto oboru věnují vedl pouze k doporučení placených seminářů, nebo koupi software, který umí na základě zadaných vstupních údajů parametry motoru vypočítat. Ani jedna varianta není levnou záležitostí.

Během stavby se vyskytlo několik problémů. V první řadě to byl problém jakým lepidlem vlepít magnety do rotorů. Pokus s vteřinovým lepidlem se nezdařil, protože magnety se dotýkaly rotoru pouze svou hranou. Po nějaké době se magnety odlepily a přitáhly se ke statoru (u rotoru z duralu). Neuspěl ani epoxy 1200. Nakonec vyhovovalo lepidlo epoxy s kovovým plničem. Pro tento účel bylo použito lepidlo Alteco 3-TON EPOXY Adhesive s kovovým plničem. Před vlepením magnetů do rotoru z duralu, byly v rotoru vybroušeny plošky, aby magnety dosedly celou svou plochou na rotor. U rotoru z optické mechaniky nebo ze železa to nebylo možné, ale na těchto rotorech držely magnety svou přídržnou silou a lepidlo sloužilo k fixaci ve správné poloze.

Dalším úskalím bylo upevnění hřídelky do rotoru použitého z optické mechaniky. Stále se vyskytoval problém, že i po stlačení osazení otvoru se hřídelka v rotorech protáčela. Proto bylo zvoleno řešení navléknout na hřídel mosazný kroužek a přilepit ho i s hřídelí k plášti rotoru stejným lepidlem, jakým byly lepeny magnety.

Rotor by se měl na závěr po vlepení magnetů vyvážit. Od tohoto kroku bylo upuštěno z důvodu nedostatku vhodného vybavení.

## **13 Měření**

### **13.1 Pomůcky pro měření**

1. Digitální multimetr s krátkodobým měřením proudu do 20A
2. Digitální multimetr na měření napětí
3. Digitální otáčkoměr s optickou sondou
4. Digitální váha s přesností vážení na 1g
5. Stolice pro připevnění motoru
6. Proporciální RC souprava FM 35 MHz, třífázový regulátor proudu s PWM modulací
7. Zdroj napětí Li-Pol baterie 3S 1750mAh 12,6V 12C

### **13.2 Postup měření**

Měření bylo provedeno s motorem č. 1 pro statický tah ve vertikální poloze motoru s vrtulí v tahu směrem na váhu. Na digitální váze byla umístěna stolice s motorem. Měření bylo provedeno pro čtyři různé rotory a různé průměry vrtulí. Měřen byl odebíraný proud na jedné fázi do motoru digitálním multimetrem. Optickým digitálním otáčkoměrem byly měřeny otáčky. Pro rychlejší reakci otáčkoměru byla sonda otáčkoměru osvětlována světlem z LED diod napájených stejnosměrným napětím. Měření bylo natáčeno na videozáznam. Měřené veličiny byly při následné reprodukci záznamu zaneseny do tabulky č. 3. Na závěr byly vytvořeny grafy závislosti velikosti proudu na tahu, tahu na otáčkách a proudu na otáčkách. Grafy jsou uvedeny jako příloha. Stejným způsobem byly měřeny Motor č. 2, č. 3, MP JET 28/7/30.

Tabulka č. 1 – Hmotnosti motoru č. 1 s různými rotory

| <b>Rotor</b>           | <b>Magnety</b>                 | <b>Hmotnost rotoru</b> | <b>Hmotnost motoru</b> |
|------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|
| duralový soustružený   | 12 ks NdFeB 4x4x1,6 mm         | 10 g                   | 29 g                   |
| železný z CD mechaniky | Původní pásový magnet z výroby | 12 g                   | 31 g                   |
| železný z CD mechaniky | 12 ks NdFeB 4x4x1,6 mm         | 11 g                   | 30 g                   |
| železný soustružený    | 12 ks NdFeB 4x4x1,6 mm         | 21 g                   | 40 g                   |

Tabulka č. 2 – Hmotnosti motorů č. 2, č. 3 a MP JET 28/7/30

| <b>Motor</b>   | <b>Magnety</b>         | <b>Hmotnost motoru</b> |
|----------------|------------------------|------------------------|
| Motor 2        | 12 ks NdFeB 8x4x1,6 mm | 58 g                   |
| Motor 3        | 12 ks NdFeB 8x4x1,6 mm | 59 g                   |
| MP JET 28/7-30 | 14 ks NdFeB            | 71 g                   |

Tabulka č. 3 – Veličiny, které byly měřeny s motory č. 1, 2, 3 a MP JET

| <b>Motor č.</b>                                     |                      |                  |                         |
|-----------------------------------------------------|----------------------|------------------|-------------------------|
| <b>Napájecí baterie LiPol 3S 1750 mAh 12,6V 12C</b> |                      |                  |                         |
| <b>vrtule</b>                                       | <b>Otáčky / min.</b> | <b>Proud [A]</b> | <b>Statický tah [g]</b> |
| 6x3                                                 |                      |                  |                         |
| 7x3,5                                               |                      |                  |                         |
| 9x5                                                 |                      |                  |                         |
| 10x4,7                                              |                      |                  |                         |

## 14 Závěr

Měření bylo prováděno v domácích, ne laboratorních podmínkách, s běžně dostupnými měřicími přístroji. Během měření mohlo docházet k chybám jak vlivem nepřesnosti, tak rychlostí ustálení měřících přístrojů během jednotlivých měření. Kvalita měřených hodnot byla také ovlivněna tím, že každé nové měření probíhalo vždy ne se zcela studeným motorem, který se pak rychleji zahříval a mohlo tak docházet k nepřesnostem. Celé měření se natáčelo na videozáznam a posléze byly odečítány hodnoty měření z přehrávaného záznamu. Jiným způsobem měření provádět nešlo, protože hodnoty měřených veličin se měnily velmi rychle a nešlo stihnout odečíst a zapisovat v jediném okamžiku několik hodnot. Při přehrávání záznamu bylo výhodou, že záznam šel zastavit a nebyl problém naměřené hodnoty přepsat do tabulky. K jednotlivým měřením lze napsat následující závěry.

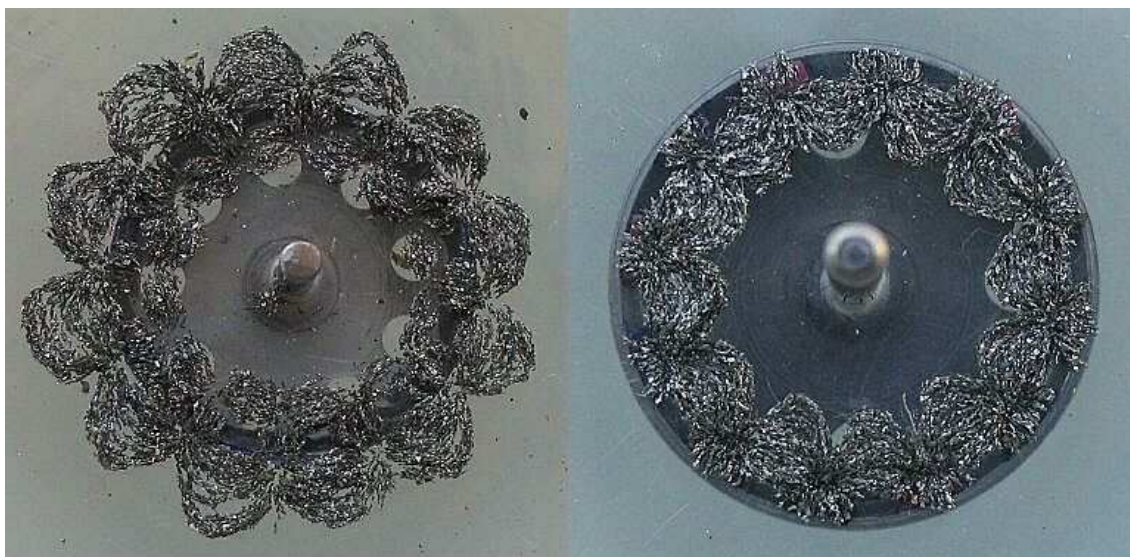
Motor s rotorem z optické mechaniky zbavený pásového magnetu z plastoferitu a osazený 12 ks NdFeB magnety (dále Rotor 1) se rozbíhal plynule, rychle reagoval na změny otáček, málo se zahříval. Je předpoklad, že se bude za letu dobře chladit. Maximální statický tah 305 g dosáhl s vrtulí 7x3,5 při 13141 ot./min. a proudovém odběru 15,6 A. Motor č. 1 s tímto rotorem vykazoval ze všech testovaných rotorů nejlepších výsledků. Dosahoval nejvyššího statického tahu při nejnižším proudovém odběru se všemi použitými vrtulemi.

Druhých nejlepších výsledků dosáhl motor č. 1 s rotorem soustruženým ze železa a osazeným 12 ks NdFeB magnety (dále Rotor 2). To, že nedosahoval lepších výsledků než Rotor 1 mohlo mít několik příčin. Tloušťka stěn soustruženého rotoru je větší než u rotoru z optické mechaniky a tím je i těžší. Je to dáno možnostmi, které umožňoval při výrobě tvrdý materiál a soustruh. Rotory do optických mechanik jsou vyrobeny z tenkého měkkého plechu a jsou lisovány. Motor č. 1 s Rotorem 2 se choval stejně dobře jako motor č. 1 s Rotorem 1, pouze dosahoval nižšího tahu, otáček a vyššího proudového odběru. Jejich přímkové charakteristiky v grafech jsou téměř rovnoběžné. Také je to způsobeno tím, že ve větším masívu železa Rotou 2 docházelo snadněji k tvorbě vířivých proudů, které rotor více zahřívají a působí proti otáčení rotoru, brzdí ho. Nicméně pro použití v modelu je vhodný. Svou vyšší hmotnost kompenzuje svojí

pevností a odolností proti poškození při nárazu a masivním uložením hřídele. Naproti němu je motor č. 1 s Rotorem 1 lehčí o 10 g, ale při výrobě byl problém pevně a přesně v ose rotoru upevnit hřídel do rotoru. Vše muselo být vyřešeno vlepením hřídele a fixováním pojistným kroužkem. Motor s Rotorem 2 dosáhl maximálního tahu 286 g s vrtulí 7x3,5 při 12434 ot./min. a proudovém odběru 16,19 A.

Třetím rotorem (dále Rotor 3) byl rotor soustružený z duralu osazený 12 ks NdFeB magnety. I přes nízkou hmotnost a silné magnety nedosahoval dobrých výsledků. Celý motor se velmi silně zahříval, plynulý nebyl ani rozběh motoru ani reakce na změnu otáček. Při změně otáček docházelo k nárůstu proudu, který po ustálení otáček na každou stálou hodnotu poklesl. Vše je způsobeno tím, že magnetický obvod rotoru se uzavíral vzduchem vně rotoru (obr. č. 14.1). Z obr. č. 14.1 lze usoudit, když se porovná hustota siločar rotoru z duralu a ze železa, že silnější magnetické pole působící na magnetické pole statoru má rotor železný. Rotor z duralu má hustší siločáry uzavírající se vně rotoru než uvnitř. Při použití v letadle za letu by se motor sice lépe chladil, ale i tak by zdaleka nedosahoval takového výkonu jako s Rotorem 1 nebo s Rotorem 2, což by omezovalo charakteristiku i délku letu. Motor č. 1 s Rotorem 1 nebo 2 při stejném tahu jakého by dosahoval motor s Rotorem 3, by měl výrazně nižší proudový odběr a doba letu by byla delší, nemluvě o rezervě výkonu. Co nebylo součástí tohoto pokusu je námět pro budoucí měření a to je vybavit Rotor 3 po obvodu železným kroužkem. Magnetický obvod rotoru by se tak uzavíral tímto kroužkem a parametry motoru by se mohly výrazně zlepšit. Jak je vidět z grafů, tak při použití Rotoru 3 docházelo k většímu proudovému zatížení motoru, tah nebyl vysoký a při vyšších otáčkách motor vypadl ze synchronizace a zastavil se. Oproti Rotorům 1 a 2 dosahoval o více než 100 g nižšího tahu při přibližně stejném proudovém zatížení. Největšího tahu 191 g dosáhl s vrtulí 6x3 při 13043 ot./min. a proudovém odběru 13,78 A. Motor s Rotorem 1 odebíral při srovnatelném statickém tahu méně než 9 A a s Rotorem 2 odebíral 10,16 A.

Výsledky všech měření jsou zobrazeny graficky v přílohách.



Obr.č. 14.1 – Železné piliny ukazují průběh siločar magnetů. Na obrázku vlevo je magnetické pole rotoru z duralu, na obrázku vpravo je magnetické pole rotoru ze železa

Posledním porovnávaným rotorem byl rotor z optické mechaniky (dále Rotor 4), ve kterém byl ponechán původní pásový magnet z výroby. Problém byl už ve velké vzduchové mezeře mezi rotorem a statorem. Ta by šla snížit vhodným výběrem rotoru, ale takový rotor nebyl pro měření k dispozici. Motor se velmi silně zahříval, rozběh byl velmi problematický a při dosáhnutí mezních otáček vypadl ze synchronizace a zastavil se. Největšího tahu 132 g dosáhl s vrtulí 7x3,5 při 8843 ot./min. a proudovém odběru 14,89 A.

Motory č. 2 a č. 3 byly porovnány s komerčním motorem MP JET 28/7-30. Měření motorů probíhalo stejně jako u motoru č. 1. Motor MP JET má větší průměr, stator má 6 pólových nástavců, počet závitů 30 na pólový nástavec, v rotoru je vlepeno 14 ks NdFeB magnetů. Všechny tři motory dosahovaly přibližně stejného statického tahu, ale při rozdílném proudovém zatížení. Toto porovnání je pouze orientační. Motory vyrobené z optických mechanik jsou menší a pro jejich provoz by bylo vhodné vyzkoušet vrtule menší 9x5. Vrtule 10x4,7 byla pro provoz těchto motorů na hranici použitelnosti a je otázkou, zda by se motor uchlادil nápořem vzduchu při letu v modelu letadla. Naopak pro motor MP JET je vhodné použití větší vrtule, například 11x4,7, kdy by se mohla lépe využít rezerva výkonu. Motor MP JET je provozován v akrobatickém modelu ALGOL o letové hmotnost 450 g se sklopnou vrtulí Aeronaut

11x4,7 a letové časy se podle způsobu letu pohybují v rozmezí 10-12 min. Bylo by vhodnější použít pro porovnání s motorem č. 1 a 2 motor stejného průměru, ale takový motor nebyl pro měření k dispozici.

Na závěr je třeba konstatovat, že pokud bychom chtěli vyrobit výkonnější motor a nemáme možnost vyrobit si sami, nebo nechat si velmi levně vyrobit, rotorové pláště a náboje do statorů, tak se vyplatí pořídit motor komerční. Kusová výroba je velmi nákladná. Pokud někdo tuto možnost má a má čas a chuť vyzkoušet tuto cestu, budou největší náklady pouze na pořízení magnetů.

Na druhou stranu lze postavit velmi levný motor pouhým převinutím motorku a výměnou magnetů v rotoru z optické mechaniky. Nebude sice dosahovat výkonů, jaký bude mít srovnatelný komerční, ale v tomto případě se budou náklady pohybovat pouze v pořízení drátu k navinutí a pořizovací ceně magnetů.

V předešlých pokusech se testovaly vlastnosti motoru navinutým Cu lakovaným drátem s 30 závitů na pólový nástavec. V dalších pokusech se lze zabývat možností využít nejlépe hodnocený rotor a stator převíjet Cu drátem různých průměrů. Přitom by bylo vhodné vyzkoušet různý počet závitů na pólový nástavec a proměřit tah a proudové zatížení motoru. Tímto postupem by bylo možné postavit motor, který by vzhledem ke své velikosti měl nejlepší vlastnosti(nejvyšší tah při nejnižším proudovém odběru). Dalšího zlepšení plynulosti chodu motoru by šlo dosáhnout vybavením rotoru větším počtem magnetů. Minimálně by se zlepšily rozběhy motoru.

Veškerá měření byla prováděna po individuální úvaze. Proto se mohou postupy měření a učiněných závěrů rozcházet s výsledky jiných či podobných nezávislých měření.



## 15 Seznam použité literatury

- [1] <http://www.freescale.com>
- [2] ROCHOVANSKÝ O., HAJDAJ N., Elektromotórky a dynama , 1958
- [3] CIGÁNEK LADISLAV, BAUER MIROSLAV, Elektrické stroje a přístroje, SNTL 1955
- [4] Ing. LADISLAV VOŽENÍLEK, Kurs elektrotechniky, SNTL Praha 1976
- [5] Ing. MRAVEC RUDOLF, Elektrické stroje a přístroje, I. Elektrické stroje, SNTL Praha 1982, druhé vydání,
- [6] prof. Ing. Dr. HAŇKA LADISLAV DrSc., Doc. Ing. MIKULEC MILAN CsC., Základy elektrotechniky přednášky, ČVUT 1981, vydání druhé
- [7] [http://e-automatizace.vsb.cz/ebooks/ridici\\_systemy\\_akcni\\_cleny/Akc\\_el.html](http://e-automatizace.vsb.cz/ebooks/ridici_systemy_akcni_cleny/Akc_el.html) (22.9.2007)
- [8] [http://www.aerodesign.de/peter/2001/LRK350/index\\_eng.html](http://www.aerodesign.de/peter/2001/LRK350/index_eng.html) (19.9.2007)
- [9] <http://fei.vsb.cz/kat452/Vsb.cz/elektrotechnika/sylaby/stejnosmerne%20stroje.pdf> Ing. STANISLAV KOCMAN, Fakulta obecné elektroniky FEI VŠB-TU Ostrava (22.9.2007/)
- [10] <http://www.fm.vslib.cz/~krtsb/ft/mzp/pohony.pdf> (22.9.2007)
- [11] [http://www.uzimex.cz/soubory/20070103\\_maxon\\_serial.pdf](http://www.uzimex.cz/soubory/20070103_maxon_serial.pdf) (22.9.2007)
- [12] [http://www.uzimex.cz/soubory/20060322\\_tt\\_2006-06.pdf](http://www.uzimex.cz/soubory/20060322_tt_2006-06.pdf) (22.9.2007)
- [13] <http://www.uzimex.cz/Sortiment/Elektricke-pohony/maxon-motor-ag.html>
- [14] <http://www.uzimex.cz/Sortiment/Elektricke-pohony.html>
- [15] Prof. Dr. JAROMÍR BROŽ , Elektřina a magnetismus II., SPN Praha
- [16] <http://www.abcmagnet.cz> (22.9.2007)
- [17] <http://www.magsy.cz> (22.9.2007)
- [18] <http://www.adcontrols.cz/contents/m-principy.html#> (22.9.2007)
- [19] [http://www.sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni\\_magnety.pdf](http://www.sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf) (30.9.2007)
- [20] [http://www.freescale.com/files/dsp/doc/app\\_note/AN1914.pdf](http://www.freescale.com/files/dsp/doc/app_note/AN1914.pdf), LIBOR ROKOP, LEOŠ CHALUPA, 3-Phase BLDC Motor Control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection Using 56F80x , AN1914, Rev. 1, 11/2005, © Freescale Semiconductor, Inc., 2001, 2005. All rights reserved. (22.9.2007)
- [21] <http://www.dhservis.cz/psm.htm> (22.9.2007)

- [22] <http://dce.felk.cvut.cz/es1/skripta/e8.pdf> - Elektronické systémy II / O. Vysoký. - 1. vyd. - Praha : ČVUT, 1997. - 161 s. - Fak. elektrotechn., Praha. - (brož.) S II 833.107 (22.9.2007)
- [23] <http://www.hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART406-Ovladac-stejnosmerneho-motoru-vyuzivajici-PWM.html> (22.9.2007)
- [24] <http://pokusy.chytrak.cz/schemata/wmp.htm> (22.9.2007)
- [25] Ing. NOVÁK MIROSLAV Ph.D., Rozdělení snímačů, optické snímače, [http://www.mti.tul.cz/files/dms/03\\_rodeleni\\_senz\\_opricke\\_snimace.ppt](http://www.mti.tul.cz/files/dms/03_rodeleni_senz_opricke_snimace.ppt), (28.9.2007)
- [26] <http://measure.feld.cvut.cz/groups/edu/sz2/pdf/IRC.pdf>, (28.9.2007)
- [27] [http://dce.felk.cvut.cz/zri/podklady/Inkrement\\_snimac.pdf](http://dce.felk.cvut.cz/zri/podklady/Inkrement_snimac.pdf), (28.9.2007)
- [28] <http://www.uzimex.cz/Vyrobce/maxon-motor-ag/Snimace/Resolvery.html>, (30.9.2007)
- [29] <http://www.automatizace.cz/article.php?a=988> (30.9.2007)
- [30] <http://www.sps-cl.cz/vyuka/aut/selsyn.htm> (30.9.2007)

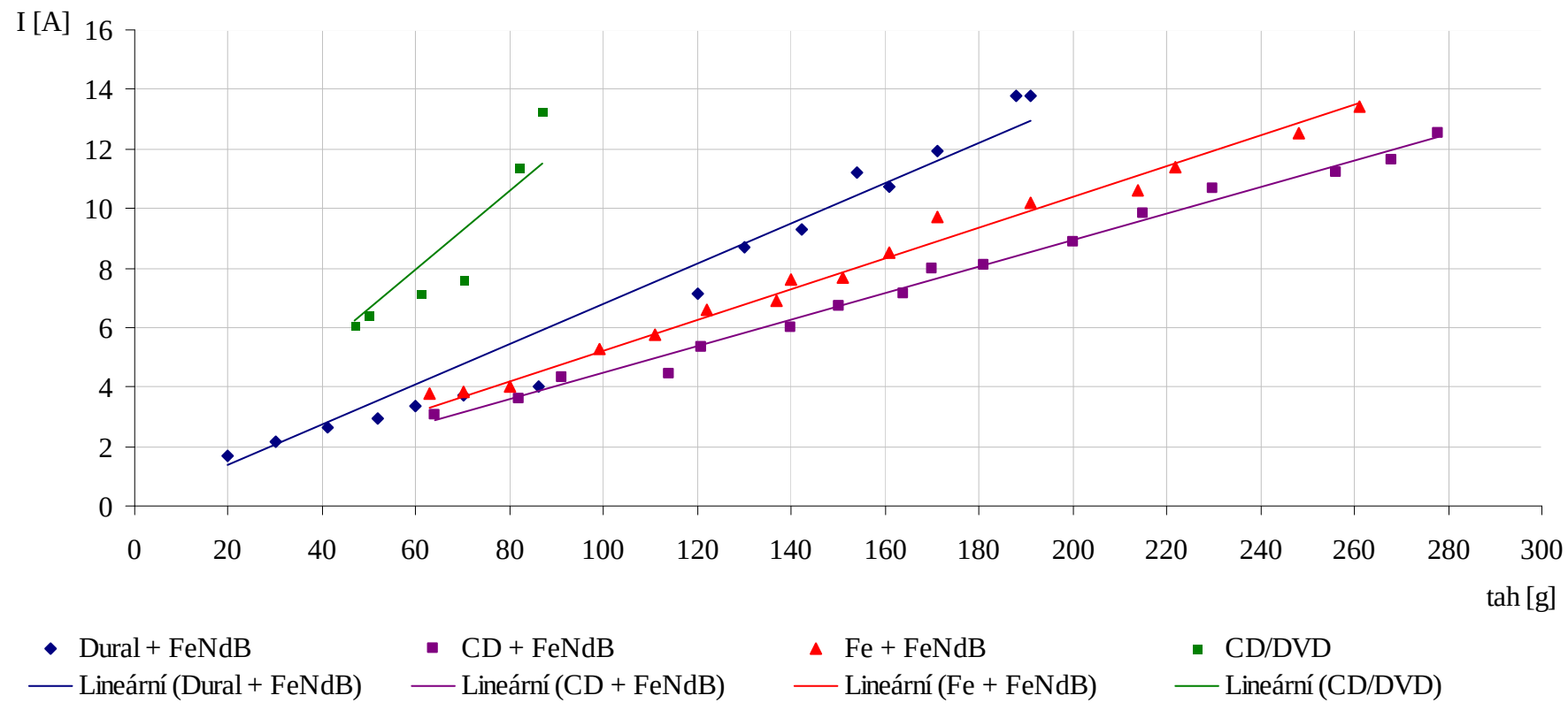
## Přílohy

- /1/ Použité názvy v legendách grafů
- /2/ Graf č. 1 - Motor č. 1 - závislost proudu na tahu, různé rotory s vrtulí 6x3
- /3/ Graf č. 2 - Motor č. 1 - závislost proudu na tahu, různé rotory s vrtulí 7x3,5
- /4/ Graf č. 3 - Motor č. 1 - závislost proudu na tahu, různé rotory s vrtulí 9x5
- /5/ Graf č. 4 - Motor 2, Motor 3, MP JET - závislost proudu na tahu pro vrtuli 10x4,7
- /6/ Graf č. 5 - Motor 2, Motor 3, MP JET - závislost proudu na tahu pro vrtuli 9x5
- /7/ Graf č. 6 - Motor č. 1 - závislost proudu na otáčkách, různé rotory s vrtulí 6x3
- /8/ Graf č. 7 - Motor č. 1 - závislost proudu na otáčkách, různé rotory s vrtulí 7x3,5
- /9/ Graf č. 8 - Motor č. 1 - závislost proudu na otáčkách, různé rotory s vrtulí 9x5
- /10/ Graf č. 9 - Motor 2, Motor 3, MP JET - závislost proudu na otáčkách pro vrtuli 10x4,7
- /11/ Graf č. 10 - Motor 2, Motor 3, MP JET - závislost proudu na otáčkách pro vrtuli 9x5

### **Použité názvy v legendách grafů**

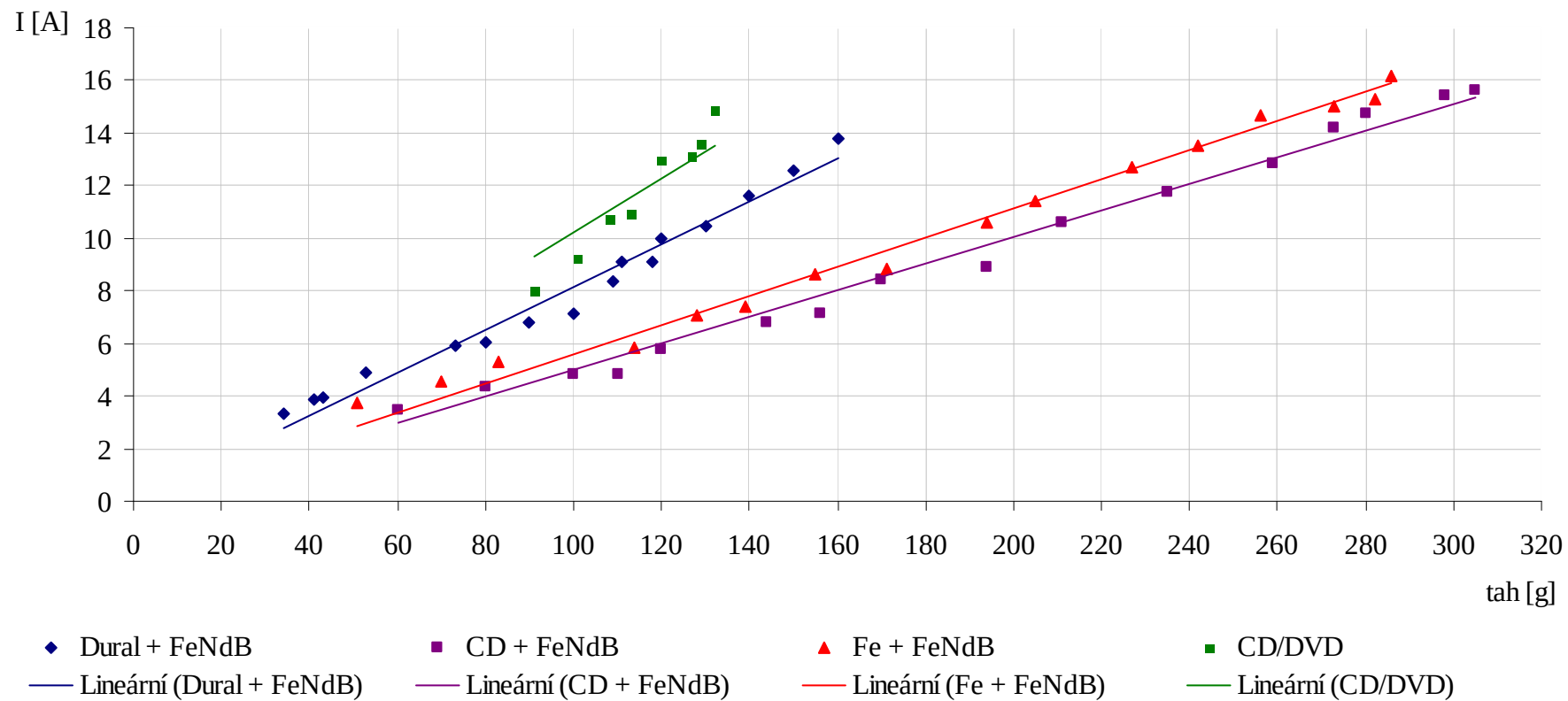
|               |                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dural + FeNdB | rotor duralový s 12 ks FeNdB magnety 4x4x1,6 mm                                                                                                                                                                               |
| CD + FeNdB    | rotor z optické mechaniky s 12 ks FeNdB magnety 4x4x1,6 mm                                                                                                                                                                    |
| Fe + FeNdB    | rotor soustružený ze železa s 12 ks FeNdB magnety 4x4x1,6 mm                                                                                                                                                                  |
| CD/DVD        | rotor z optické mechaniky s původním pásovým magnetem                                                                                                                                                                         |
| Motor č. 1    | stator průměr 23,9 mm, hloubka 4,7 mm, počet plechů 9, 9 pólových nástavců, 2x kuličkové ložisko, zapojení do trojúhelníku, vinutí dvojitým drátem o průměru 0,35 mm, 15 závitů na jeden pólový nástavec (obr. č. 12.1 –12.7) |
| Motor č. 2    | stator s hloubkou 9,2 mm a 18 plechy, zapojení do trojúhelníku, vinutí dvojitým drátem o průměru 0,35 mm, 15 závitů na jeden pólový nástavec (obr. č. 12.9 –12.12)                                                            |
| Motor č. 3    | stator s hloubkou 8,3 mm a 23 plechy, zapojení do trojúhelníku, vinutí dvojitým drátem o průměru 0,35 mm, 15 závitů na jeden pólový nástavec (obr. č. 12.13)                                                                  |
| MP JET        | komerční motor firmy MP JET 28/7-30 D Mk2                                                                                                                                                                                     |

Motor č. 1 - Závislost proudu na tahu, různé rotory s vrtulí 6x3



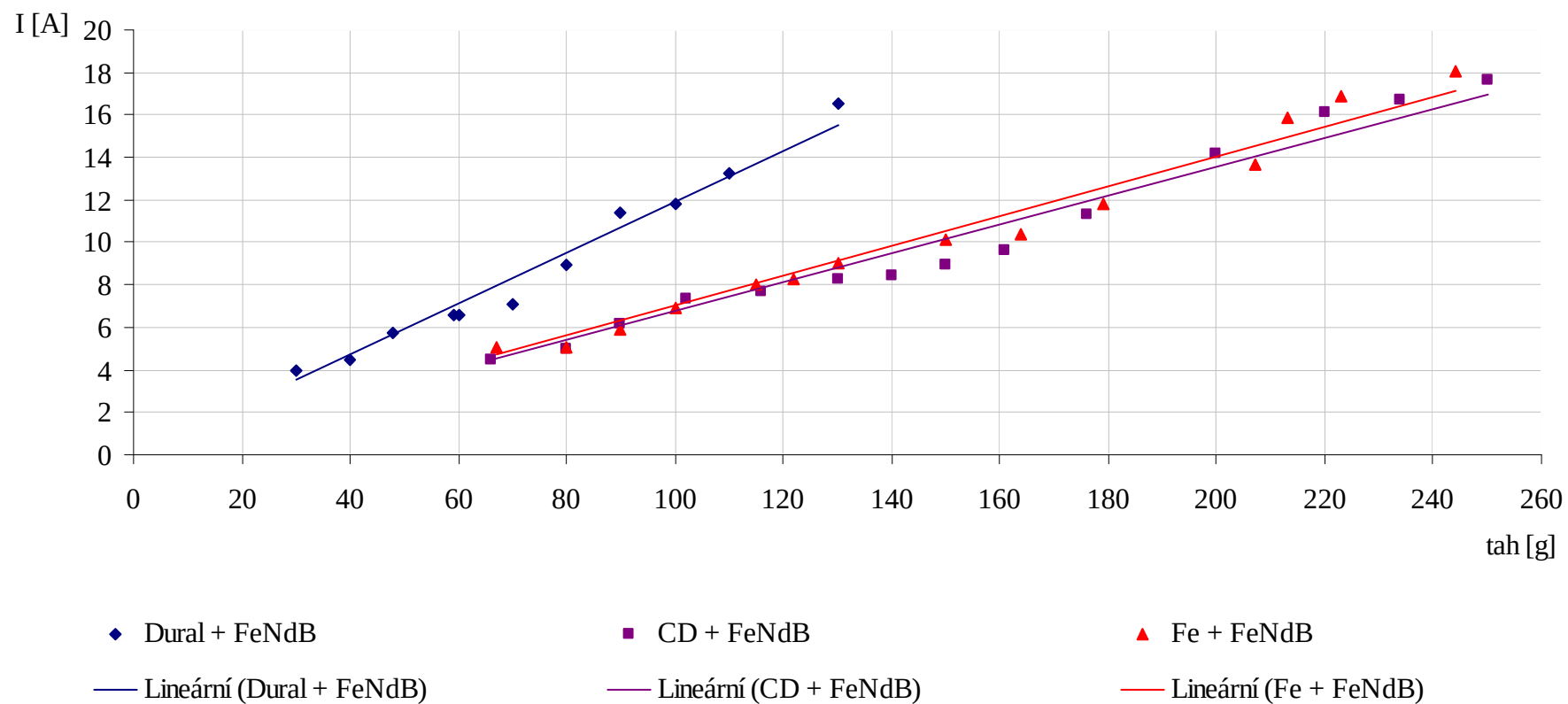
Graf č. 1 - Motor č. 1 - závislost proudu na tahu, různé rotory s vrtulí 6x3

Motor č. 1 - Závislost proudu na tahu, různé rotory s vrtulí 7x3,5



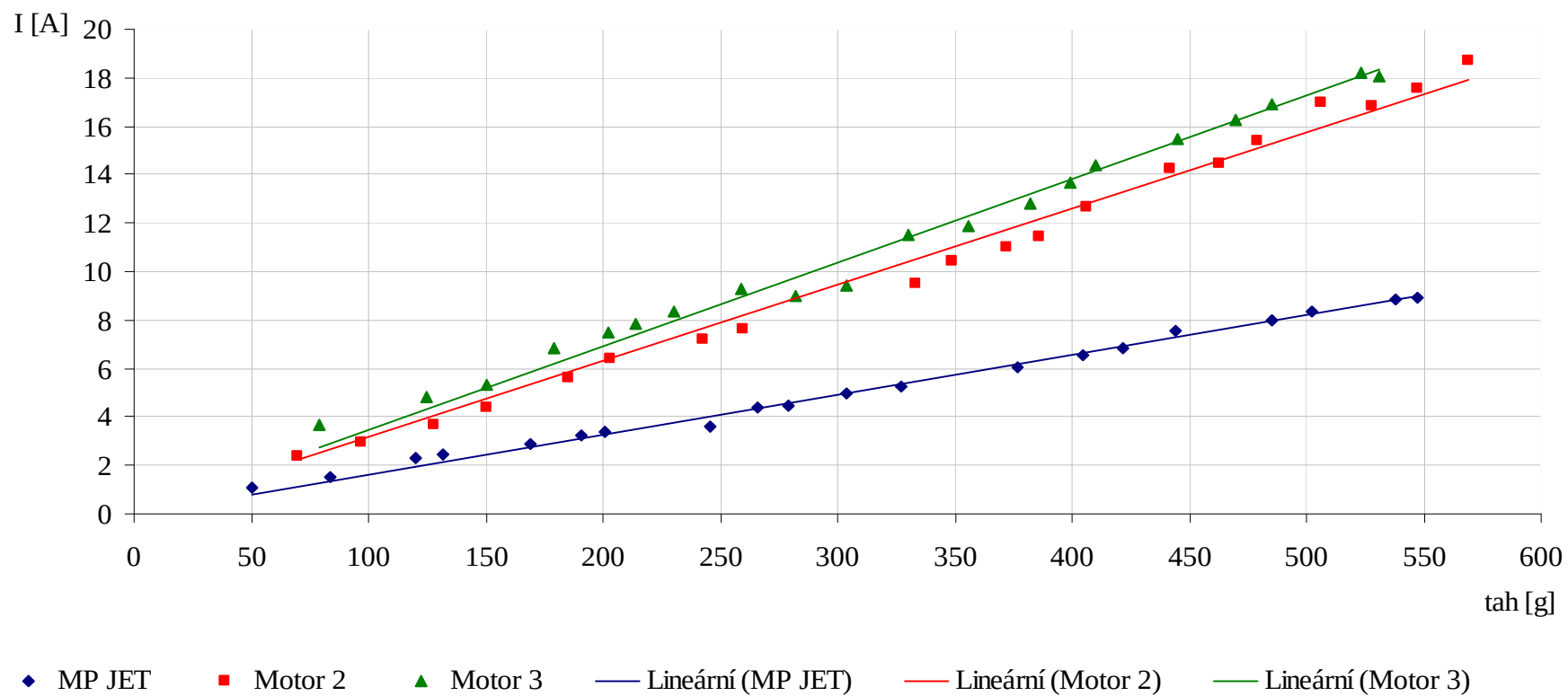
Graf č. 2 - Motor č. 1 - závislost proudu na tahu, různé rotory s vrtulí 7x3,5

Motor č. 1 - Závislost proudu na tahu, různé rotory s vrtulí 9x5



Graf č. 3 - Motor č. 1 - závislost proudu na tahu, různé rotory s vrtulí 9x5

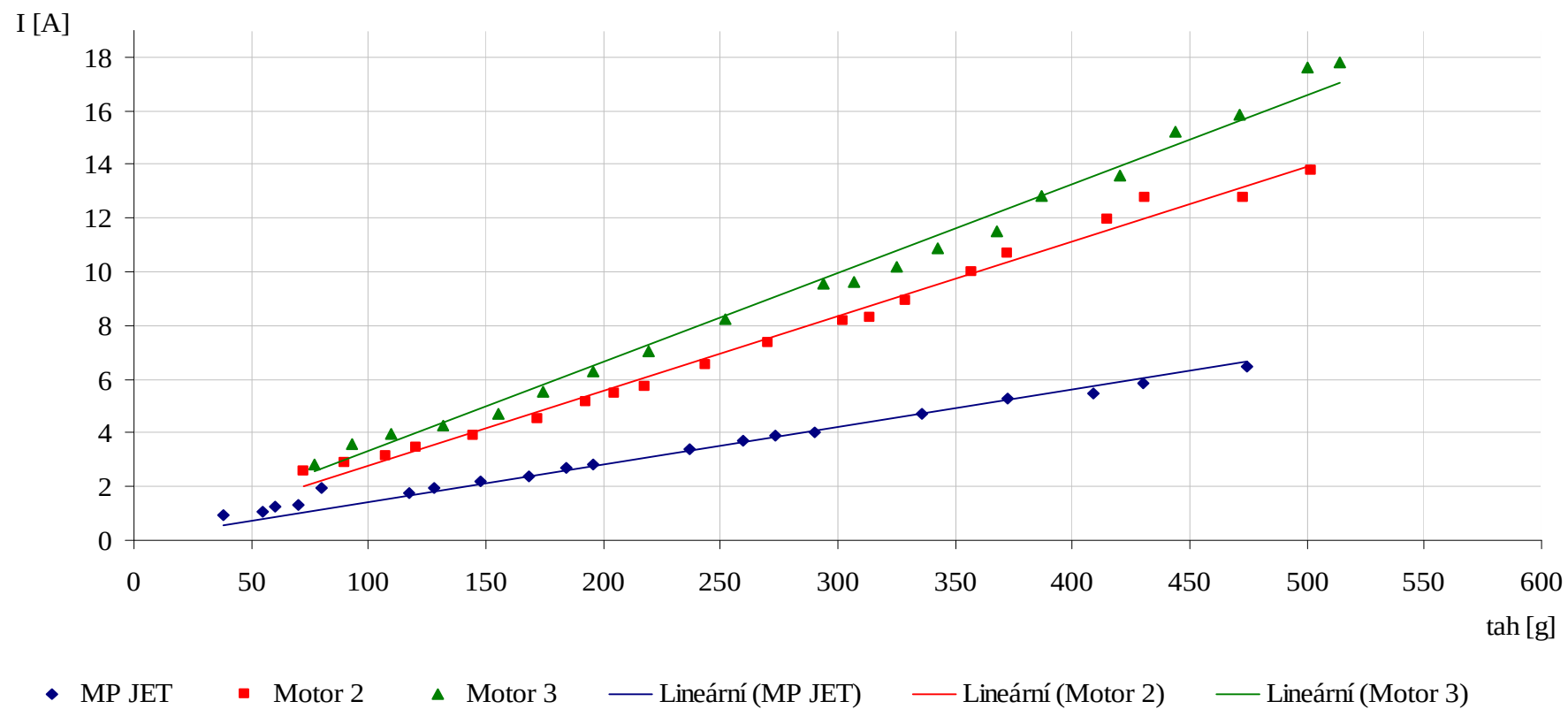
### Motor 2, Motor 3, MP JET - Závislost proudu na tahu pro vrtuli 10x4,7



Graf č. 4 - Motor 2, Motor 3, MP JET - závislost proudu na tahu pro vrtuli 10x4,7

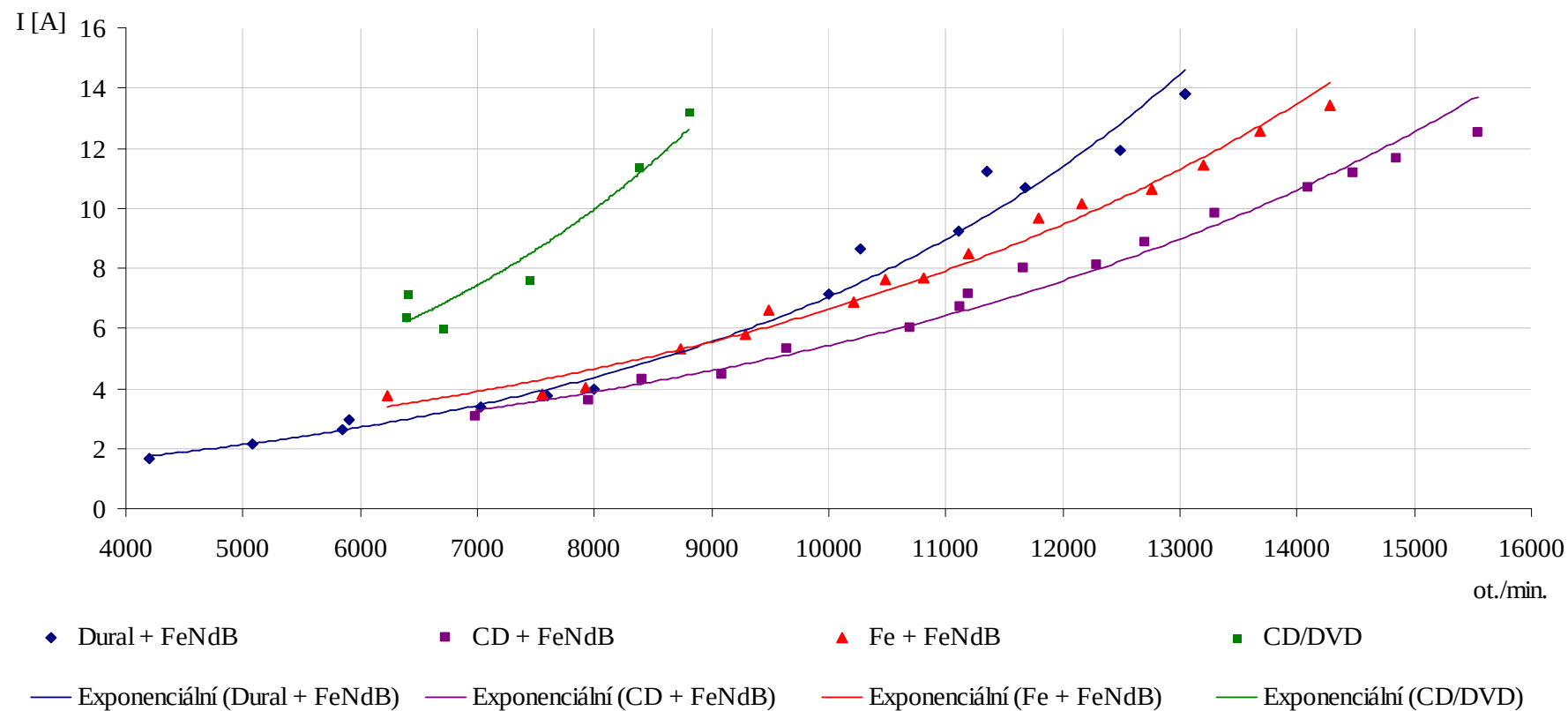


Motor 2, Motor 3, MP JET - Závislost proudu na tahu pro vrtuli 9x5



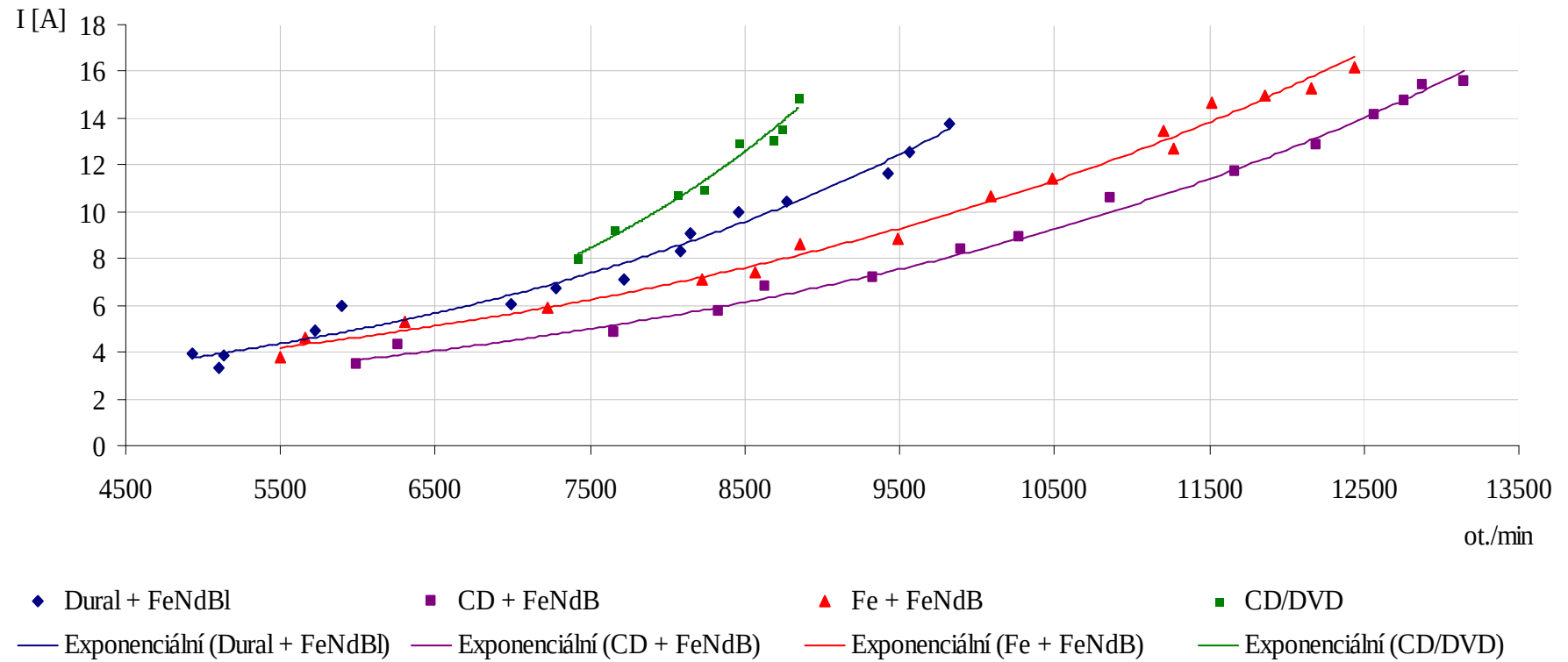
Graf č. 5 - Motor 2, Motor 3, MP JET - závislost proudu na tahu pro vrtuli 9x5

Motor č. 1 - závislost proudu na otáčkách, různé rotory s vrtulí 6x3



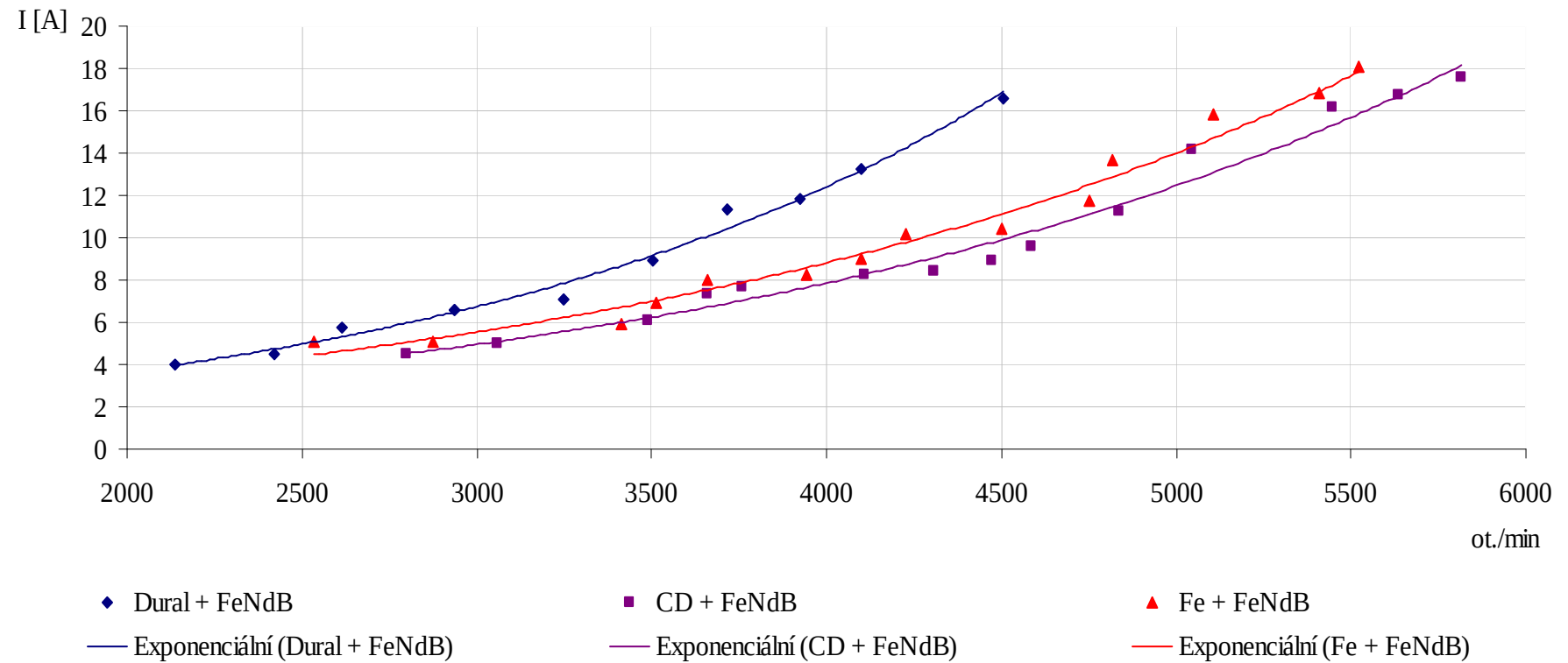
Graf č. 6 - Motor č. 1 - závislost proudu na otáčkách, různé rotory s vrtulí 6x3

Motor č. 1 - závislost proudu na otáčkách, různé rotory s vrtulí 7x3,5



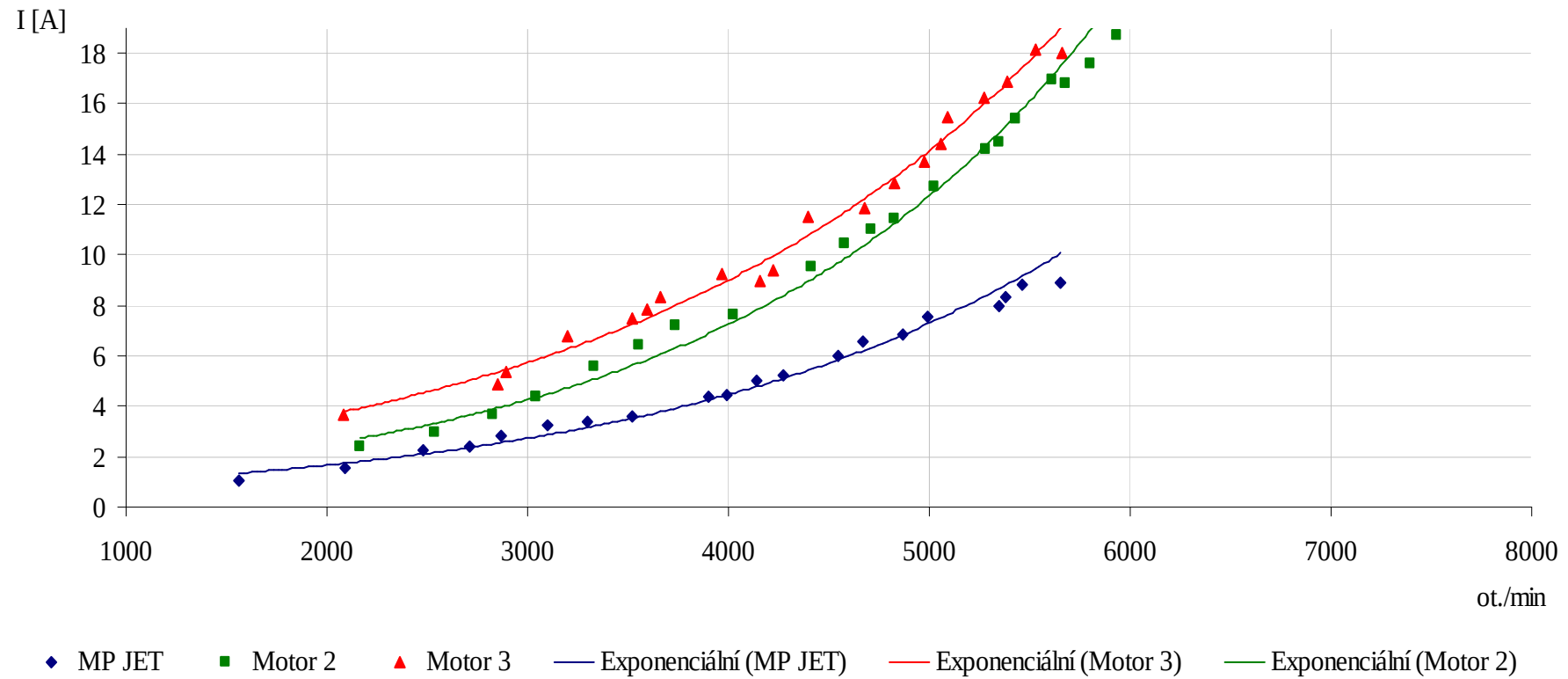
Graf č. 7 - Motor č. 1 - závislost proudu na otáčkách, různé rotory s vrtulí 7x3,5

Motor č. 1 - závislost proudu na otáčkách, různé rotory s vrtulí 9x5



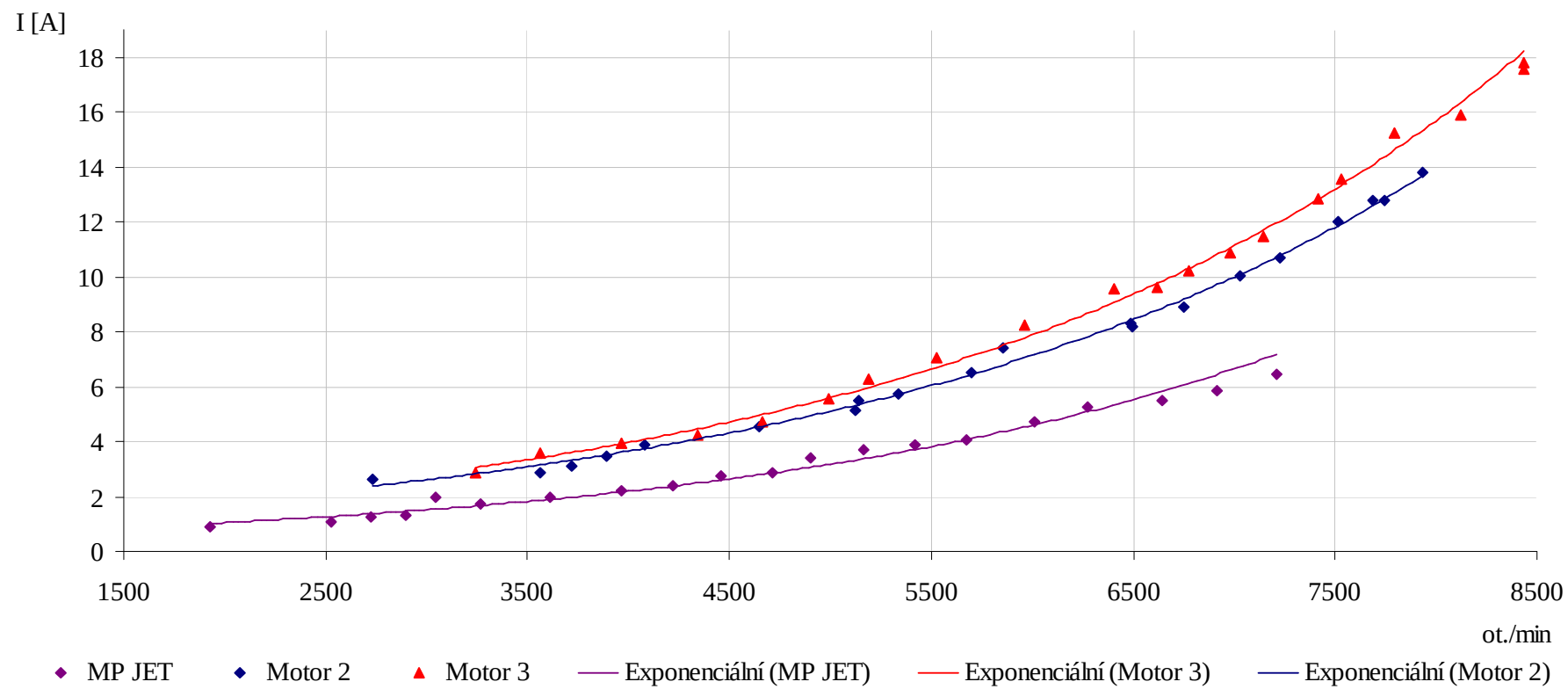
Graf č. 8 - Motor č. 1 - závislost proudu na otáčkách, různé rotory s vrtulí 9x5

Motor 2, Motor 3, MP JET - Závislost proudu na otáčkách pro vrtuli 10x4,7



Graf č. 9 - Motor 2, Motor 3, MP JET - závislost proudu na otáčkách pro vrtuli 10x4,7

Motor 2, Motor 3, MP JET - Závislost proudu na otáčkách pro vrtuli 9x5



Graf č. 10 - Motor 2, Motor 3, MP JET - závislost proudu na otáčkách pro vrtuli 9x5