



## **Středoškolská technika 2013**

**Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT**

# **APLIKACE HUB ELEKTROMOTORŮ V DOPRAVĚ**

**David Černý, Jiří Zourek, Ondřej Suk**

**Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola Kladno  
Jana Palacha 1840  
272 01 KLADNO**

# Obsah

„Proč jsme si vybrali uvedené téma“ .....	2
Řešená problematika .....	2
Základní informace o vybraných motorech.....	3
KOMUTÁTOROVÉ MOTORY .....	3
BLDC MOTORY.....	5
Elektromotor DB22.....	6
Realizace EPAC.....	7
Rekonstrukce elektromotoru DB22 .....	8
Seznam bibliografických citací .....	9

## Poděkování

Za pomoc s vypracováním děkujeme vyučujícím odborných praxí **Jánu Hýblovi** a Ing. **Jaroslavu Mlejnkovi**. Dále Mgr. **Šárce Čečrdlové** za koordinaci a formální kontrolu práce. Samozřejmě i společnosti **Progedior Kybernetés s.r.o.**, která nám zapůjčila jeden motor s příslušenstvím pro naše laborování.

## „Proč jsme si vybrali uvedené téma“

V dnešní době, kdy je svět naplňován stále větším a větším počtem dopravních prostředků je nutné, abychom si uvědomili to, že si tím v podstatě podřezáváme větev pod sebou. Masy dopravních prostředků denně ničí prostředí ve kterém žijeme a proto je dobré zaobírat se tím, jak tento negativní jev minimalizovat. My jsme se rozhodli přispět svojí troškou do mlýna tak, že jsme se rozhodli pro stavbu elektrokola. Elektrokolo i ostatní dopravní prostředky, které jsou poháněny elektrickými pohony mají v dnešním světě velké opodstatnění. Vezměme v potaz například dopravu ve městech, většina měst je dopravně přetížena zejména v ranních hodinách, kdy lidé spěchají do práce a do školy, valná část se dopravuje auty a motocykly. Což má za následek velmi špatné ovzduší a nepříznivou smogovou situaci. Jisté minimum obyvatelstva se snaží dělat něco pro své zdraví a dopravují se vlastními silami, pěšky, nebo na jízdních kolech, možná to někteří nedělají kvůli svému zdraví, ale kvůli svým peněženkám. Pro Nás je nepodstatné z jakého důvodu tak činí, podstatné je, že tak činí. Otázkou zůstává, zda je jízda ranním městem zdraví tak prospěšná, když člověk dýchá vzduch plný výfukových plynů, prachu, freonů, a kdo ví čeho ještě. Pokud však uvážíme, že by se začaly ve městech a nejen tam používat dopravní prostředky, které by byly poháněny na místo spalovacích motorů elektromotory, podstatně by se zlepšily smogové podmínky a lidé by mohli bez obav o své zdraví klidně jezdit na kolech a elektrokolech a chodit pěšky a plně využívat čerstvého vzduchu. Také by se tak masově neničili ekosystémy a příroda, která nás obklopuje a kterou pro svůj život nepochybně potřebujeme. Zohledněme také ceny pohonných hmot, které neustále stoupají a jak se zdá, tak nemají žádnou tendenci stagnovat a už vůbec ne klesat, což je samozřejmě k naší nelibosti. A právě zde nalézají smysl dopravní prostředky s alternativními pohony. Se značným rozmachem současných technologií jsme schopni vyrábět velmi silné a kvalitní magnety (zejména neodymové), které nám umožňují konstruovat motory, které jsou vhodné pro využití v této oblasti dopravy. Tím, že motor nepotřebuje buzení, se značně minimalizují rozměry, hmotnost a také se zjednoduší jeho konstrukce a údržba. Ruku v ruce s tím, jde dopředu i vývoj akumulátorů, které jsou pro tyto aplikace nezbytností. Nejen, že je provoz takovýchto vozů levnější, ale je neškodný životnímu prostředí a v podstatě i nám samotným. Proto jsme se zaměřili na výrobu kola, abychom zjistili výhody a nevýhody těchto dopravních prostředků. Rozdíly v úspoře a ekologii nejsou u jízdního kola tak patrné, jako u automobilů, avšak funkční princip zůstává ten týž.

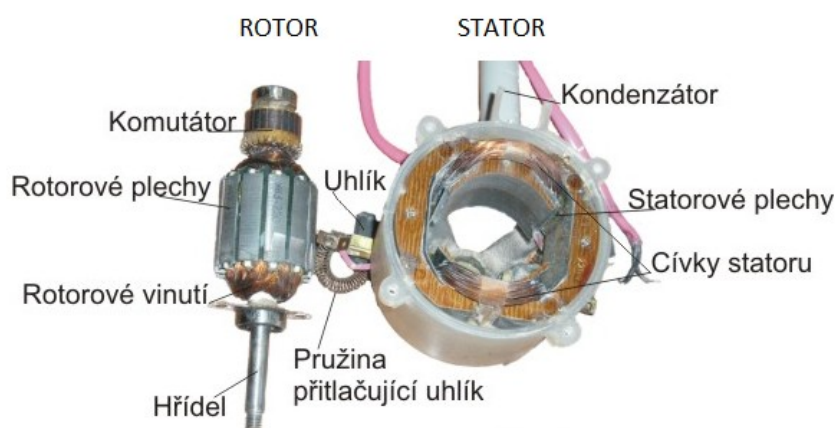
# Základní informace o vybraných motorech

## KOMUTÁTOROVÉ MOTORY

Používají se pro menší výkony, protože dochází k poměrně velkému jiskření a opotřebení komutátoru. Kvůli jiskření musí být odrušeny. Výhodou jsou vysoké otáčky (až 10 tisíc ot./min) a univerzálnost, tudíž je lze použít jak na SS ta ST napětí.

## KONSTRUKCE

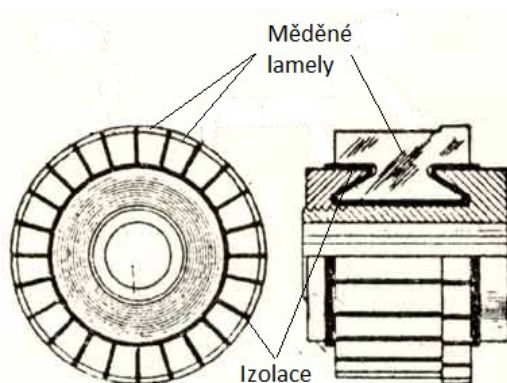
Rotor tvoří jednotlivé vinutí připojené na lamely komutátoru. Stator má u menších jednofázových strojů vyjádřené póly, u malých motorků na SS napětí je stator dokonce tvořen permanentními magnety, větší stroje mají stator s rozloženým vinutím uloženým v drážkách. Pokud se statorovým obvodem uzavírá střídavý magnetický tok, musí být složen z dynamových plechů.



Obr. 1 Fotodokumentace zobrazující rotor a stator komutátorového motoru (Dostupné na: <http://fyzweb.cz/clanky/img/00090/stator-rotor.jpg>)

## KOMUTÁTOR

Komutátor je mechanický usměrňovač sloužící k tomu, aby se neustále měnil S a J pól (jinak by se motor neotáčel a zastavil by se v neutrální poloze). Je tvořen měděnými lamelami navzájem izolovanými. Na tyto lamely je pomocí sběracích kartáčů připojeno budicí vinutí.



Obr. 2 Schematická konstrukce komutátoru (Dostupné na: [http://elektrika.cz/Members/mirek/komutator\\_prsl.jpg](http://elektrika.cz/Members/mirek/komutator_prsl.jpg))

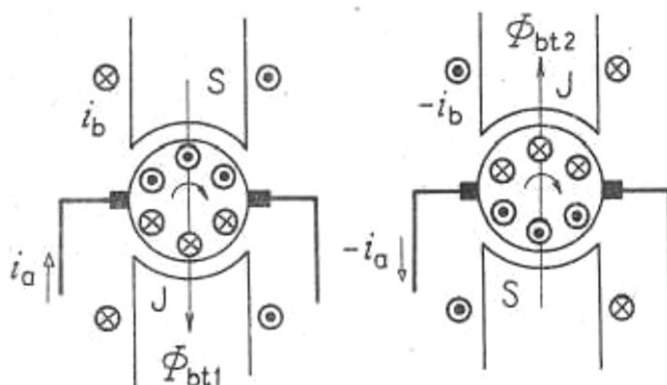
## ELEKTRONICKÝ KOMUTÁTOR

Vzhledem k jiskření a následnému opotřebení lamel se využívá komutátoru elektronického. Pracuje na principu elektronického přepínání jednotlivých cívek. Tato elektronika je řízena na základě Hallova senzoru snímající orientaci magnetického pole.

## POPIS FUNKCE

Pokud je motor napájen SS napětím, u statoru je vytvořen neměnný S a J pól. Na lamely komutátoru je přiveden též SS budicí proud, který ve vinutí právě napájené cívkou vyvolá magnetické pole, jež má S a J pól. Vznikne silové působení mezi rotorem a statorem. S pól je přitahován k J a naopak. Motor se pootočí, též se pootočí komutátor,

přepne se další cívka statoru a vše se opakuje. Pokud by nedošlo k přepnutí, rotor by se zastavil v neutrální poloze (S pól přitažen k J). Pokud motor napájíme ST proudem, tak vinutím statoru a rotoru prochází pokaždé proud jiného směru. Na vinutí rotoru však působí vždy síla stejného směru, protože směr toku proudu a polarita ve vinutí rotoru mění současně (viz obr.). Otáčky regulujeme změnou napětí. [1]



Obr. 3 Schéma funkce komutátorového motoru [1, str. 68]

### MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA

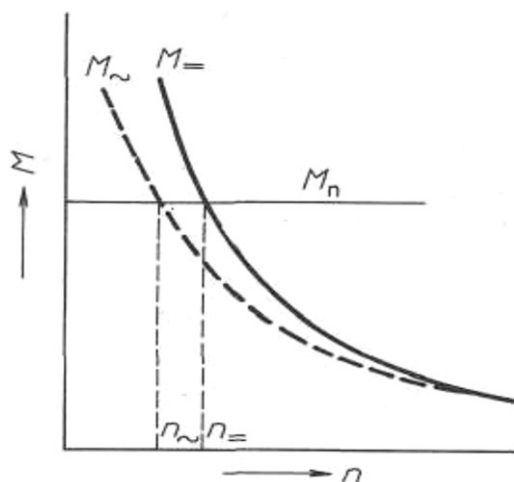
Z momentové charakteristiky je patrný poměrně velký záběrný moment a také to, že otáčky při napájení ST proudem jsou menší, než při napájení SS proudem.

### ROZDĚLENÍ KOMUTÁTOROVÝCH MOTORŮ

Motory lze rozdělit podle mnoha kritérií (konstrukce, typ buzení, napájení atd.). Zde bude uvedeno pouze rozdělení z hlediska buzení.

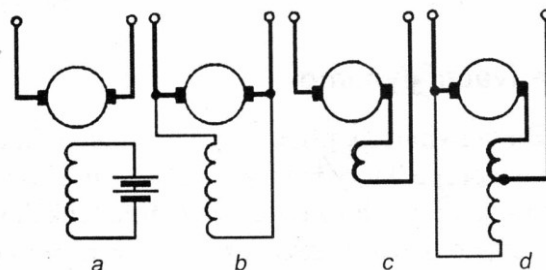
Podle buzení rozeznáváme:

- Stroje s cizím buzením (Obr. 5a) - budící vinutí hlavních pólů je připojeno na samostatný zdroj stejnosměrného proudu, na baterii, usměrňovač nebo budič.



Obr. 4 Dynamická momentová charakteristika [1, str. 69]

- Derivační stroje (Obr. 5b) - magnety jsou připojeny paralelně (čili v derivaci) s kotvou. Při stálém napětí na svorkách je stálé buzení.
- Sériové stroje (Obr. 5c) - budící vinutí je v sérii s kotvou. Budící proud je stejný jako proud v kotvě a buzení je úměrné zatížení stroje. Se zatížením jim roste moment, čehož se využívá např. u trakčních pohonů.
- Kompaundní stroje (sdružené) (Obr. 5d) - mají na magnetech derivační i sériové cívky. Svými vlastnostmi se blíží derivačním nebo sériovým strojům podle toho, které budící vinutí převládá. [2, str. 311]



Obr. 5 Schéma buzení a) stroj s cizím buzením, b) derivační stroj, c) sériový stroj, d) kompaundní stroj [2]

## BLDC MOTORY

V současné době se začínají čím dál tím více využívat BLDC motory = motory s elektronickou komutací. Zkratka BLDC = BrushLess DC Motor, používá se i označení BL motor nebo ECM = Electronically Commutated Motor, nebo jen EC motor. [10]

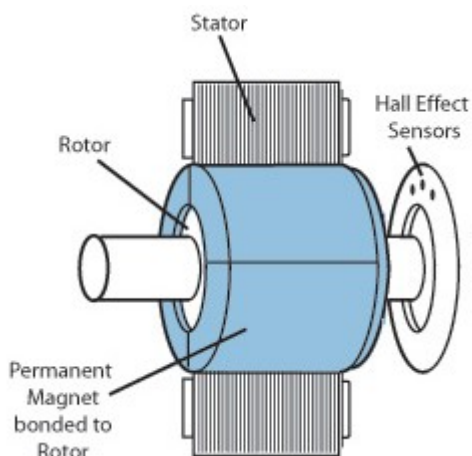
BLDC motory se vyřešil jeden zásadní problém charakteristický pro komutátorové motory. Tím je jiskření. Komutace je u BLDC strojů řešena tzv. elektronickou komutací - součástí je elektronická jednotka, často integrovaná do konstrukce motoru, která řídí napájení jednotlivých cívek statoru.

## KONSTRUKCE

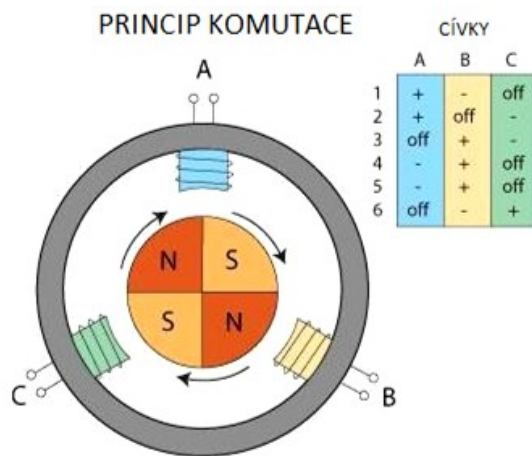
S konstrukcí mechanického komutátoru zde není žádná spojitost. Uspořádání pevných a rotujících částí BLDC motoru je vzhledem ke komutátorovému motoru obrácené. U tradičního komutátorového stroje je budící vinutí statoru pevný, rotuje vinutí napájené přes kartáče a komutátor - rotor. Motor BLDC má pevné vinutí statoru a rotuje budič, obvykle osazený permanentními magnety.

## POPIS FUNKCE

Elektronická jednotka motoru přepíná jednotlivá vinutí statoru (nahrazuje mechanický komutátor) v závislosti na požadovaných vlastnostech motoru. Informace od zpětné vazby se zpracuje v mikroprocesoru, kde se následně vygenerují data pro spínání výkonových FET tranzistorů. U malých strojů se nejčastěji používají Hallové sondy indikující úhlové natočení rotoru. Elektronická jednotka řízená mikroprocesorem umožňuje kromě regulace otáček také ochranu proti přehřátí, přetížení a přepólování.



Obr. 6 Schéma rozmístění dílů BLDC motoru (Dostupné na: **Chyba! Odkaz není platný.**)



Obr. 7 Schéma znázorňující funkci BLDC motru (Dostupné na: [http://dev.emcelettronica.com/files/u4/Brushless\\_DC\\_Motors\\_bldc\\_motor.jpg](http://dev.emcelettronica.com/files/u4/Brushless_DC_Motors_bldc_motor.jpg))

## VYUŽITÍ

BLDC motory jsou využitelné všude tam, kde je napájecí napětí stejnosměrné. Jsou to např. akumulátorové přepravní a zvedací vozíky v průmyslu, zemědělská mobilní technika, akumulátorové nářadí, dopravní prostředky všech druhů, manipulační a pohonné agregáty v trakci, armádní a letecké pohonné systémy a mnoho dalších. Spousta příležitostí na využití motorů BLDC teprve čeká. Mají velmi dobrou účinnost především ve srovnání s indukčními motory.

# Elektromotor DB22

V rámci naší práce nám byl od společnosti Progredior Kybernetés s.r.o. zapůjčen elektromotor DB22 36V00406F0131, který má následující parametry:

- komutátorový motor
- vinutí na rotoru
- stator osazen 10 neodymovými magnety
- 250 W
- 36 V
- 7 A
- 36 2mm drátů výpletu ráfku
- ráfek 18"
- rozteč pro vidlici 140 až 170 mm
- průměr osy 12 mm
- tichý běh
- klade minimální odpor při vypnutém stavu – pouze magnetický odpor
- motor je v duralovém pouzdru
- 39 pólů vinutí

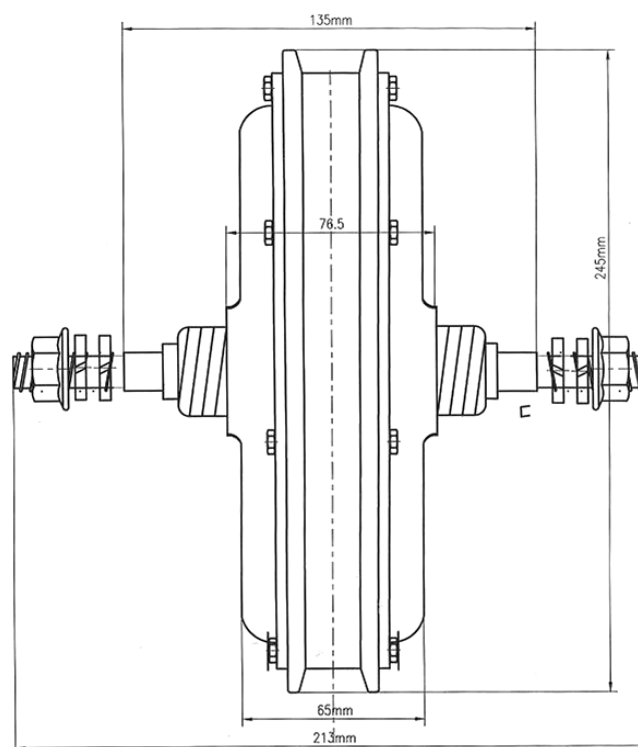
Tento typ pomocného motoru neobsahuje žádnou převodovku, je tedy připojen přímo na kolo. Vezmeme-li v úvahu nominální výkon 250 W je zřejmé, že se jedná pouze o pomocný motor, který ulehčí jízdu na kole.

Z momentové charakteristiky komutátorových motorů je patrný vysoký moment při nízkých otáčkách, který exponenciálně klesá s rostoucími otáčkami. Zřejmá aplikace je v oblastech kde je nutný vysoký rozběhový moment, což koresponduje s aplikací v dopravě.

Z konstrukčního hlediska se jedná o poměrně levnou variantu motoru, sestávající ze 4 dílů. Stator s uhlíky, magnety a hřídelí pro montáž, rotor s vinutím a ráfkem, a 2 krycí dekly s ložisky pro hřídel. Sestava drží pohromadě tak, že ložiska v deklech přišroubovaných k statoru vymezují prostor rotoru. Již při prvním rozebrání byl rotor zoxidován a je vidět nekvalitní strojní obrábění.

Poměrně zajímavý je fakt velmi špatné dostupnosti tohoto čínského produktu na českém trhu, i přes to, že je to nejlevnější pohon v kole. Cena pohonu je poloviční oproti BLDC motoru. První testy neukázali žádné problémy kterými by mohl motor trpět jako zadření ložisek, hoření vinutí nebo přesycení magnetického obvodu.

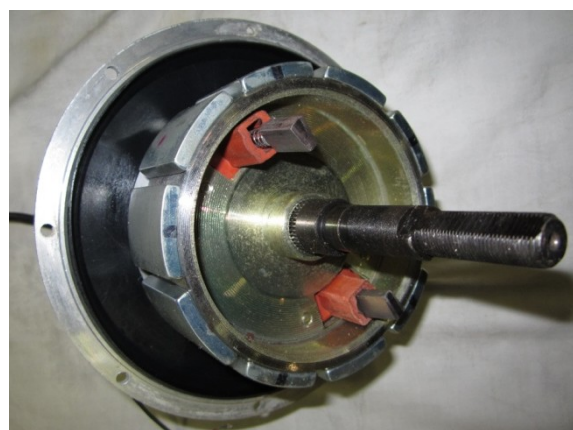
Důležitým krokem je podrobné změření dynamické momentové charakteristiky a nalezení rezonančního kmitočtu.



Obr. 8 Výkres motru DB22 36V00406F0131



Obr. 9 Rozebraný motor DB22 36V00406F0131



Obr. 10 Detail statoru rozebraného motoru DB22 36V00406F0131

# Realizace EPAC

Zkratka EPAC je z anglického Electrically Power Assistent Cycles a označuje kolo s pomocným elektrickým motorem, obecně známé jako elektrokolo. V legislativě EU jsou jednoznačná pravidla (Evropská norma EN 15194), která vymezují motory takto:

- jmenovitý výkon motoru je maximálně 250W
- motor je aktivován pouze při šlapání na pedály, případně otočným akcelerátorem do rychlosti 25 km/h
- motor musí být odpojen, jakmile jsou použity brzdy
- maximální napětí systému (baterie, řídicí jednotka, motor) je 48V
- maximální váha elektrokola je 40 kg
- všechny elektronické součásti kola musí být testovány na odolnost proti nárazu, mechanickému opotřebením a elektromagnetickou kompatibilitu
- motorová pomoc je asistovaná - což znamená, že by kolo nemělo jet samo bez šlapání

Na trhu se prodávají jak hotová EPAC tak sady na předělání běžného kola na EPAC. Naším cílem je pokusit se zjistit skutečnou finanční náročnost realizace EPAC, tedy kdybychom kolo postavili sami.

Popisovaný motor splňuje směrnice EU a je vhodný k našemu pokusu. Jako první krok jsme museli najít vhodné kolo, které by umožňovalo instalaci tohoto kola. Delším laborováním jsme našli jeden velice známý druh kola, které je k tomuto přímo předurčeno. Skládací kolo Kenzel s velikostí kol 20 palců:

- rám/frame 20" skládačka
- vidlice/fork 20" ocelová/steel
- hlavové uložení/head set CC800 černé/black, ocel/steel
- středové uložení/ bottom bracket CC-882/N5P
- přední náboj/front hub Steel, 36 Holes SF01-F
- zadní náboj/freehub Torpedo; 36 Holes, 20T pastorek
- ráfky/rims Kenzel Aero Double Wall 406-25 N
- pláště/tires Kenda 20x1,75
- podložná vložka/rim tape 20" Herrmans
- řetěz/chain KMC Z410 (1,1 m; 1/2x1/8 metráž)
- kazeta/freewheel 20T pastorek
- brzdy/brakes přední/front: Gilong "V" plast
- pedály/pedals MTB plast FP-806
- osvětlení/light Dansi
- dynamo Dansi
- nosič/carrier 20" Dubany
- převodník s klikami/crank set Detai CTS2 oce/steel 40Tx152mm bez krytu/without chain cover.



Obr. 11 Ilustrační obrázek kola Kenzel

Ráfky kola mají průměr 20 palců a ráfky na DB22 mají 18 palců. Tento rozdíl je zanedbatelný a umožňuje použití kola s motorem pro skládačku. Problém nastal při pokusu montáže kola, kdy jsme zjistili, že je vidlice zadního kola příliš blízko u sebe, respektive u zmiňovaného modelu se tato komplikace nevyskytuje ale u našeho (v garáži nalezeného kola) je tento nedostatek závažný. Pokusili jsme se vidlici upravit, ale selhali jsme při svařování konstrukce.

Dočasně jsme ustoupili od realizace a udělali jsme finanční analýzu:

- motor 2007,- Kč [3]
- plášť 145,- Kč [4]
- Skládací kolo Kenzel CAMPING 4320,- Kč [5]
- Řídicí jednotka ALLEGRO MICROSYSTEMS A3986SLD-T 58,- Kč [6]
- Akumulátory 3x 12 V 12 Ah 3x 912,- Kč, 1x 6 V 12 Ah 464,- Kč o celkové hmotnosti  $3 \times 3,93 + 1,75 = 13,54$  kg [7]
- Ostatní elektronika (DPS a vypínače) 300,- Kč
- Celkové náklady jsou 10030,- Kč
- Koupené elektrokolo CITY NEW se srovnatelnou kapacitou akumulátorů a se stejným výkonem motoru stojí 18140,- Kč [8]
- Kompletní set (stejný výkon a 10 Ah kapacita akumulátorů) pro předělání kola stojí 12230,- Kč. Tento set navíc obsahuje LiOn akumulátory, které jsou znatelně lehčí a celý set váží pouze 8,3 kg. [9]

Závěr je zřejmý! **Domácí předělávání kola na elektrokolo se vyplatí při koupi kompletního setu.**



## Rekonstrukce elektromotoru DB22

V partnerské firmě řešili otázku pohonů pro kolový podvozek RAEDAR1 použitím hybridních dvoufázových krokových motorů řady SX34. Volba krokových motorů byla z důvodu velmi přesného řízení a vysokých momentů při rozjezdu podvozku. Problematika řízení krokových motorů je kapitola sama o sobě a po konzultaci se zástupcem firmy můžeme konstatovat:

- Krokové motory mají velmi vysoké momenty při nízkých otáčkách.
- S rostoucí rychlostí otáčení klesají momenty a rostou požadavky na řídicí modul, generující signály pro vinutí. Problematika momentové charakteristiky je o to složitější, že při rozběhu se musí rychlost měnit plynule (respektive start-stop a kontrolované zrychlení) aby nedošlo ke ztrátě kroku.
- Řídicí elektronika musí při změně otáček motorů brát v zřetel rezonanční vlastnosti motoru. Každý krokový motor má rezonanční bod. Je to dáno způsobem vykonání kroku, kdy rotor vždy osciluje, než se ustálí v nové poloze. Pokud se frekvence kroků bude blížit frekvenci vznikající oscilací, dostane se motor do rezonance a bude hlasitě vibrovat, přeskakovat a ztrácet kroky. Rezananční frekvence závisí na momentové tuhosti a momentu setrvačnosti. Pokud by elektronika tento fakt ignorovala, vypadne motor ze synchronu (ztráta synchronizace).
- Při řízení výkonu motorů je využito PWM modulace která ovšem značně ovlivňuje momentové i rezonanční charakteristiky motoru.

Je zřejmé, že řízení krokových motorů v aplikaci kdy se využívá širokého rozsahu rychlostí a různých momentů je dost složitá záležitost. Z tohoto důvodu chce Progredior Kybernetés vyrobit levnější verzi podvozku využívající popisovaných motorů. Vzhledem k maximálním momentovým požadavkům postačí instalace 2 motorů, na rozdíl od 4 krokových motorů, kterých využívá aktuální verze kolového podvozku RAEDAR1.

Naším úkolem bylo optimalizovat motor tak, aby se dal použít jako kolo pro podvozek v provedení do interiéru a exteriéru. V prvním kroku jsme odstranili loukotě. Dále jsme se rozhodli využít takto vzniklého ráfku k instalaci pneumatiky nebo jiného vibrace tlumícího materiálu. Průměr disku kola je 22 cm, vyhledali jsme kolo s nejpodobnějším vnitřním průměrem (průměr 22 je běžně používán u kočárků), odstranili jsme ráfek a kolo s duší natáhli na ráfek s motorem. Takto vznikla verze kola s dobrým tlumením vibrací a vysokým koeficientem tření pro terénní využití. Druhá varianta, určená do vnitřních prostor je konstruována tak, že na ráfek kola je namotán gumový plát. Zásadní rozdíl mezi takto vyrobenými koly je v tom, že verze s gumovým plátem má menší průměr, tedy dokáže při stejném momentu vytvořit větší silové působení na podložku a tak získá podvozek vyšší akceleraci nebo dokáže uvést větší zátěž. Nevýhodou je nízká světlost podvozku, která však není pro aplikace v halách a jiných interiérech problémem.



Obr. 12 HM22-OUT1 motor v provedení pro terénní aplikace



Obr. 13 HM22-IN1 motor v provedení pro použití ve vnitřních prostorách

# Seznam bibliografických citací

- [1] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechnika*. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2002, 561 s. ISBN 80-86706-00-1.
- [2] NEBORÁK, I., SLÁDEČEK, V. *Elektrické ohony*. Vyd. 1. VŠB, 2008, 129 s. ISBN 8024814935, 9788024814933.
- [3] *benzinovekolobezky.cz* [online]. [cit. 2013-01-11]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.benzinovekolobezky.cz/domu/motor-do-elektrokola-36v-dc-250w>>.
- [4] *detska-kola.net* [online]. [cit. 2013-01-11]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.detska-kola.net/produkt/rubena-plast-rubena-18-x-1-75-648>>.
- [5] *e-cyklo.cz* [online]. [cit. 2013-01-11]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.e-cyklo.cz/skladaci-kolo-kenzel-camping-bila-2011-detail-146-produktu-3511.html>>.
- [6] *tme.eu* [online]. [cit. 2013-01-11]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.tme.eu/cz/details/a3986sld-t/drivery-motorove-a-pwm/allegro-microsystems/>>.
- [7] *avacom.cz* [online]. [cit. 2013-01-11]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.avacom.cz/haze-12v-12ah-oloveny-akumulator-f2>>.
- [8] *benzinovekolobezky.cz* [online]. [cit. 2013-01-11]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.benzinovekolobezky.cz/domu/elektrokolo-city-new>>.
- [9] *kolazhradce.cz* [online]. [cit. 2013-01-11]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.kolazhradce.cz/prestavba-na-elektro/elektropohony-aku/konverzni-kit-250w-10ah-li-ion-frog-aku>>.
- [10] *Brushless DC electric motor* [online], poslední aktualizace 9. září 2010 22:46 [cit. 2013-01-11], Wikipedie. Dostupné na World Wide Web: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Brushless\\_DC\\_electric\\_motor](http://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor)>