

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T001 Dopravní a manipulační technika

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh laboratorního experimentu pro demonstraci KERS

Autor: **Bc. Jakub KROLL**

Vedoucí práce: **Ing. Roman ČERMÁK Ph.D.**

Akademický rok 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub KROLL**
Osobní číslo: **S10N0009P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**
Název tématu: **Návrh laboratorního experimentu pro demonstraci KERS**
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Proveďte rešerši používaných principů. Vypracujte varianty konstrukčního řešení laboratorního experimentu. Proveďte potřebné výpočty. Zpracujte konstrukční návrh vybrané varianty. Navrhněte rámcově způsob akvizice dat a řízení experimentu.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Specifikace požadavků, rešerše používaných principů
2. Varianty konstrukčního řešení
3. Konstrukční návrh experimentu
4. Návrh způsobu akvizice dat a řízení experimentu

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **50-70 stran A4**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

RAJAMANI, R. *Vehicle Dynamics and Control*. New York: Springer-Verlag, 2006

GUZZELA, L., SCIARRETTA, A. *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimisation*. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2007

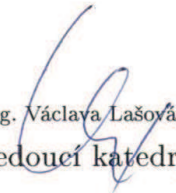
Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Čermák, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů
Konzultant diplomové práce: **Ing. Petr Barták**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání diplomové práce: **24. září 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2013**


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 24. září 2012

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kroll	Jméno Jakub		
STUDIJNÍ OBOR	2301T001 „Dopravní a manipulační technika“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Čermák Ph.D.	Jméno Roman		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Návrh laboratorního experimentu pro demonstraci KERS			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	84	TEXTOVÁ ČÁST	57	GRAFICKÁ ČÁST	27
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Diplomová práce obsahuje energetickou bilanci s ověřením potenciálu systému KERS. Dále je zpracována rešerše používaných principů s hodnocením jejich kladů a záporů. Praktická část popisuje konstrukční návrh mechanické baterie s výpočty a výkresovou dokumentací. V závěru práce je rámcový návrh řízení experimentu.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>KERS, rekuperace energie, snížení spotřeby paliva, mechanická baterie, setrvačnick, magnetická ložiska, frameless motor, motor-generátor, ukládání energie, hybridní pohon</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Kroll	Name Jakub	
FIELD OF STUDY	2301T001 “Transport and handling machinery“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Čermák Ph.D.	Name Roman	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of laboratory experiment for KERS demonstration		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	84	TEXT PART	57	GRAPHICAL PART	27
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This Diploma thesis includes an energetic balance with the verification of the KERS system potential. Further, the background research of the used principles is compiled, including the evaluation of their positives and negatives. The project of the mechanical battery, calculations and drawing documentation are described in the practical part of this thesis. The general proposal on the experiment control is included in the final part of the thesis.</p>
KEY WORDS	<p>KERS, energy recovery, reduction in consumption, mechanical battery, flywheel, magnetic bearings, frameless motor, motor-generator, energy storage, hybrid drive</p>

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu panu Ing. Romanu Čermákovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a motivující přístup. Všem, co mi při psaní této diplomové práce pomáhali. A také mojí rodině za podporu při studiu.

Obsah

1	Úvod.....	3
1.1	Energetická bilance.....	4
1.1.1	Jízdní odpory silničních vozidel.....	4
1.1.2	Příklad na konkrétním vozidle	6
1.1.3	Jízdní cykly	9
2	Typy systémů KERS	11
2.1	Elektrické systémy.....	11
2.1.1	S chemickou baterií.....	11
2.1.2	Se superkapacitory	12
2.1.3	S mechanickou baterií	13
2.2	Neelektrické systémy.....	13
2.2.1	Se zkrutnou pružinou	13
2.2.2	Se setrvačnickem.....	14
2.2.3	Pneumatický	14
2.2.4	Hydropneumatický	15
3	Konkrétní aplikace	16
3.1	Systémy KERS s bateriemi nebo superkapacitory	16
3.2	Systém KERS se setrvačnickem.....	19
3.3	Systém KERS s mechanickou baterií	22
3.4	Hydropneumatický systém	24
4	Varianty konstrukčních řešení pro demonstrátor	25
4.1	Schéma demonstrátoru	25
4.2	Varianty baterie	25
4.2.1	Chemické baterie.....	25
4.2.2	Superkapacitory.....	25
4.2.3	Mechanické baterie	25
4.3	Varianty simulátoru jízdních režimů.....	25
5	Konstrukční návrh experimentu	28
5.1	Konstrukční varianty mechanické baterie	28
5.1.1	Varianty koncepce uložení setrvačnicku.....	28
5.1.2	Varianty ložisek.....	30
5.1.3	Varianty setrvačnicku	31
5.1.4	Varianty motor-generátoru	32
5.1.5	Varianty spojení motor-generátoru s hřídelí setrvačnicku.....	32
5.1.6	Frameless motor-generátor.....	33
5.2	Dimenzování a konkrétní návrh součástí baterie.....	34
5.2.1	Specifikace požadavků.....	34
5.2.2	Radiální ložiska	34
5.2.3	Záchytná ložiska.....	35
5.2.4	Sestava domku radiálních a záchytných ložisek	36
5.2.5	Motor-generátor	37
5.2.6	Sestava domku motor-generátoru.....	39
5.2.7	Hřídel rotoru baterie	40
5.2.8	Setrvačnick rotoru baterie	40
5.2.9	Sestava rotoru baterie	41
5.2.10	Axiální ložiska.....	44

5.2.11	Sestava domku axiálního ložiska	47
5.2.12	Sestava rámu	47
5.2.13	Sestava baterie.....	48
5.3	Simulátor jízdních podmínek.....	50
6	Návrh způsobu akvizice dat a řízení experimentu	51
7	Předpokládané pořizovací náklady.....	55
8	Závěr.....	56
9	Použitá literatura.	57

Přílohy

- 1 Dokumentace k motor-generátoru
- 2 Výkresová dokumentace mechanické baterie

1 Úvod

V dnešní době stále zhoršujícího se ovzduší ve městech vlivem nadměrné automobilové dopravy snižujícího se množství fosilních paliv spolu s růstem jejich ceny, zákazníci žádají od výrobců vozidla s co nejnižší spotřebou a stále zpřísnující se normy nařizují čím dál nižší hodnoty emisí vypouštěných s výfukovými plyny do ovzduší. Proto přicházejí automobilky s různými řešeními, jak ušetřit palivo a snížit emise. Jedním ze způsobů, který už našel i své praktické využití při automobilových okruhových závodech a vozech doručovací služby je systém KERS.



Obr. 1.1 – Smog v Peking [22]

Systém KERS (Kinetic Energy Recovery System) umožňuje uchovat energii, která musela být přivedena dopravnímu prostředku, aby se uvedl do pohybu požadovanou rychlostí. Jedná se tedy o energii, která překonává odpor proti zrychlení. Tuto energii zmenšenou o ostatní jízdní odpory je při zpomalování nutno dopravnímu prostředku odebrat. V běžných případech, kromě kolejových vozidel elektrické trakce, se tak děje pomocí brzd nebo retardérů, kde se kinetická energie mění v tepelnou energii, a kterou nelze již dále využít. Naopak teplo musí být ještě odváděno, což s sebou nese další nevýhody například zhoršení aerodynamiky kvůli nutnosti přívodu chladícího vzduchu k brzdám. Při dalším zrychlování musí být dodáno stejné množství mechanické energie, jaké bylo právě znehodnoceno v brzdách. V systému KERS je však možné minimálně část této energie uchovat. Při dalším zrychlování tedy bude potřeba přivést další energii zmenšenou o energii uloženou.

Cílem této práce bude vytvoření laboratorního modelu systému KERS, na kterém bude možné demonstrovat princip technologie a provádět měření spojená s výukou, případně s výzkumem. Za tímto účelem bude vyhodnocena energetická bilance pro ověření významu a reálné výhodnosti systému KERS. Bude provedena rešerše možných variant ukládání energie a konstrukčních řešení, návrh a rozpracování laboratorního zařízení a vytvoření dokumentace k realizaci zařízení a návrh koncepce řízení experimentu.

1.1 Energetická bilance

V této podkapitole jsou popsány jízdní odpory, tak jak jsou uvedeny v [6]

1.1.1 Jízdní odpory silničních vozidel

Jsou to síly, které působí na vozidlo. Některé působí vždy proti pohybu vozidla, některé mohou pohyb vozidla za určitých podmínek i vyvolávat.

Vozidlu musí být přiváděno takové množství energie, aby překonalo všechny jízdní odpory.

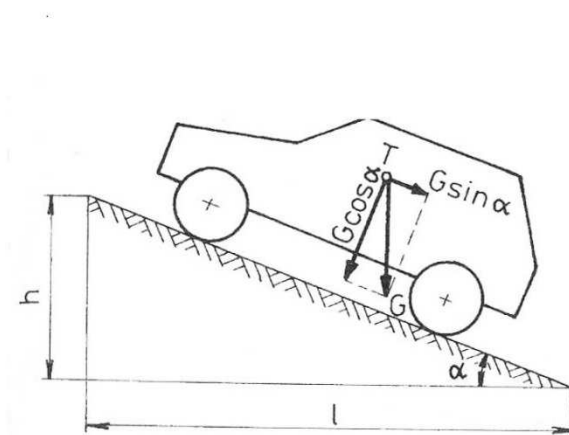
Valivý odpor

Valivý odpor působí vždy proti pohybu vozidla. Je vyvolán deformací vozovky a pneumatiky, v případě dostatečně tvrdé vozovky jen deformací pneumatiky. Velikost valivého odporu závisí na druhu a stavu povrchu vozovky a druhu a stavu pneumatiky. Zejména tlak vzduchu v pneumatikách má významný vliv.

Vztah pro valivý odpor:

$$F_f = m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot f$$

Kde $m[\text{kg}]$ je hmotnost vozidla, $g[\text{ms}^{-2}]$ gravitační zrychlení, $\alpha[^\circ]$ úhel stoupání, $f[1]$ součinitel valivého odporu. Pokud mají všechna kola stejný valivý odpor $f=f_k$.



Obr. 1.2 – Tíhové síly [6]

Součinitel valivého odporu pro pneumatiku se liší podle druhu a stavu vozovky, jak uvádí tabulka 1.1.

Tab. 1.1 – Hodnoty součinitele f_k [6]

Povrch	f_k	Povrch	f_k
Asfalt	0,01 – 0,02	Travnatý terén	0,081 – 0,015
Beton	0,015 – 0,025	Hluboký písek	0,15 – 0,30
Dlažba	0,02 – 0,03	Čerstvý sníh	0,20 – 0,30
Polní cesta - suchá	0,04 – 0,15	Bahnitá půda	0,20 – 0,40
Polní cesta - mokrá	0,08 – 0,20	Náledí	0,01 – 0,025

Odpor vzduchu

Odpor vzduchu působí zpravidla vždy proti pohybu vozidla. Je vyvolán vzduchem obtékajícím vozidlo. Skládá se z tlakových a třecích sil.

Vztah pro odpor vzduchu:

$$F_v = c_x \cdot S_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2$$

Kde $c_x[-]$ součinitel odporu vzduchu, $S_x[m^2]$ čelní plocha vozidla, $\rho[kg/m^3]$ hustota vzduchu, $v_r[m/s]$ vektorový součet rychlosti vozidla a rychlosti větru.



Obr. 1.3 – Určení čelní plochy vozidla [6]

Odpor stoupání

Je vyvolán složkou tíhy vozidla rovnoběžnou s povrchem vozovky, jak je znázorněno na obrázku 1.2.

Vztah pro odpor stoupání:

$$F_s = \pm m \cdot g \cdot \sin \alpha$$

Kde $m[kg]$ je hmotnost vozidla, $g[ms^{-2}]$ gravitační zrychlení, $\alpha[^\circ]$ úhel stoupání.

Odpor zrychlení

Je vyvolán setrvačností vozidla, která působí silou opačným směrem než je změna rychlosti, k tomu se zohledňuje vliv setrvačnosti rotačních částí.

Vztah pro odpor zrychlení:

$$F_z = \vartheta \cdot m \cdot a$$

Kde $m[kg]$ je hmotnost vozidla, $a[ms^{-2}]$ zrychlení vozidla, $\vartheta[-]$ součinitel vlivu rotačních částí.

Součinitel vlivu rotačních částí závisí na zařazeném převodovém stupni a pohybuje se od 1,05 pro 4. převodový stupeň do 1,5 pro 1. převodový stupeň.

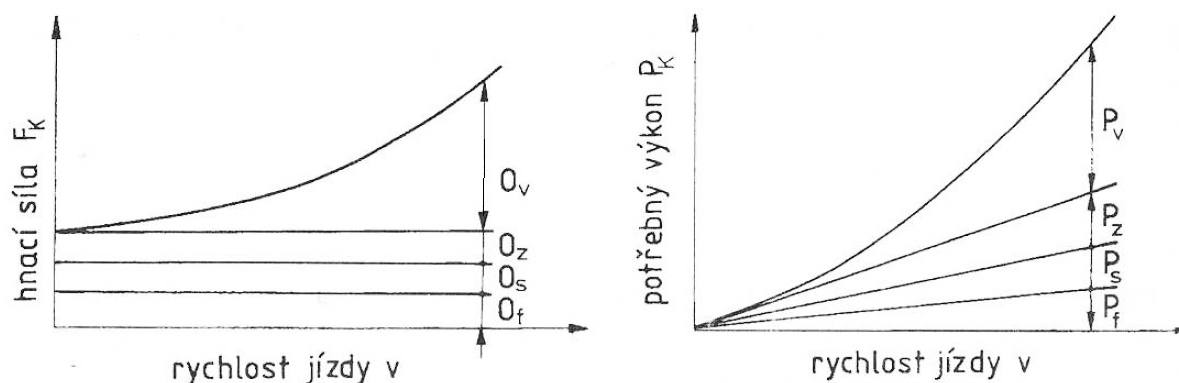
Celkový jízdní odpor

Celkový odpor je součet všech jízdních odporů.

Vztah pro celkový odpor:

$$F_c = F_f + F_v + F_s + F_z$$

Na obrázku 1.4 je vidět průběh odporových sil v závislosti na rychlosti vozidla a tedy průběh potřebné hnací síly a výkonu.



Obr. 1.4 – Graf hnací síly a potřebného výkonu v závislosti na rychlosti [6]

Ze vztahů pro jízdní odpory je patrně, že systém KERS může využít odporu zrychlení při deceleraci a odporu stoupání při jízdě z kopce.

1.1.2 Příklad na konkrétním vozidle

Jako referenční vozidlo byl vybrán automobil nižší třídy Škoda Fabia s motorizací 1,2MPI 51KW

Parametry vozidla [32]:

Pohotovostní hmotnost	1095kg
Max. výkon	51kw
Max. točivý moment	112Nm
Max. rychlost	163km/h
Zrychlení (0-100)km/h	14,9s
Součinitel odporu vzduchu c_x	0,33
Čelní plocha S_x	2m ²

Zde je výpočet práce, jakou musí motor referenčního vozidla vykonat při projetí jednoho cyklu. Cyklus je zjednodušen pouze na jedno stanovené zrychlení, protože pro demonstraci je dostačující.

Parametry cyklu:

Počáteční rychlost v_1	0km/h
Konečná rychlost v_2	100km/h = 27,8m/s
Čas zrychlování t	15s
Stoupání	0°
Rychlost větru	0m/s

Výpočet průměrného zrychlení:

$$a = \frac{v_2}{t} = \frac{27,8}{15} = 1,85 \text{ms}^{-2}$$

Výpočet dráhy, na které vozidlo dosáhne konečné rychlosti v_2 :

$$s = \frac{v_2 \cdot t}{2} = \frac{27,8 \cdot 15}{2} = 209 \text{m}$$

Práce jednotlivý jízdních odporů:

Obecný vztah pro práci

$$w = F \cdot s = [J]$$

Práce odporu valení

$$F_f = m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot f = 1095 \cdot 9,81 \cdot 1 \cdot 0,01 = 107 \text{N}$$

$$W_f = F_f \cdot s = 107 \cdot 209 = 22363 \text{J} = 22,4 \text{kJ}$$

Práce odporu vzduchu

$$F_v = c_x \cdot S_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2$$

$$W_v = c_x \cdot S_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot 2 \cdot \int_{s_1}^{s_2} s \cdot ds = 0,33 \cdot 2 \cdot \frac{1,25}{2} \cdot 2 \cdot \int_0^{209} s \cdot ds$$

$$W_v = 18018 \text{J} = 18,0 \text{kJ}$$

Práce odporu zrychlení

$$F_z = \vartheta \cdot m \cdot a = 1,4 \cdot 1095 \cdot 1,85 = 2836 \text{N}$$

$$W_z = F_z \cdot s = 2836 \cdot 209 = 592724 \text{J} = 593 \text{kJ}$$

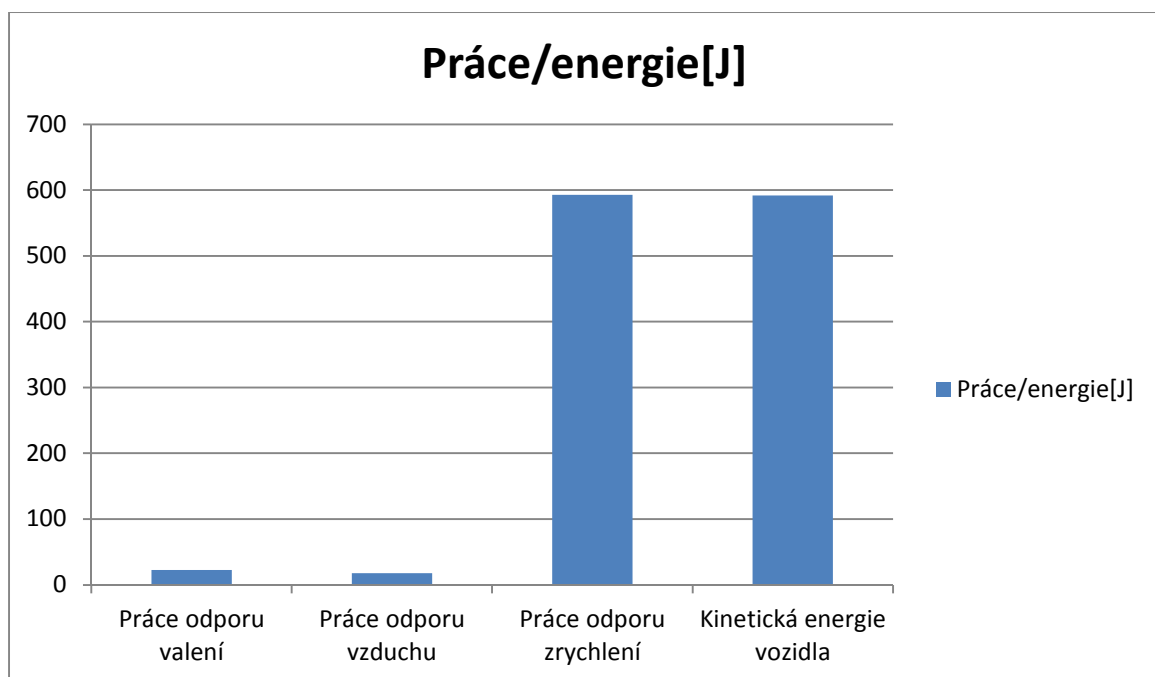
Kinetická energie vozidla

Běžný vzorec pro kinetickou energii je rozšířen o součinitel ϑ zohledňující vliv rotačních částí, protože ty v sobě mohou akumulovat až 50% celkové kinetické energie.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot \vartheta = \frac{1}{2} \cdot 1095 \cdot 27,8^2 \cdot 1,4 = 592381J = 592kJ$$

Je patrné, že podle zákona zachování energie se kinetická energie rovná práci na překonání odporu zrychlení. Drobná odchylka je způsobena zaokrouhlováním.

Z grafu 1.1 zřetelně vidět, že odpor zrychlení představuje největší část práce (v tomto případě 93%), kterou nutnou vozidlu dodat, aby se rozjelo na požadovanou rychlost. Práce na překonání odporu zrychlení se neztratí, tak jako práce na překonání odporu vzduchu a valení, ale přemění se v kinetickou energii vozidla.



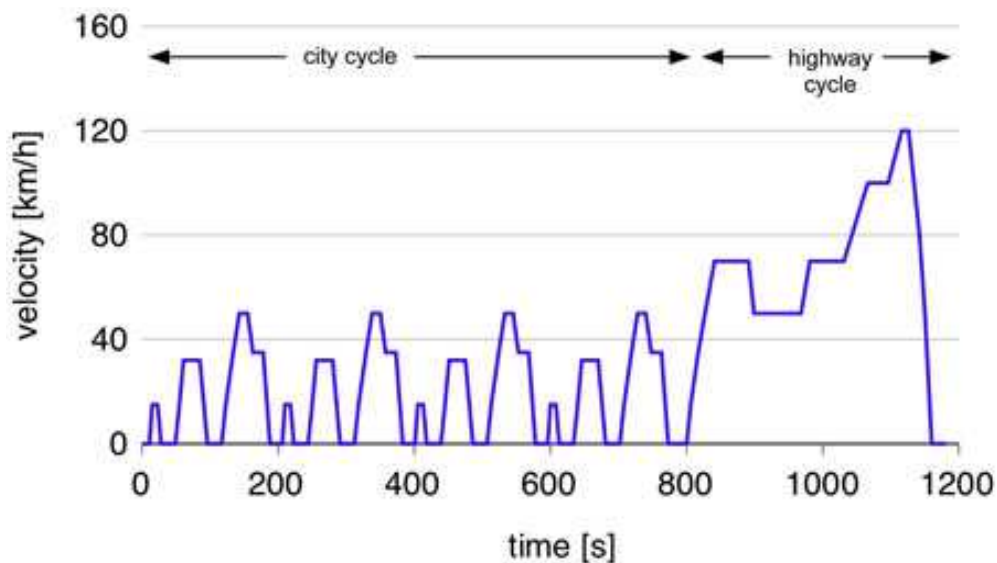
Graf. 1.1 – Práce potřebná na překonání jednotlivých jízdních odporů v porovnání s kinetickou energií vozidla.

Stejně je to i s prací nutnou na překonání odporu stoupání. Pokud se jede do kopce, je vozidlu nutno přivádět energii na překonání odporu stoupání. Jak vozidlo překonává výškový rozdíl, mění se tato energie na energii potenciální. Jelikož se jelo do kopce, musí se také jet z kopce, kdy se potenciální energie mění opět na kinetickou. Jestliže je kopec strmý natolik, že je nutné snížit rychlost vozidla a tím snížit i jeho kinetickou energii, naskytuje se příležitost pro využití systému KERS a přebytečnou energii uchovat pro dobu, kdy bude energie nedostatek.

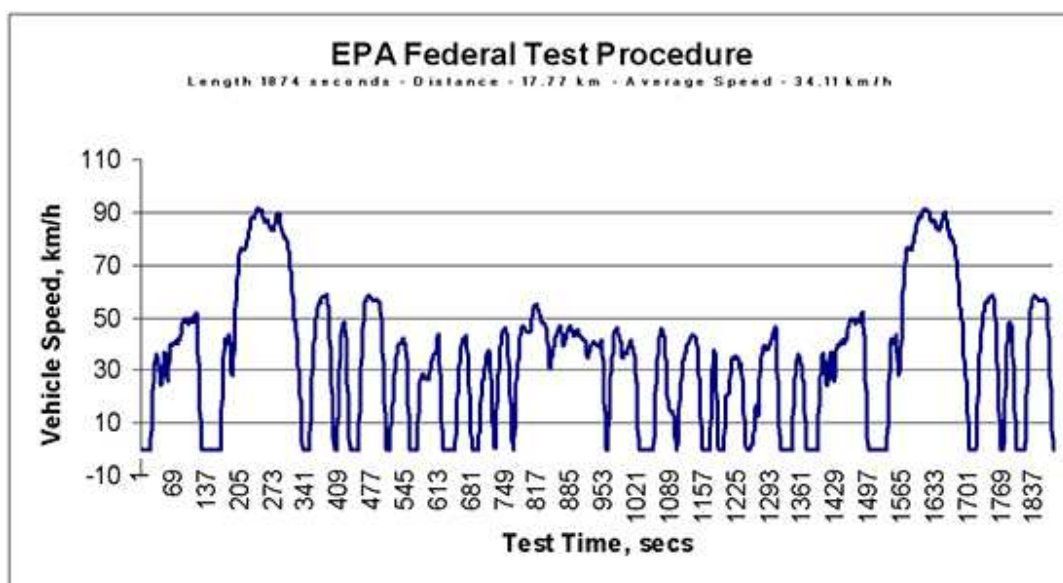
1.1.3 Jízdní cykly

Aby bylo měření množství energie, kterou je nutno dopravnímu prostředku přivést, co nejvíce podobné skutečnému využívání vozidla, stejné pro všechny výrobce a tedy i objektivní, používají se při měření normou stanovené cykly. Cyklů je mnoho typů např. pro město, dálnice, studený nebo ohřátý motor. Podle místa využívání jsou cykly pro Evropu, USA a Kanadu, Japonsko, Austrálii, ... ale i třeba pro New York. Konkrétní příklady pro EU EUDC, NEDC (New European Driving Cycle), pro USA FTP-75 (Federal Test Procedure), pro New York NYCC.

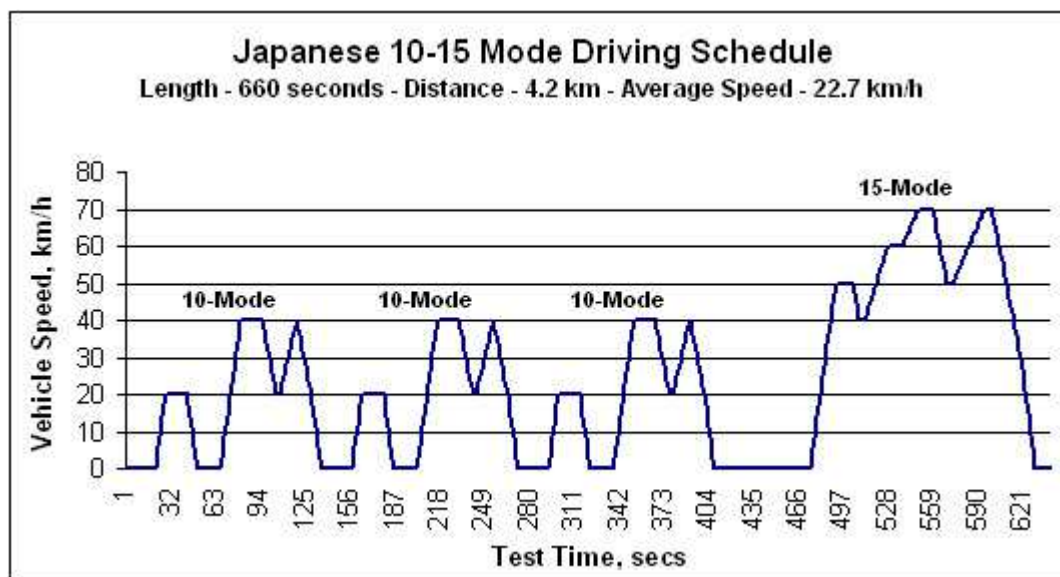
Jak je vidět z obrázků 1.5 až 1.7 potenciál šetření energií, která se v běžně brzdách přemění v teplo, je velký. Hlavně v městském provozu, kdy se často zrychluje a zpomaluje případně na závodním okruhu. Účinnost rekuperace se u jednotlivých systémů KERS liší cca 10-70%.



Obr. 1.5 – Graf jízdního cyklu pro Evropu [25]



Obr. 1.6 – Graf jízdního cyklu pro USA [18]



Obr. 1.7 – Graf jízdního cyklu pro Japonsko [18]

	$\langle v \rangle$ (km/h)	a_{\max} (m/s^2)	K_{\max} (m^2/s^3)
HFEDS	77.6	1.5	31.4
FTP 72	31.4	1.5	38.4
LA 92	39.7	4.0	74.3
NYCC	11.4	2.7	38.8
US 06	77.2	3.8	97.3

Obr. 1.8 – příklad parametrů různých amerických cyklů [20]

2 Typy systémů KERS

V této kapitole je čerpáno z [1]

Systémy KERS lze rozdělit podle principu, který využívají k rekuperaci a uložení energie a jejímu zpětnému vydání.

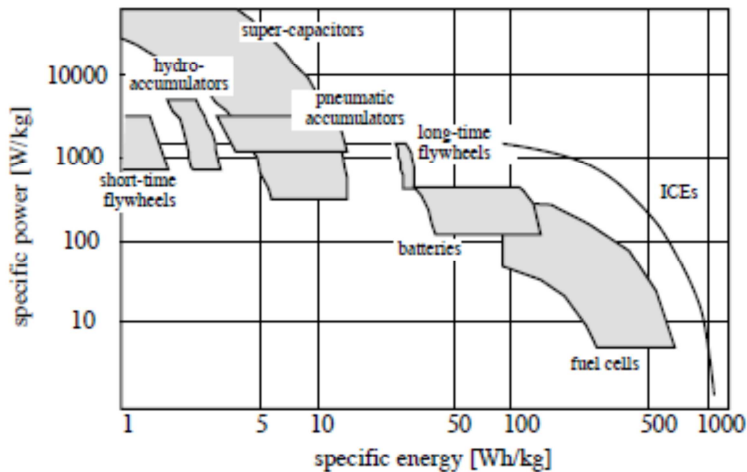


Fig. 5.1. Specific power versus specific energy for various short-term energy storage systems.

Obr. 2.1 – Výkon a kapacita akumulátorů vztažená k jejich hmotnosti. [1]

2.1 Elektrické systémy

2.1.1 S chemickou baterií

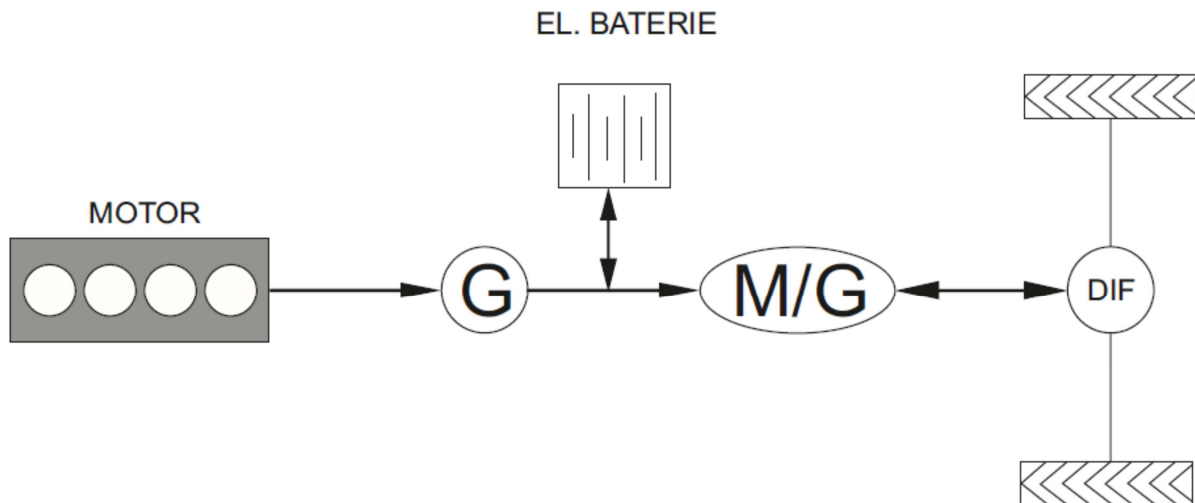
Kinetická energie vozidla se při požadavku na zpomalení mění pomocí generátoru v elektrickou a ukládá se v akumulátorech. Zpětně je využívána pomocí elektromotoru. Elektromotor a generátor mohou být sloučené, tzv. motor-generátor.

Výhody:

- Vysoká kapacita baterie při nízké hmotnosti.
- U elektromobilů snadné provedení s malým množstvím úprav.

Nevýhody:

- Chemické akumulátory začínají ukládat energii až po určitém čase.
- Omezený počet cyklů a životnost.



Obr. 2.2 – Schéma systému KERS s chemickou baterií

2.1.2 Se superkapacitory

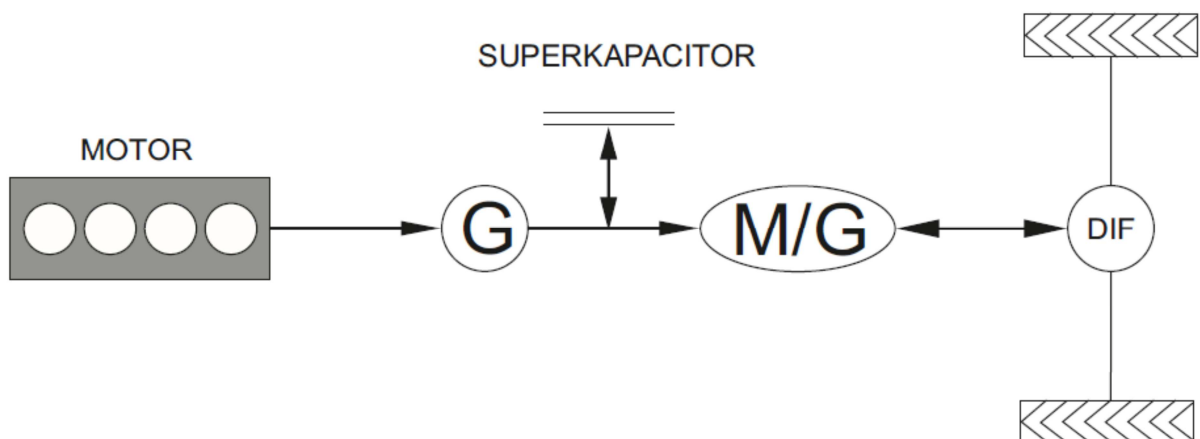
Kinetická energie vozidla se při požadavku na zpomalení mění pomocí generátoru v elektrickou a ukládá se v superkapacitorech. Zpětně je využívána pomocí elektromotoru. Elektromotor a generátor mohou být sloučené, tzv. motor-generátor.

Výhody:

- Superkapacitory oproti chemickým bateriím začínají okamžitě akumulovat rekuperovanou energii

Nevýhody:

- Nižší kapacita při vyšší hmotnosti



Obr. 2.3 – Schéma systému KERS se superkapacitorem

2.1.3 S mechanickou baterií

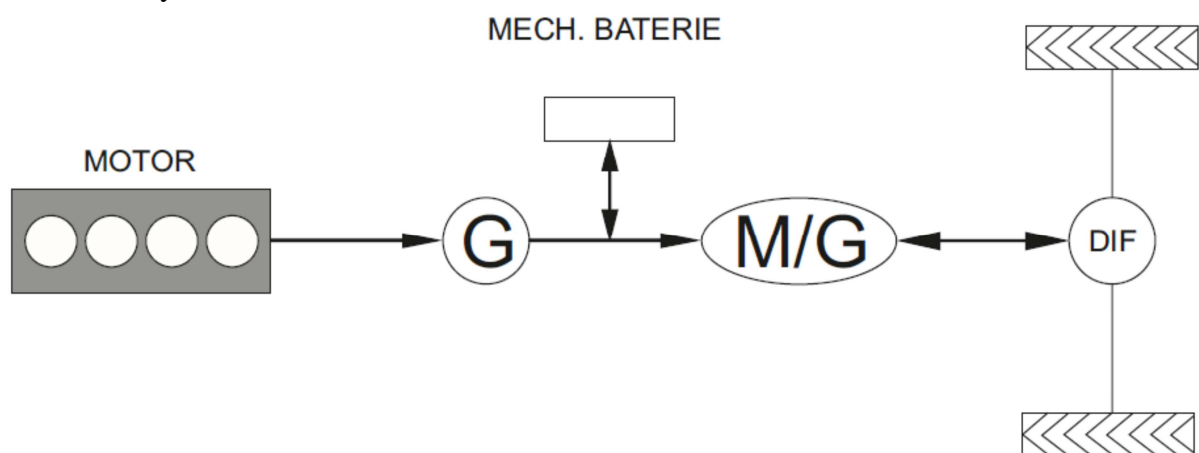
Kinetická energie vozidla se při požadavku na zpomalení mění pomocí generátoru v elektrickou a motor-generátor roztáčí setrvačnick. Zpětně je využívána pomocí motor-generátoru, který přeměňuje kinetickou energii setrvačnicku na elektrickou a pohání jí elektromotor. Motor a generátor jsou zpravidla sloučeny v jeden stroj tzv. motor-generátor.

Výhody:

- Možnost přesného a plynulého odebírání a ukládání energie do setrvačnicku
- Možnost libovolného umístění setrvačnicku ve vozidle

Nevýhody:

- Nižší účinnost
- Vyšší cena



Obr. 2.4 – Schéma systému KERS s mechanickou baterií

2.2 Neelektrické systémy

2.2.1 Se zkrutnou pružinou

Kinetická energie vozidla se při požadavku na brzdění mění pomocí automatické spojky v energii potenciální uloženou ve zkrutné pružině. Zpětně je energie využívána stejnou cestou, jako při ukládání.

Výhody:

- Levné a jednoduché řešení

Nevýhody:

- Použitelné jen pro bicykly a podobná vozidla.

2.2.2 Se setrvačником

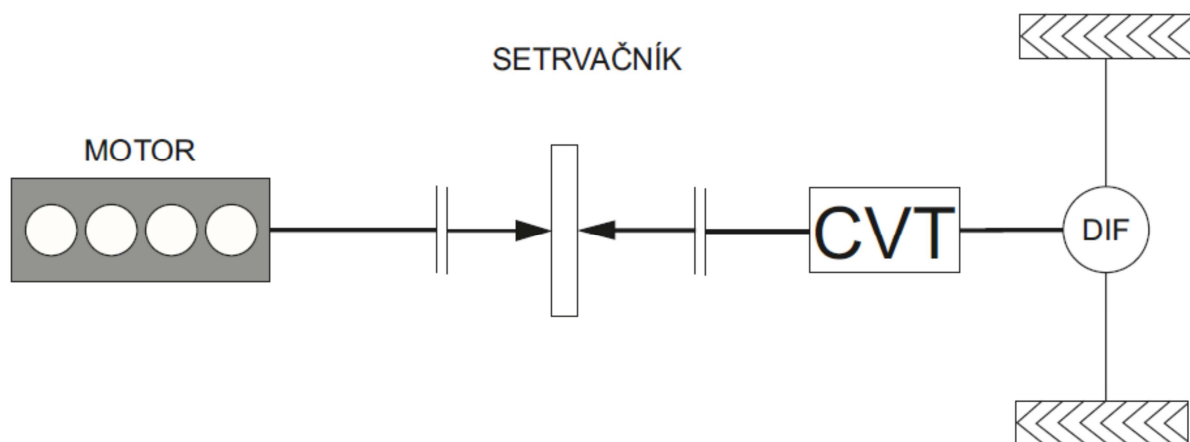
Kinetická energie vozidla se při požadavku na zpomalení mění pomocí automatické spojky a samočinné několikastupňové převodovky nebo variátoru v energii kinetickou rotujícího setrvačnicku. Zpětně je rekuperovaná energie využívána stejnou cestou, jako při ukládání.

Výhody:

- Nízká hmotnost
- Vysoká účinnost

Nevýhody:

- Vysoké výrobní náklady
- Špatná zástavbová variabilita



Obr. 2.5 – Schéma systému KERS se setrvačником.

2.2.3 Pneumatický

Při požadavku na brzdění začne spalovací motor pracovat jako kompresor. Nasává a stlačuje vzduch a uchovává ho v tlakové nádobě. To se děje pomocí speciálního plně regulovatelného ventilu v hlavě motoru. Stlačený vzduch se může využít k přeplynování motoru, když turbodmychadlo nemá dostatečné otáčky nebo motor může fungovat jako dvoudobý motor na stlačený vzduch a jeho krouticí moment se může využít ke startování motoru v režimu START-STOP, případně k rozjezdu, či pohonu vozidla.

Výhody:

- Nízká hmotnost
- Účinnost až 70%

Nevýhody:

- Komplikovaná hlava motoru
- Zástavbový prostor

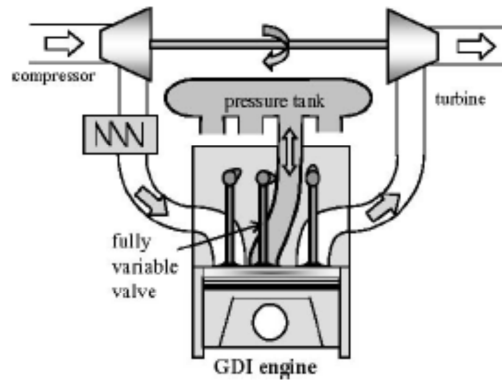


Fig. 5.24. Pneumatic hybrid engine system.

Obr. 2.6 – Schéma systému KERS s pneumatickým principem. [1]

2.2.4 Hydropneumatický

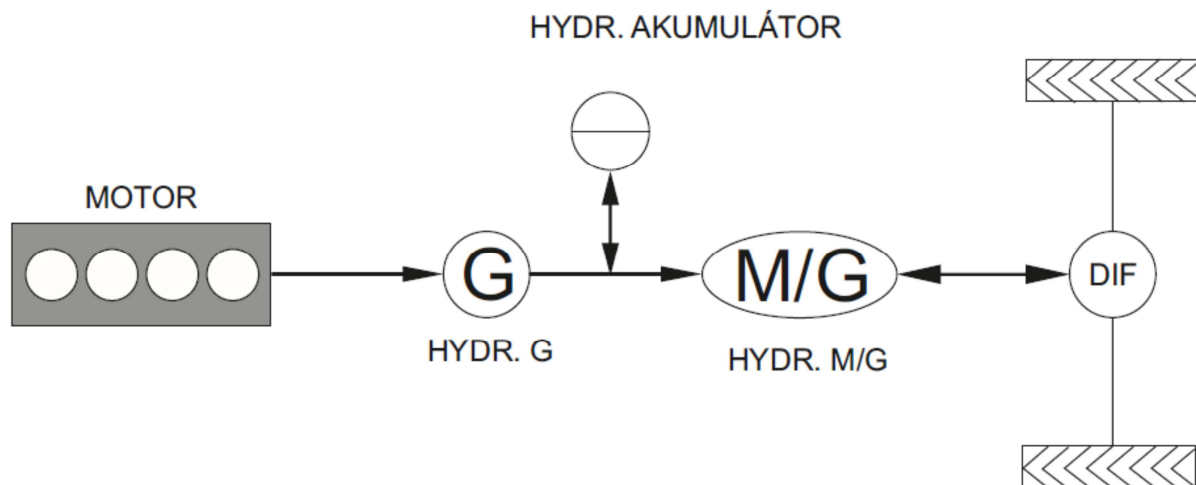
Při brzdění se hydromotor stává hydrogenerátorem a tlačí hydraulické medium do akumulátoru. V akumulátoru je vhodný plyn, který se stlačuje a tím se ukládá potenciální tlaková energie, kterou lze stejnou cestou přeměnit na kinetickou.

Výhody:

- Vysoká účinnost až 70%

Nevýhody:

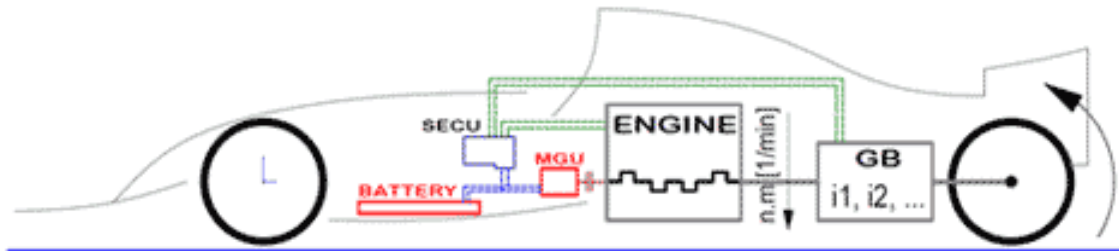
- Nutnost mít hydraulický pohonný systém



Obr. 2.7 – Schéma systému KERS s hydropneumatickým akumulátorem

3 Konkrétní aplikace

3.1 Systémy KERS s bateriemi nebo superkapacitory



Obr. 3.1 – Systém KERS s chemickou baterií nebo kapacitorem. [24]

Tento typ systému KERS je složen z motor-generátoru, řídicí jednotky a baterie nebo superkapacitoru. K hnacímu ústrojí je připojen automatickou spojkou.

Motor-generátor je konstruován tak, aby podal vysoký výkon v krátkém čase. Otáčky motor-generátoru mohou být až 30 000 Ot/min. Aby to bylo možné a nedošlo k poškození je nutné motor-generátor efektivně chladit, proto je zpravidla chlazen kapalinou.

Samotné baterie nedokáží absorbovat špičkový přísun energie dodaný motor-generátorem při zpomalování vozidla. Pro zachycení špičkové energie se využívají superkapacitory, které dokáží energii uchovat a vydrží více nabíjecích a vybíjecích cyklů než baterie. V současné době se vyvíjí kombinace superkapacitoru s bateriemi, která kombinuje výhody obou. Baterie i superkapacitory jsou vysoce tepelně namáhány, proto jsou chlazeny kapalinou.

Řídicí jednotka vyhodnocuje data z motoru, převodovky a akumulárního systému. Podle dat pak řídí zapojení či odpojení systému KERS pomocí automaticky ovládané spojky do pohonného systému vozidla.



Obr. 3.2 - Systém KERS od společnosti ZYTEK AUTOMOTIVE [26]

Technical Specification

Inverter

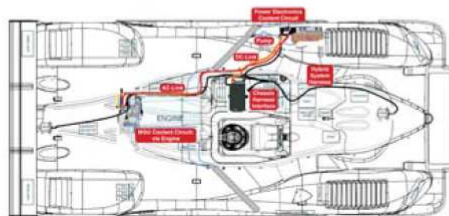
Type	IGBT 3-phase bridge
Cooling	Water
Voltage Range	180-340V DC
Weight	5.8 kgs
Vehicle comms	Single CAN 2.0b
Safety	Supports HVIL and active discharge

Motor

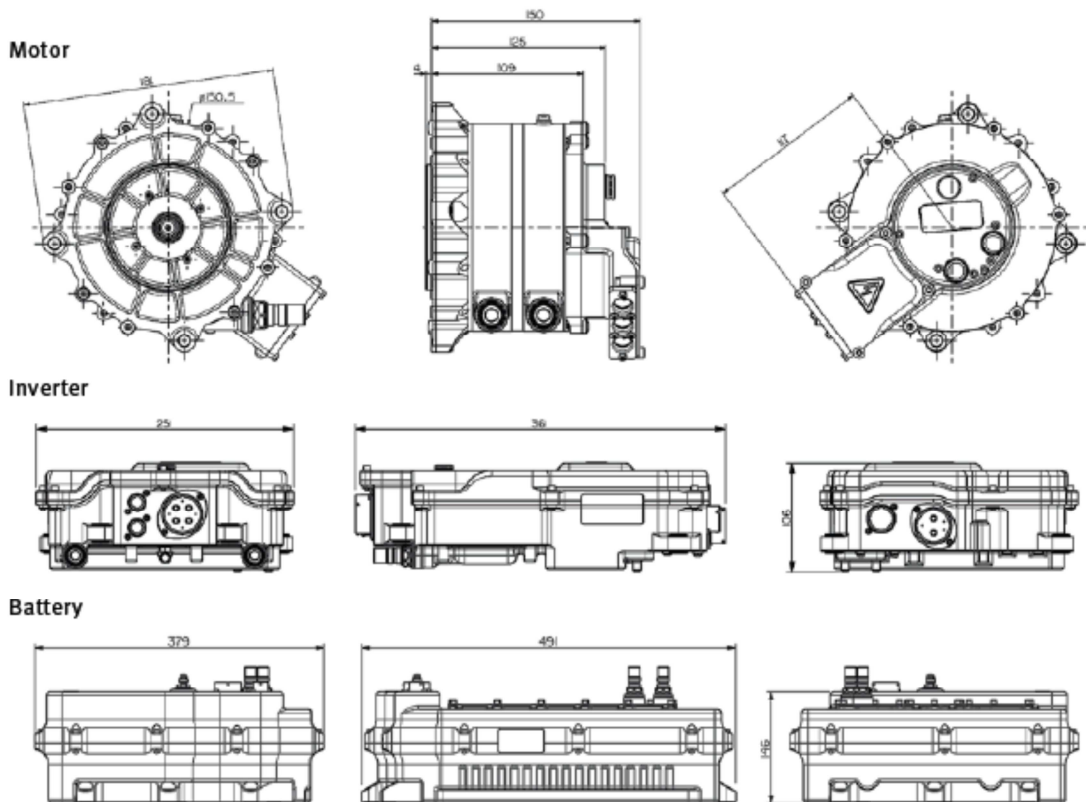
Type	AC permanent magnet synchronous machine
Cooling	Water/glycol
Peak Power	55kW
Peak torque	40Nm
Max speed	14,000rpm
Weight	8.5kgs

Battery

Zytek	Li-Ion,
Cooling	Water/glycol
Capacity	0.88kWh (3.15MJ)
Weight	24kgs
Volume	20 Litres
Peak power	45kW
Voltage range (min, nom, max)	216V, 274V, 302V



Obr. 3.3 - Technická data systému KERS od společnosti ZYTEK AUTOMOTIVE [26]



Obr. 3.4 – Zástavbové rozměry systému KERS od společnosti ZYTEK [26]



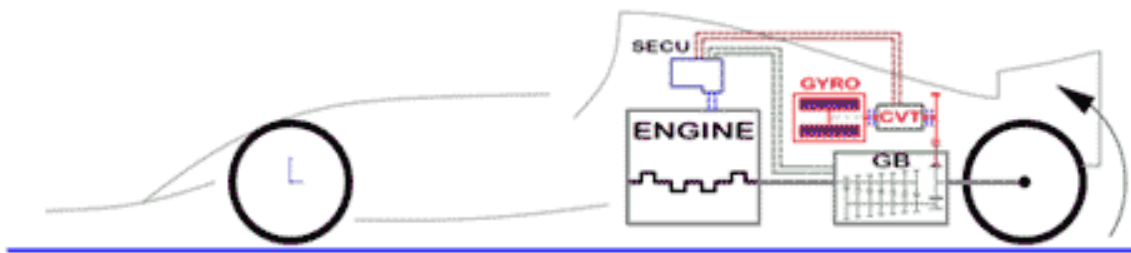
Obr. 3.5 - Motor-generátor společnosti MAGNETI MARELLI [8]



Obr. 3.6 - Řídící elektronika, měnič a motory od společnosti MAGNETI MARELLI
[[19]]

Společnost Magneti Marelli na svých webových stránkách představuje jejich řešení systému KERS. Nabízí motory ve výkonech 60,120 a 180kW, řídicí elektroniku a měniče. Hmotnost systému uvádí mezi 33 a 57kg. [19]

3.2 Systém KERS se setrvačnickem.



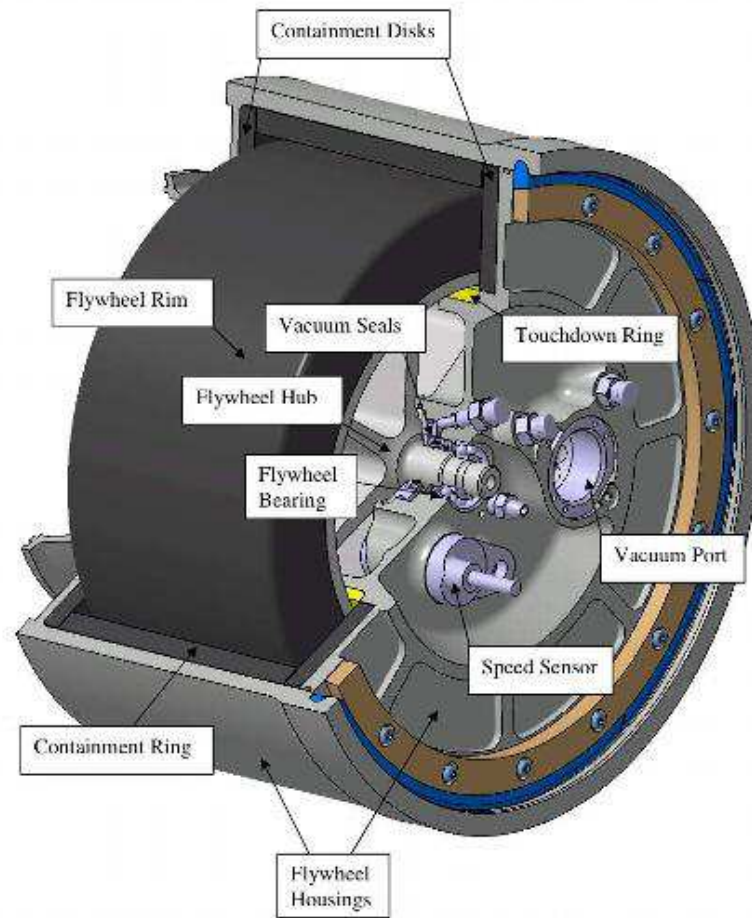
Obr. 3.7 – Systém KERS se setrvačnickem [24]

Tento systém se skládá ze setrvačnicku, automatické převodovky s několika převodovými stupni nebo s plynule měnitelným převodem (nejedná se o převodovku vozidla) a řídicí jednotky. K hnacímu ústrojí je připojen automatickou spojkou.

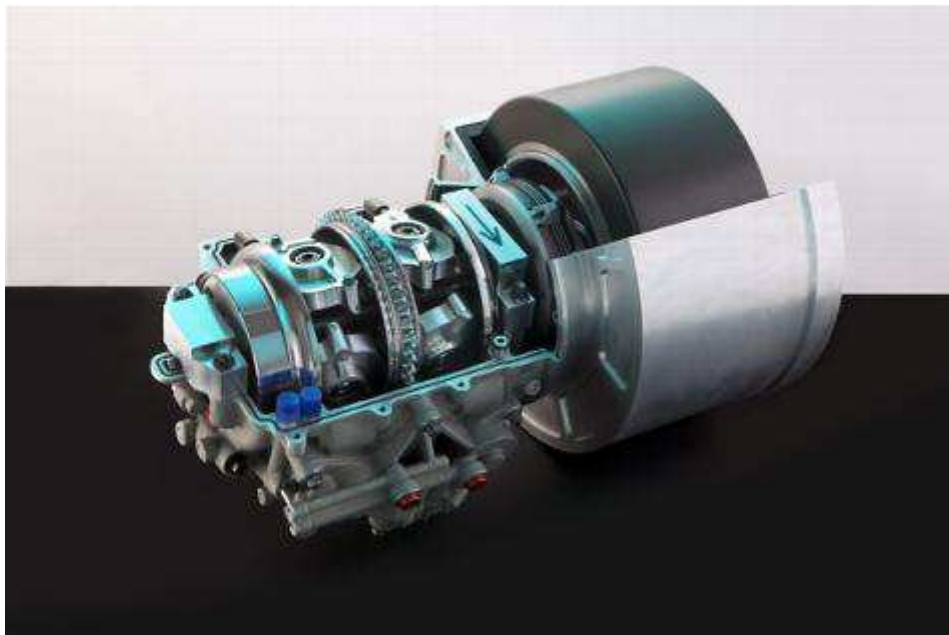
Setrvačnick je konstruován tak, aby gyroskopické momenty, které vznikají při rotaci jeho hmoty, co nejméně ovlivnily řízení vozidla. Proto je setrvačnick zpravidla menších průměrů, což je výhodné i z hlediska hmotnosti a zástavbových rozměrů. Aby bylo možné s takovýmto setrvačnickem akumulovat potřebné množství energie, musí se otáčet 30 000 až 60 000 Ot/min. To klade vysoké nároky na přesnost výroby a mechanické vlastnosti použitých materiálů. Rotor setrvačnicku je obvykle složen ze dvou částí, vnějšího prstence a náboje. Vnější prsteneček je vyroben z kompozitních materiálů, aby vydržel působení velkých odstředivých sil. Náboj je z lehkých slitin. Pro efektivitu systému KERS se setrvačnickem jsou rozhodující ztráty, které vznikají v ložiskách setrvačnicku a ventilační ztráty. Pro minimalizaci těchto ztrát se využívají elektromagnetická ložiska a setrvačnick rotuje ve vakuu. S těmito opatřeními lze snížit úbytek otáček na 2 %/hod.

Převodovka systému KERS u závodních vozů může mít pevný převodový poměr. Většinou však umožňuje měnit převodový poměr mezi hnacím ústrojím vozidla a setrvačnickem. Může být několika stupňová planetová nebo s plynule měnitelným převodem. Změna převodového poměru je realizována hydraulicky.

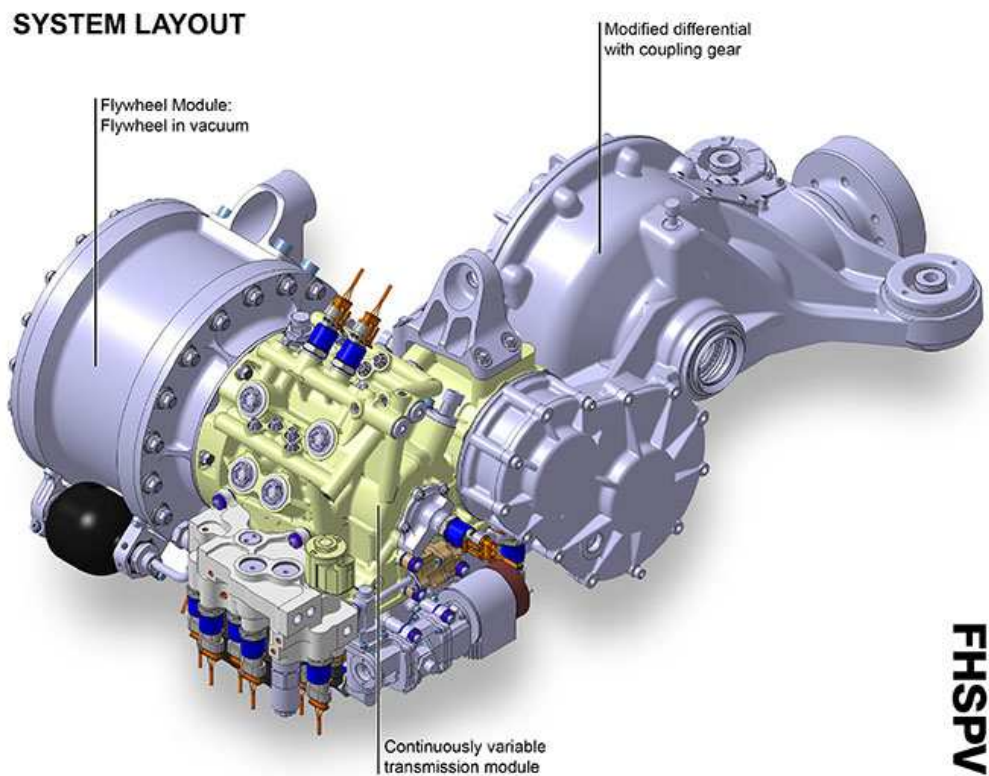
Řídicí jednotka vyhodnocuje údaje z motoru a hnacího ústrojí vozidla, pomocí nichž zapojuje a odpojuje systém KERS do hnacího ústrojí a volí vhodný převodový poměr převodovky systému KERS.



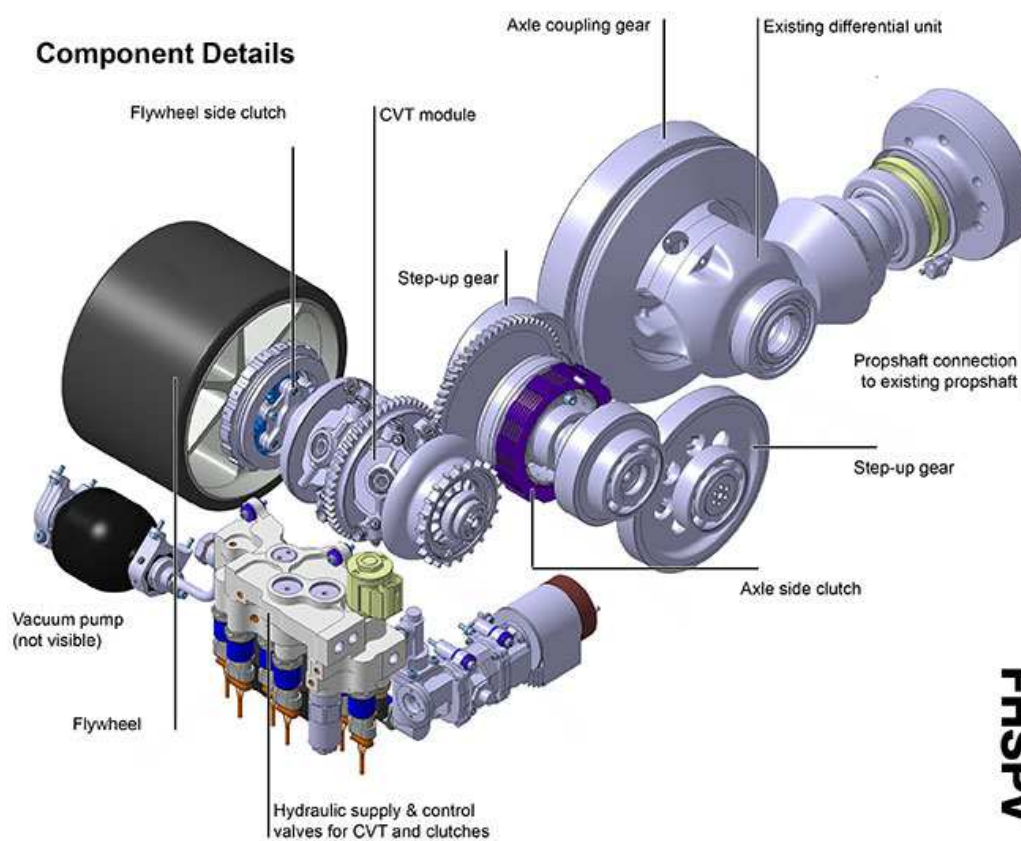
Obr. 3.8 -Model setrvačnicku společnosti FLYBRID [23]



Obr. 3.9 - Systém KERS pro formuli 1 společnosti FLYBRID [23]



Obr. 3.10 - Systém KERS pro vozy Jaguar společnosti FLYBRID [9]



Obr. 3.11 - Systém KERS pro vozy Jaguar společnosti FLYBRID [9]

3.3 Systém KERS s mechanickou baterií



Obr. 3.12 – Systém KERS s mechanickou baterií ve voze Porsche [10]

Systém se skládá ze dvou motor-generátorů, setrvačníku a řídicí jednotky. Jeden motor-generátor je zapojen do hnacího ústrojí a je vodiči spojen s dalším motor-generátorem, který je součástí setrvačníku. Řídicí jednotka zajišťuje optimální využití rekuperace energie.



Obr. 3.13 - Setrvačník s motor-generátorem ve voze Porsche [13]



- Carbon fibre
- Stator
- Ceramic bearings
- Magnetic Loaded Composite

Obr. 3.14 -Schéma setrvačníku s motor-generátorem od firem Recardo a Williams [12]

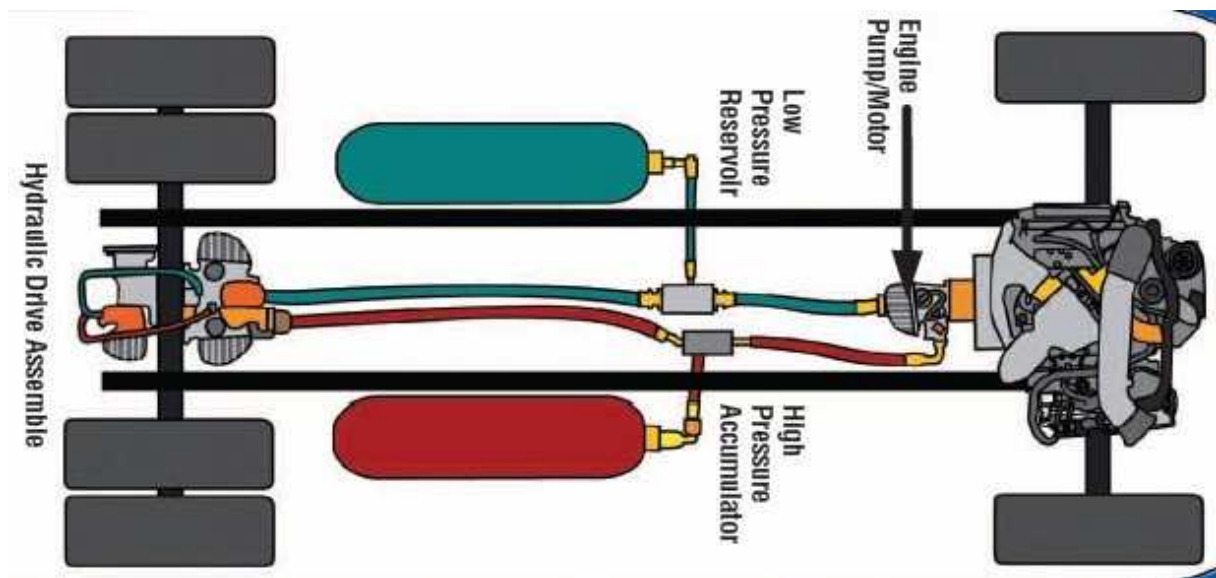


Obr. 3.15 – Model mechanické baterie. [11]



Obr. 3.16 -Mechanická baterie od společnosti FLYBRID [3]

3.4 Hydropneumatický systém



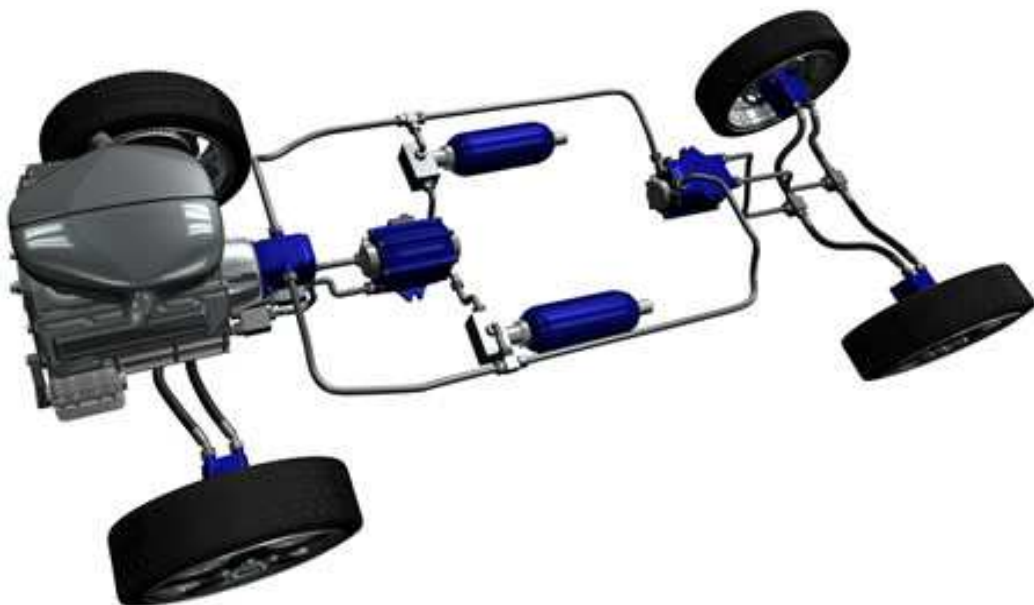
Obr. 3.17 – Systém KERS v hydropneumatickém provedení [7]

Systém se skládá ze dvou hydromotor-generátorů, nízkotlakého a vysokotlakého zásobníku, řídicí jednotky.

Hydromotor-generátor spojený s hnacími koly zajišťuje jejich pohon. V případě potřeby brzdění plní vysokotlaký zásobník. Hydromotor-generátor připojený ke spalovacímu motoru slouží jako zdroj tlakového média (generátor) nebo slouží k nastartování spalovacího motoru v režimu start/stop (motor).

Vysokotlaký zásobník je pod tlakem 8,5 až 12,5 bar. Potřebný tlak je vyvozen stlačením plynu obvykle dusíku nebo metanu.

Řídicí jednotka ovládá rozdělovací ventily.

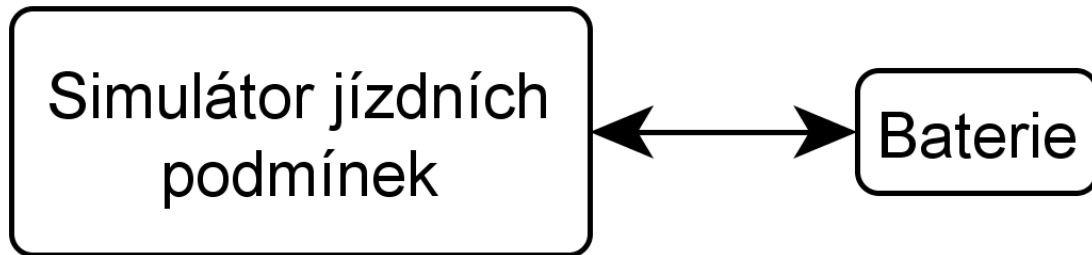


Obr. 3.18 – Hydropneumatický systém KERS od společnosti Innas [5]

4 Varianty konstrukčních řešení pro demonstrátor

4.1 Schéma demonstrátoru

Celý demonstrátor se dá rozdělit na dvě hlavní části. Simulátor jízdních podmínek a baterii. Simulátor jízdních podmínek by měl umožňovat simulaci různých provozních podmínek a jízdních cyklů, které se vyskytují u reálného vozidla. V baterii se uchová přebytečná energie a využije se při dalším simulovaném rozjezdu nebo jízdě do kopce.



Obr. 4.1 – Schéma demonstrátoru

4.2 Varianty baterie

4.2.1 Chemické baterie

Lze je jednoduše použít, protože se nakupují jako celek. Mohou být levným řešením (záleží na typu baterie). Nevýhodou je omezená životnost a nutnost udržovat baterii v nabitém stavu, aby nedošlo k jejímu zničení. Další významnou vlastností chemických akumulátorů je časová prodleva při počátku nabíjení, proto jsou pro naše použití nevhodné.

4.2.2 Superkapacitory

Jejich aplikace je snadná, protože je lze koupit jako celek. Nemají časovou prodlevu při počátku nabíjení, tak jako chemické baterie, oproti tomu jsou dražší nežli chemické akumulátory. Při nesprávném zacházení mohou být nebezpečné svým elektrickým nábojem. Pro své technické vlastnosti je lze pro náš účel použít.

4.2.3 Mechanické baterie

Složitější aplikace, protože se nepodařilo nalézt mechanickou baterii odpovídajících parametrů, která by šla koupit. Pro náš účel je tedy nutné vyrobit si vlastní. Výhodou je velký počet nabíjecích cyklů a v podstatě neomezená trvanlivost a bezúdržbovost oproti chemickým akumulátorům.

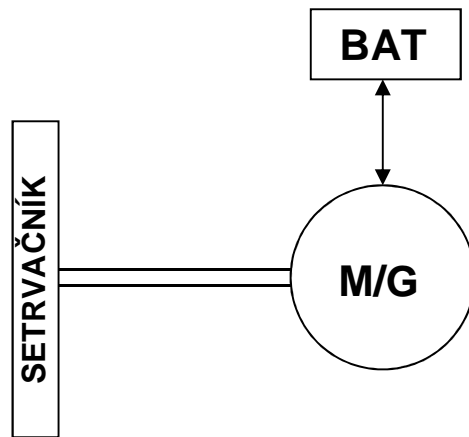
4.3 Varianty simulátoru jízdních režimů

Od simulátoru je požadováno, aby umožnil simulovat různé jízdní režimy a podmínky, které mohou na vozidlo během jízdy působit. Toho lze dosáhnout různými koncepcemi simulátorů.

Jízdní režimy a stavy, které je potřeba simulovat:

- Jízda po rovině
- Jízda z kopce
- Jízda do kopce
- Zrychlení, rozjezd
- Zpomalení, zastavení
- Případně ostatních jízdních odporů (valivý odpor, odpor vzduchu)

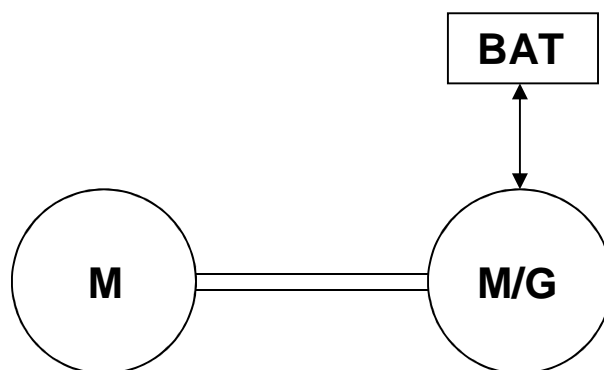
Simulátor jízdních podmínek se setrvačником



Obr. 4.2 – Demonstrátor se setrvačником

Setrvačnik slouží k simulaci dynamických sil (akcelerační/decelerační). Řízením výkonu motor-generátoru se simulují statické síly (odpor větru, odpor valení, jízda do kopce). Mimo to motor-generátor slouží ke změně mechanické energie na elektrickou a opačně. Tím je umožněno uložení přebytečné energie do baterie a její zpětné využití.

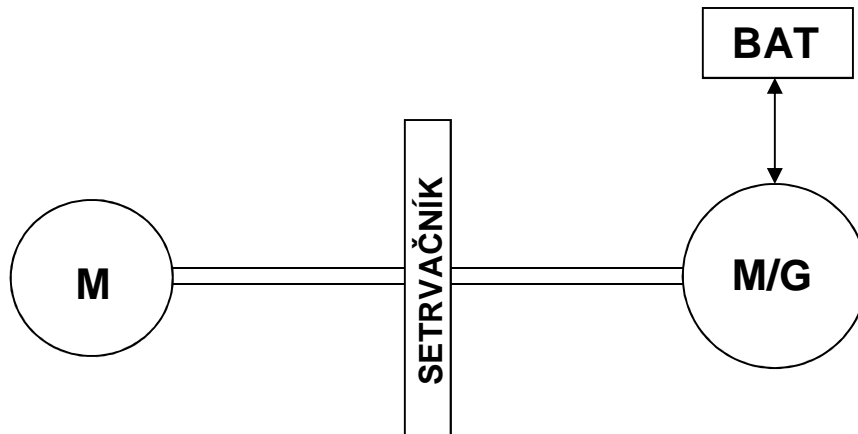
Simulátor jízdních podmínek s elektromotorem



Obr. 4.3 – Demonstrátor s motorem

Statické i dynamické síly jsou simulovány elektromotorem M., který buď motorgenerátor roztáčí, nebo brzdí. Motor-generátor slouží ke změně mechanické energie na elektrickou a opačně, a tím umožňuje její uložení do baterie a její zpětné využití.

Simulátor jízdních podmínek s elektromotorem a setrvačníkem



Obr. 4.4 – Demonstrátor s motorem a setrvačníkem

Statické síly jsou simulovány elektromotorem M., dynamické síly jsou simulovány setrvačníkem, na kterém je také názorně vidět zpomalování a zrychlování simulovaného vozidla a tok energie. Motor-generátor slouží ke změně mechanické energie na elektrickou a opačně, a tím umožňuje její uložení do baterie a její zpětné využití.

5 Konstrukční návrh experimentu

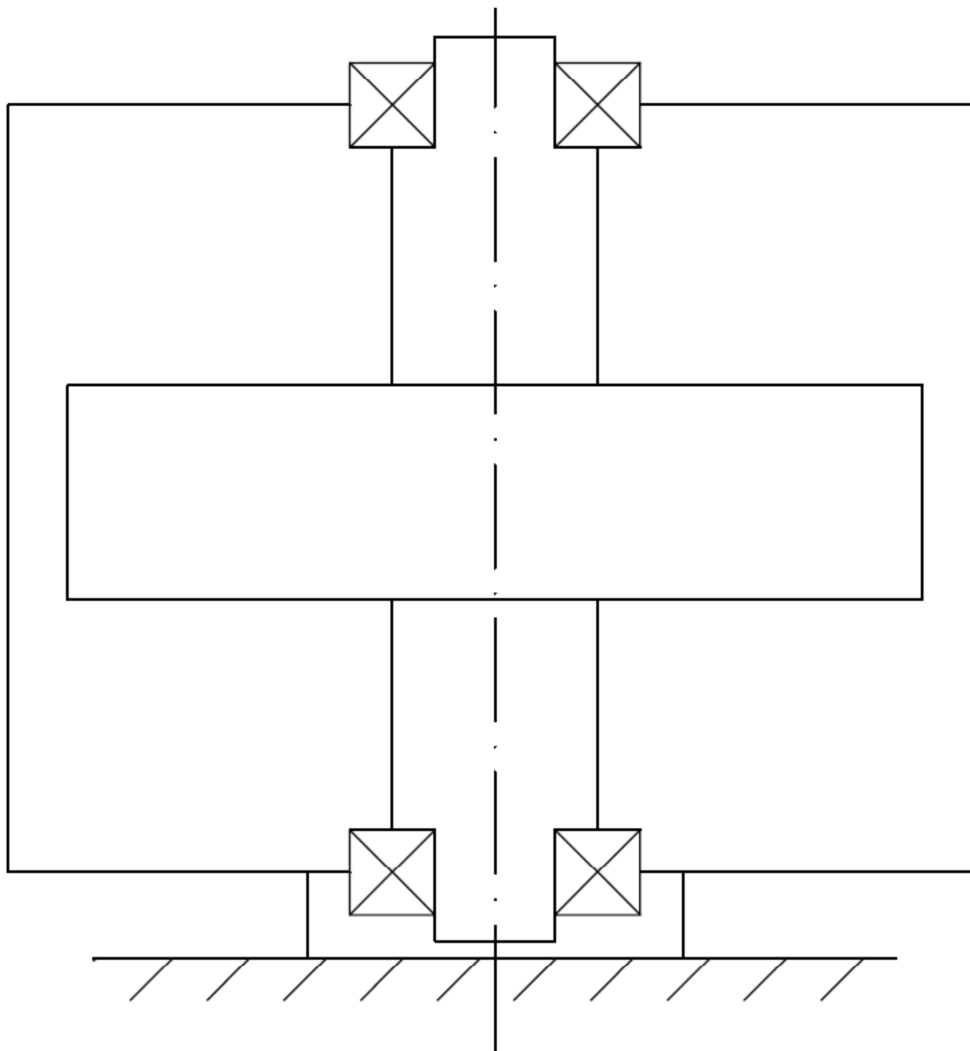
5.1 Konstrukční varianty mechanické baterie

Z možných variant byla vybrána mechanická baterie. Poskytuje totiž konstrukčně zajímavé řešení, které při použití v demonstrátoru názorně ukáže ukládání a tok energie.

Hlavními částmi mechanické baterie jsou setrvačnick, ložiska, rám a případně spojka mezi motor-generátorem a setrvačnickem. Jejich různé konstrukční provedení a uspořádání přináší několik koncepcí mechanické baterie.

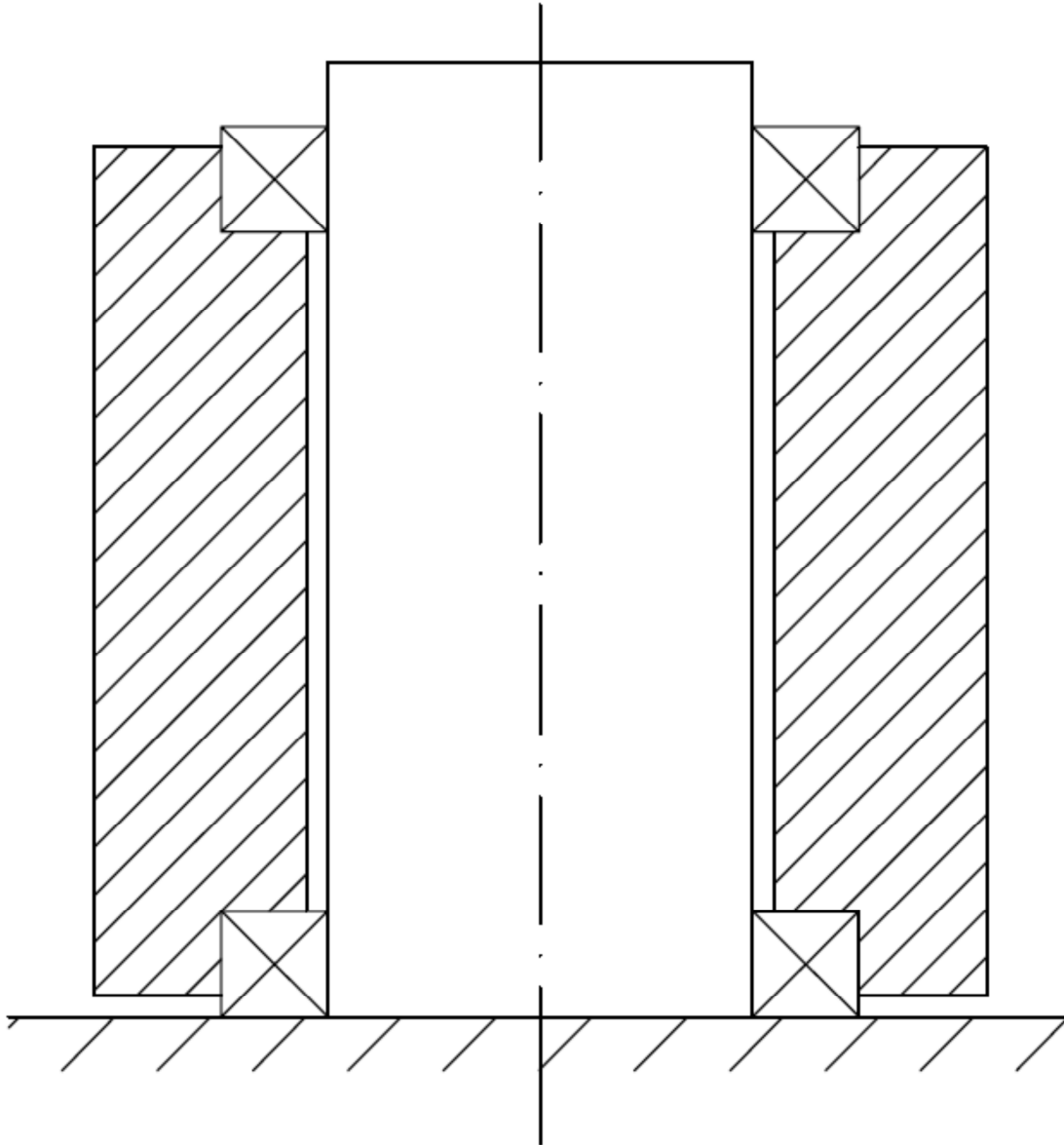
Při návrhu mechanické baterie je prioritní návrh setrvačnicku, který v sobě akumuluje veškerou energii. Moment setrvačnosti, otáčky a hmotnost setrvačnicku jsou zásadní fyzikální veličiny, které ovlivňují výsledné vlastnosti baterie a možnost její konkrétní aplikace.

5.1.1 Varianty koncepce uložení setrvačnicku



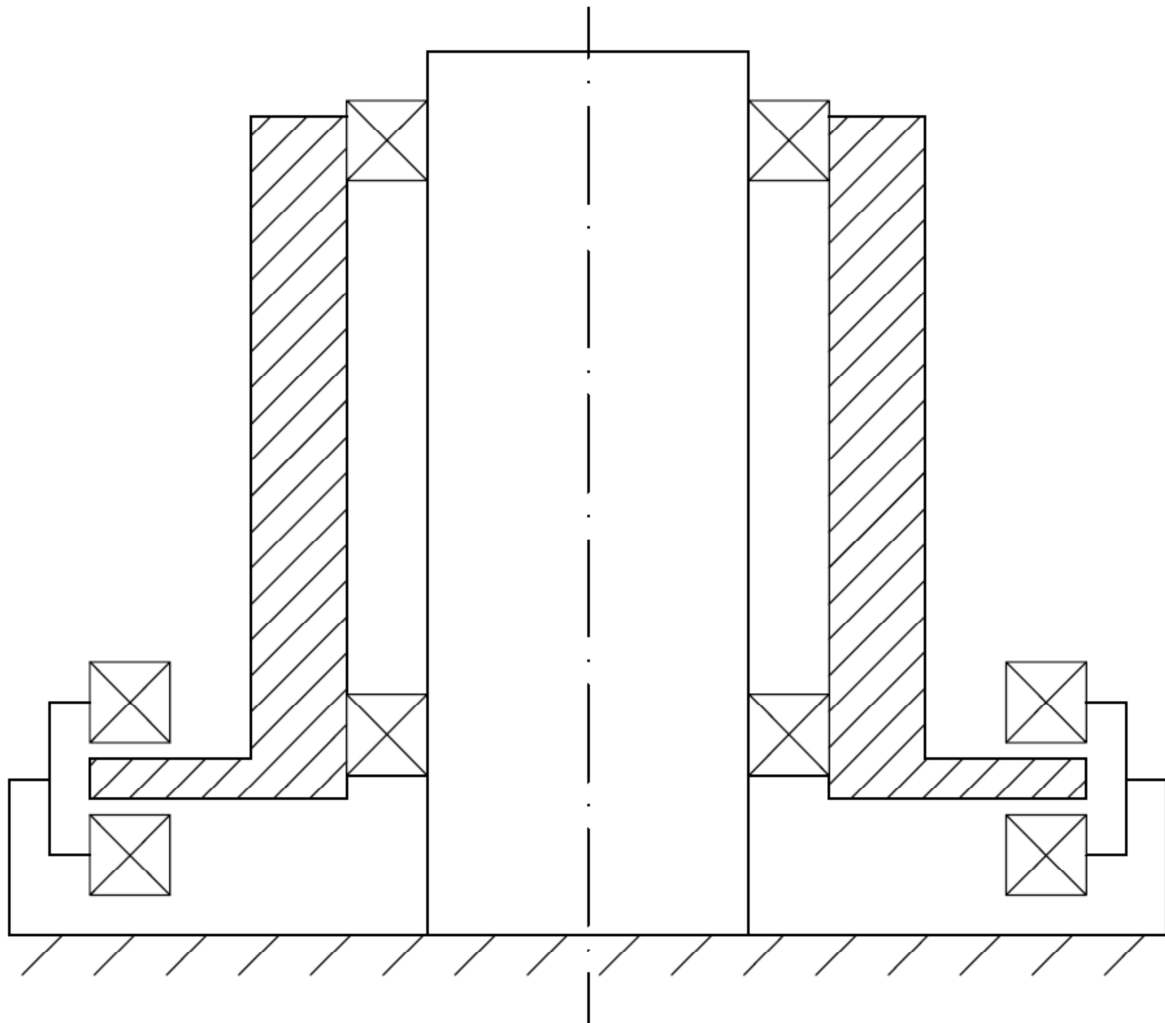
Obr. 5.1 – Mech. baterie se setrvačnickem na hřídeli uložené v rámu

Na obrázku 5.1 tvoří setrvačnick hřídel, na níž je umístěn kotouč setrvačnicku, případně může být kotouč s hřídelí vyroben z jednoho kusu materiálu. Výhodou je jednoduché uložení v ložiscích, levná výroba a snadná montáž. Lze využít ložiska všech typů. Na schématu je zobrazeno uložení s využitím ložisek, která dokáží přenášet radiální i axiální sílu např. kuličková ložiska s kosouhlým stykem.



Obr. 5.2 – Mech. baterie se setrvačnickem tvaru mezikruží uloženým na ose

Na obrázku 5.2 tvoří setrvačnick mezikruží, které je velice vhodným tvarem, jelikož díky velkému momentu setrvačnosti nejlépe využívá materiál z hlediska možnosti uložení energie. Uložení v ložiscích, výroba setrvačnicku a montáž je komplikovanější než v případě na obr. 5.1. Tak jako v předchozím případě i zde jsou na schématu zobrazena ložiska, která dokáží přenášet radiální i axiální síly.



Obr. 5.3 – Mech. baterie se setrvačnickem tvaru mezikruží s rozšířeným okrajem

Řešení na obr. 5.3 předpokládá použití magnetických ložisek pro zachycení radiálních i axiálních sil. Setrvačnick tvaru mezikruží přináší výhody zmiňované v předchozím případě. Rozšířený okraj nutný pro zachycení axiálních sil však uložení a výrobu ještě více komplikuje. Montáž by měla být, díky lepšímu přístupu snazší než v předchozím případě.

5.1.2 Varianty ložisek

Kluzná

Klasická kluzná ložiska mazaná tukem nebo samomazná plastová pouzdra nejsou vhodná. Oproti jiným principům mají velké třecí ztráty a pro vysoké otáčky se nehodí.

Hydrodynamická a hydrostatická ložiska jsou náročná na návrh. Kvůli nutnosti mazání olejem i na provoz a údržbu, zvláště hydrostatický princip kvůli svému tlakovému oběhu. S rostoucími otáčkami se kvůli dynamické vazkosti zvyšují třecí ztráty i u těchto principů.

Aerodynamická a aerostatická ložiska mají mechanické ztráty menší, ale mají malou únosnost a špatné tlumení.

Valivá

Přesná valivá ložiska pro vysokootáčkové stroje. Ztráty v ložisku určuje způsob mazání. Maximální otáčky závisejí na průměru ložiska a způsobu jeho mazání. Mazání systémem

vzduch-olej umožňuje dosáhnout cca 1,5x vyšších otáček než při mazání tukem. Avšak tento systém je mnohem více nákladný a komplikovaný než mazání speciálním tukem. Při mazání tukem je tato varianta nejméně náročná na finanční a lidské zdroje.

Magnetická

Zatím málo používaná, avšak pro aplikaci v mechanické baterii se jeví být velice vhodná. Bezkontaktní uložení zaručuje minimální ztráty, při řízení magnetického pole mají dobré tlumení. Mohou pracovat ve vakuu (pokud se chladí jinak než vzduchem), čímž se ještě zmenší ventilační ztráty. Nevýhodou je potřeba řídicí elektroniky, napájení, vyšší cena a méně zkušeností s aplikací než u valivých ložisek. Je potřeba uvažovat záchytná ložiska, která umožní bezpečný doběh v případě přerušení napájení nebo zachytí rotor v případě pádu baterie, aby nedošlo ke zničení magnetických ložisek a rotoru baterie.

5.1.3 Varianty setrvačnicku

Stejně kapacity uložené energie v setrvačnicku lze dosáhnout nekonečně mnoho kombinacemi veličin, ze kterých se kapacita vypočte. Jsou to hmotnost, otáčky a moment setrvačnosti.

- Otáčky
Mají rozhodující vliv na výběr ložisek a na ventilační ztráty. Energie setrvačnicku je na otáčkách závislá s druhou mocninou.
- Hmotnost
Je dána hustotou použitého materiálu. Má vliv na výběr ložisek.
- Moment setrvačnosti
Je dán rozložením hmoty okolo osy setrvačnicku. Stoupá s druhou mocninou poloměru ramena hmotného bodu.

Konstrukce setrvačnicku může být z jednoho kusu nebo může být tvořena prstencem a nábojem z různých materiálů. U vysoko otáčkových setrvačnicků se využívá kombinace duralového náboje a prstence z kompozitních materiálů, protože konvenční materiály by napětí vyvolané rotací nevydržely.

Veličiny a vzorce představující uloženou energii v setrvačnicku:

$$E_k = \frac{1}{2}J\omega^2$$

$$\omega = \frac{\pi n}{30}$$

$$J = MR^2$$

$$J = \int r^2 dm$$

Kde $J[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$ je moment setrvačnosti, $R[\text{m}]$ poloměr setrvačnosti, $M[\text{kg}]$ celková hmotnost, $E_k [\text{J}]$ kinetická energie, $\omega[\text{rad/s}]$ úhlová rychlost, $n[\text{ot./min.}]$ otáčky.



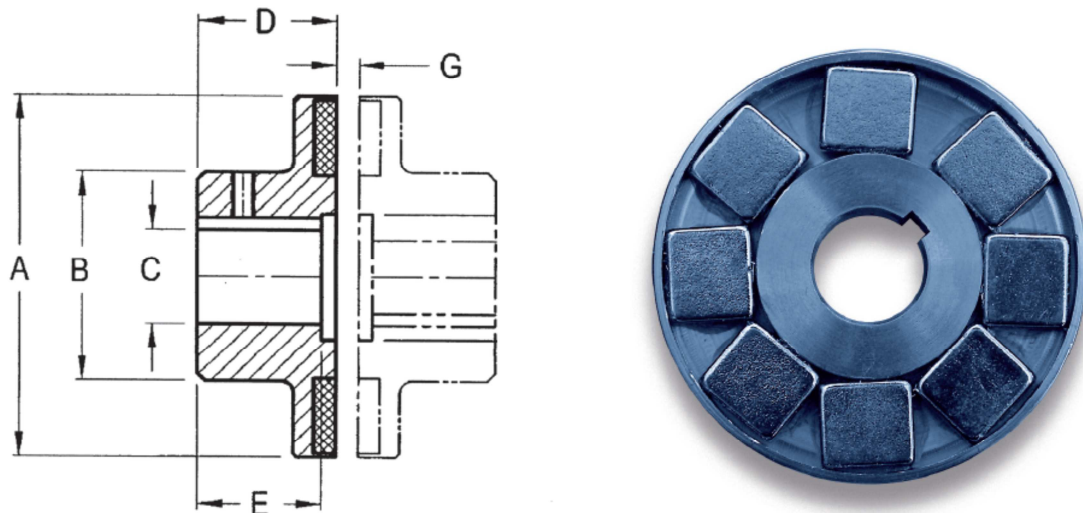
Obr. 5.4 – Ukázka kompozitního setrvačnicku [14]

5.1.4 Varianty motor-generátoru

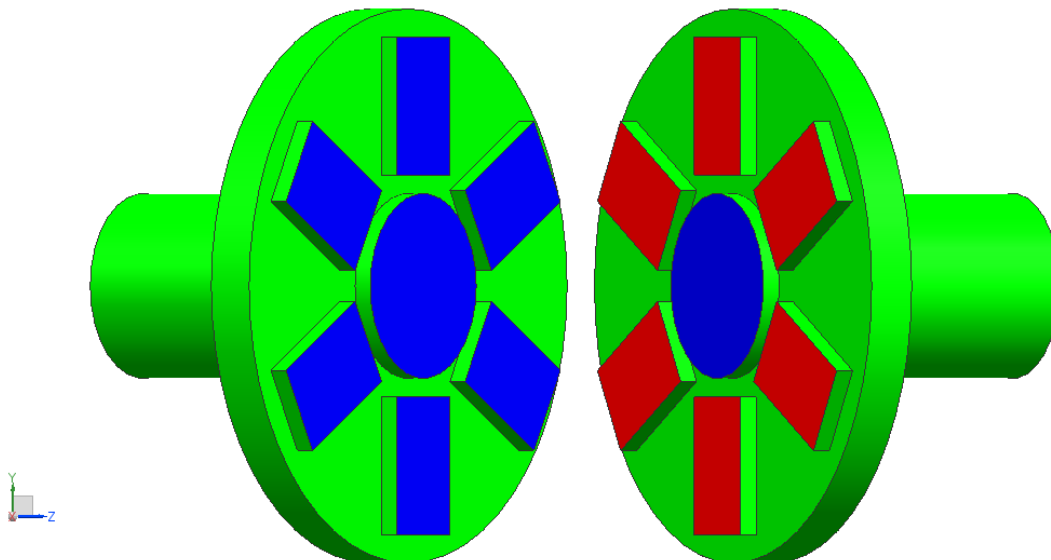
Motor-generátor musí umožnit přeměnu elektrické energie na mechanickou a naopak mechanickou energii přeměnit na elektrickou. Z elektrických točivých strojů to mohou být stejnosměrné motory / dynama, střídavé synchronní motory / alternátory nebo střídavé asynchronní motory.

5.1.5 Varianty spojení motor-generátoru s hřídelí setrvačnicku

Způsob připojení motor-generátoru ke hřídeli setrvačnicku se liší podle druhu ložisek, v nichž je uložen rotor baterie. Při použití např. kuličkových ložisek je rotor uložen pevně, téměř bez vůle a může se použít jakákoliv spojka, která nebude budit při vysokých otáčkách vibrace. Jiné je to při použití magnetických ložisek, kdy je rotor uložen s vůlí cca 0,5mm v magnetickém poli, potom by mělo být spojení rotoru baterie s motor-generátorem, co nejvíce volné a v ideálním případě působit na hřídel pouze krouticím momentem. Toho lze dosáhnout např. pomocí magnetické bezkontaktní spojky. U průmyslově vyráběných magnetických spojek je uvažováno, že hřídele jsou axiálně zajištěny a všechny magnety na kotoučích spojky na sebe působí přitažlivými silami. To v případě uložení rotoru baterie v magnetických ložiscích není vhodné, protože by byl rotor přitlačován na záchytná ložiska. Tento problém lze vyřešit úpravou spojky přidáním magnetů s vhodně nastavenou polaritou. Jeden ze dvou magnetů umístěných ve středu kotoučů spojky, má opačnou polaritu než magnety po obvodu a kompenzuje tak přitažlivou sílu obvodových magnetů.



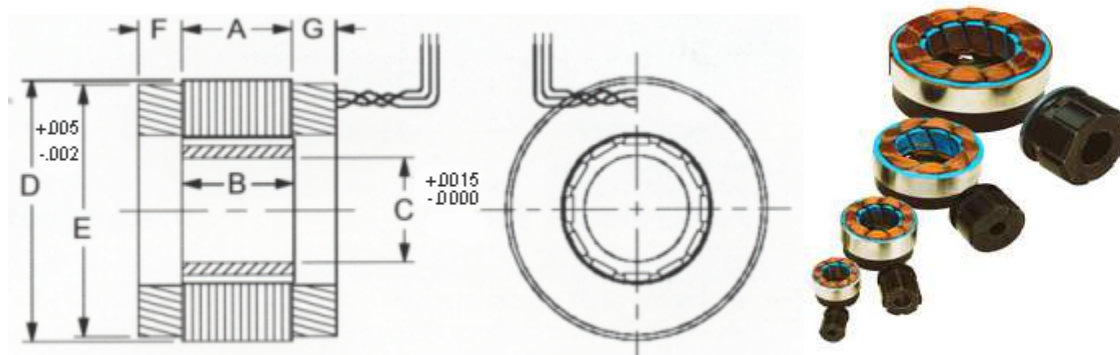
Obr. 5.5 - Příklad průmyslově vyráběné magnetické spojky [15]



Obr. 5.6 - Model vlastního návrhu magnetické spojky, červená a modrá barva rozlišují polaritu magnetů

5.1.6 Frameless motor-generátor

Zajímavou možností je použít motor v provedení tzv. „FRAMELESS“. Jedná se o motor, který má vinutí ve statoru a v rotoru má permanentní magnety. Rotor se připevní přímo na hřídel. Tím se zajistí úplná volnost hřídele v magnetických ložiscích, odpadají ztráty ve štitových ložiscích motoru. Není nutné použít spojku a konstrukce se stává kompaktnější. Zpravidla mají větší kroutící moment než klasické motory s výstupní hřídelí. Tyto motory jsou vyráběny pro stejnosměrné i střídavé napájení.



Obr. 5.7 - Ukázka frameless motoru [21]

5.2 Dimenzování a konkrétní návrh součástí baterie

5.2.1 Specifikace požadavků

Pro účel demonstrátoru je vhodné navrhnout baterii, se kterou se bude snadno manipulovat, otáčky, protékající proud a napětí nebudou v nebezpečných hodnotách. Jednotlivé komponenty by měly být levné a snadno dostupné.

Z těchto kritérií byly zvoleny vstupní hodnoty pro konstrukci a dimenzování:

Otáčky do 10 000 ot/min, napětí do 48V, napájecí proud do 6A. Hmotnost do 20kg

5.2.2 Radiální ložiska

Byla vybrána aktivní magnetická ložiska Mecos. S aplikací těchto ložisek pro podobné účely je již zkušenost z předchozích prací a jsou v laboratoři k dispozici i s řídicí elektronikou.



Obr. 5.8 – Magnetické ložisko Mecos s rotorovými plechy a držákem snímačů

Dodané ložisko obsahuje stator ložiska, snímače polohy upevněné na držáku a rotorové plechy.



Obr. 5.9 – Řídící elektronika magnetických ložisek

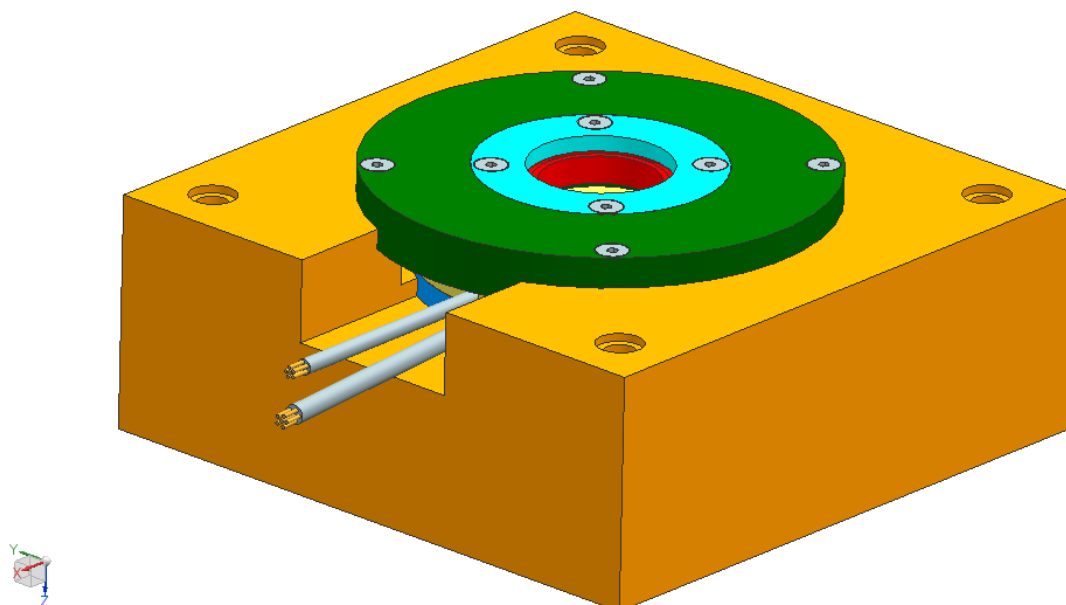
5.2.3 Záchytná ložiska

Pro případ výpadku napájení či havárie bude baterie vybavena záchytnými kuličkovými ložisky 30x42x7mm, která umožní bezpečný doběh setrvačníku. Rozměr ložisek je odvozen od radiálních magnetických ložisek. Parametry ložiska udávané výrobcem [27] prokazují, že jejich statická únosnost je mnohonásobně vyšší než zatížení, které na ně může působit. Nicméně na ložisko může působit velké úhlové zrychlení, když plně roztočený setrvačník dosedne na stojící ložisko. V takovém případě setrvačnost kuliček, klece ložiska a tření v mazivu může způsobit prokluz kuliček v jejich drahách a poškození ložiska. Proto se uvažuje při zásadnějším dosednutí rotoru na záchytná ložiska jejich preventivní výměna, čili s životností ložiska není předmětné se zabývat.

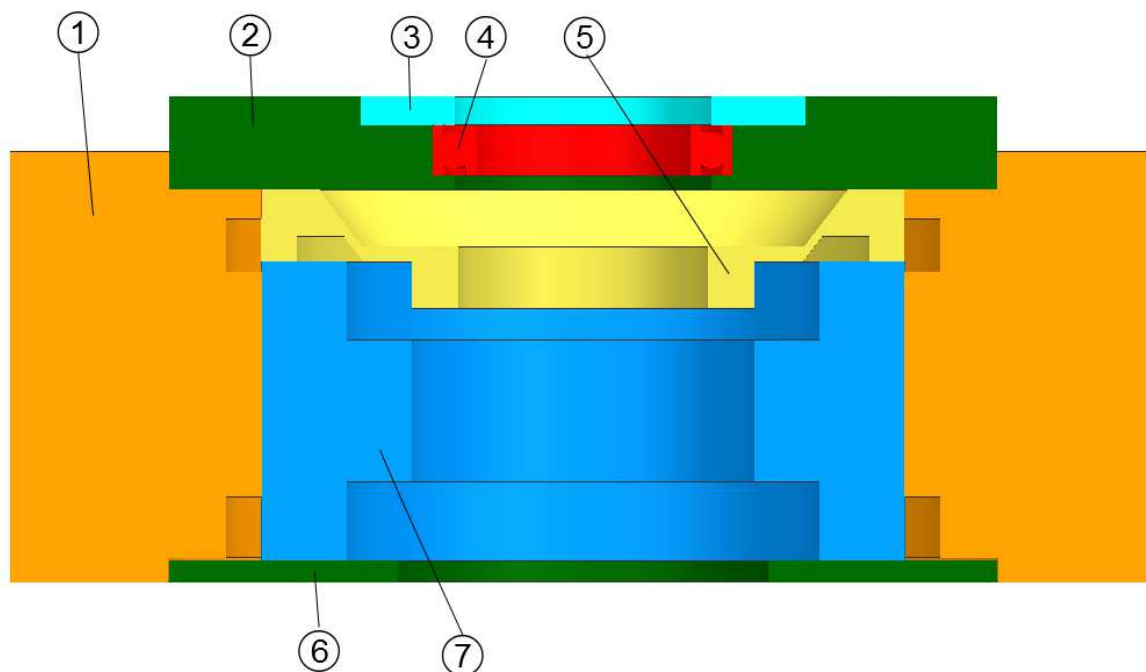
Ložisko 30x42x7mm označení 61806	
Statická únosnost v radiálním směru C_0	2900N
Statická únosnost v axiálním směru	$0,5 \cdot C_0=1450N$
Předpokládaná tíhová síla rotoru	30N
Maximální otáčky	32000 ot/min

Čerpáno z [27]

5.2.4 Sestava domku radiálních a záchytných ložisek



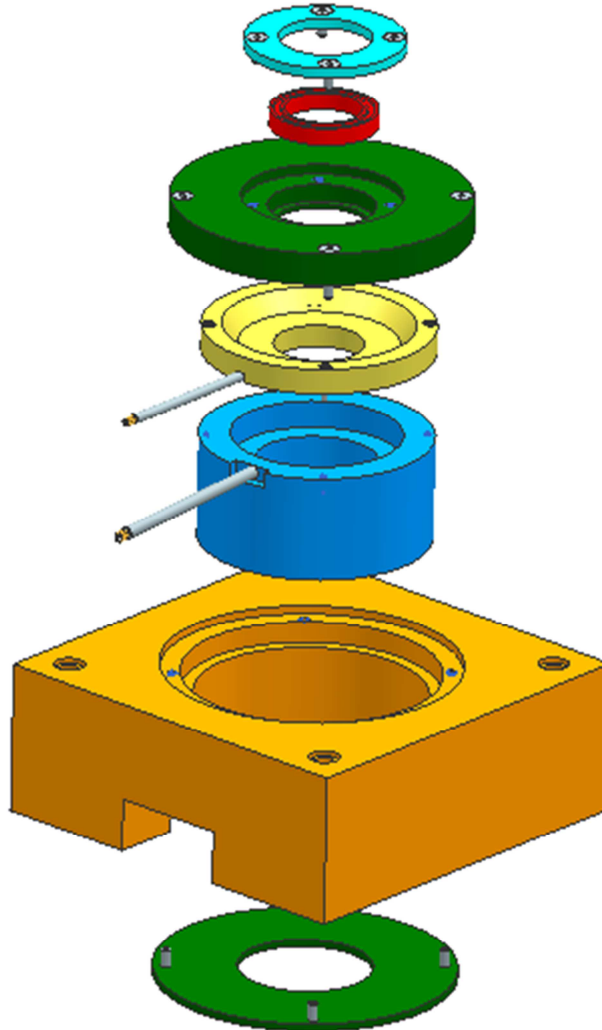
Obr. 5.10 – Sestava domku radiálních magnetických ložisek



Obr. 5.11 - Sestava domku radiálních magnetických ložisek- řez

1 domek radiálního magnetického ložiska, 2 domek záchytného ložiska, 3 víčko, 4 záchytné ložisko, 5 držák snímačů, 6 víčko, 7 stator radiálního magnetického ložiska

Stator radiálního magnetického ložiska 7 je s držákem snímačů spojen šrouby. Osová délka statoru ložiska 7 s držákem 5 je kratší než délka uložení v domku 1, takže při dotažení šroubů spojujících víčka a domky se vytváří předpětí, které fixuje stator ložiska 7 proti pootočení.

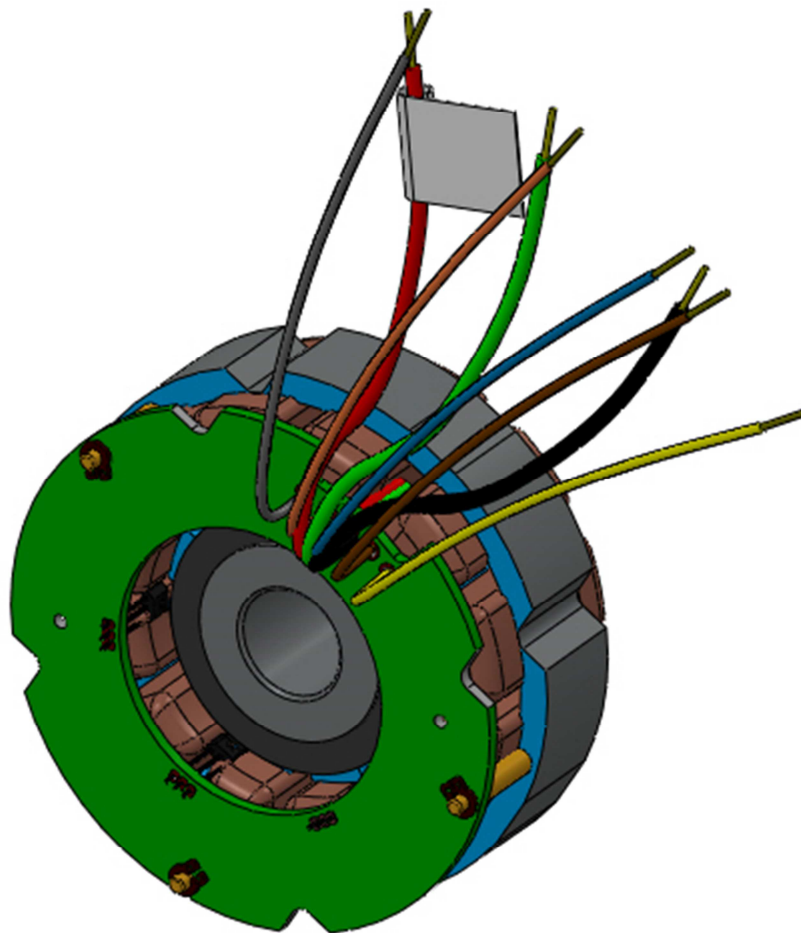


Obr. 5.12 – Rozstřel sestavy radiálního ložiska

5.2.5 Motor-generátor

Po konzultaci s vedoucím diplomové práce Ing. Romanem Čermákem Ph.D. a Doc. Luďkem Piskačem CSc. z Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni byl zvolen jako nejvhodnější stejnosměrný motor. Při experimentu bylo prokázáno, že stejnosměrný motor umožňuje rekuperaci elektrické energie. K volbě stejnosměrného motoru také přispěla skutečnost, že s jeho řízením je již zkušenost z předchozích prací a v laboratoři je k tomu vhodné vybavení.

Pro dříve zmiňované výhody byl zvolen motor ve „frameless“ provedení. Potřebným rozměrům a parametrům nejlépe vyhovuje motor společnosti MOOG s označením BN23-23ZMG-01LH. Motor disponuje vysokými otáčkami a krotícím momentem.

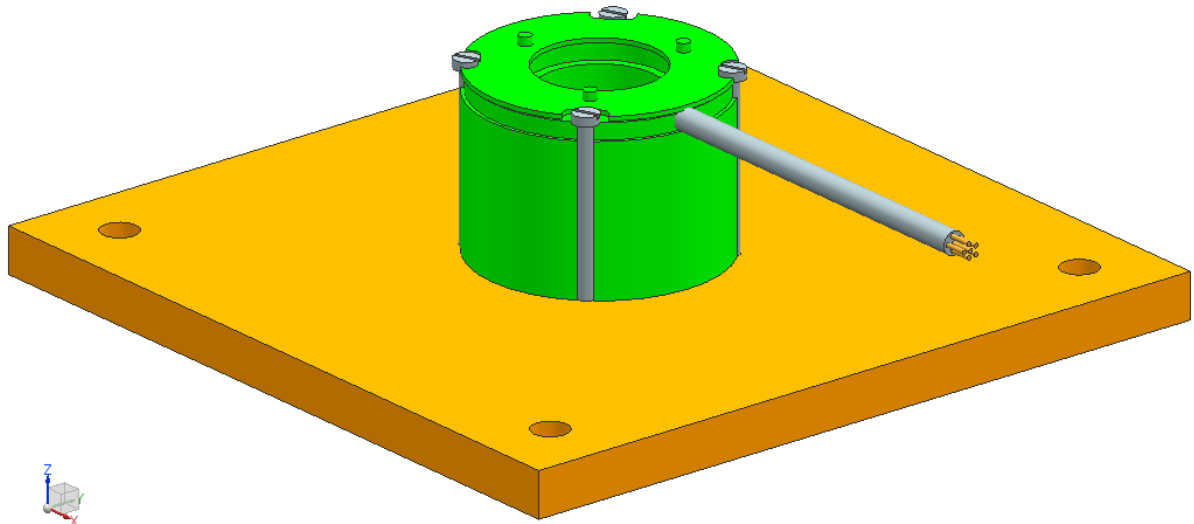


Obr. 5.13 – Frameless motor společnosti MOOG [28]

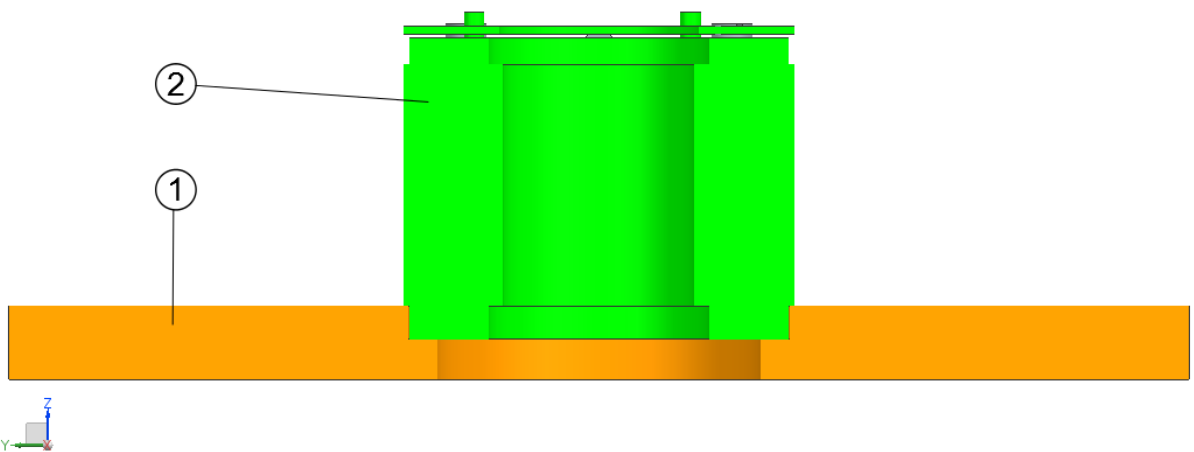
Základní parametry motoru:

Napětí	24	V
Maximální kroutící moment	1,02	Nm
Jmenovitý kroutící moment	0,30	Nm
Maximální otáčky	8100	1/min
Jmenovité otáčky	6060	1/min
Jmenovitý výkon	181	w

5.2.6 Sestava domku motor-generátoru



Obr. 5.14 – Sestava domku motor-generátoru



Obr. 5.15 – Sestava domku motor-generátoru - řez
1 domek, 2 stator motor-generátoru.

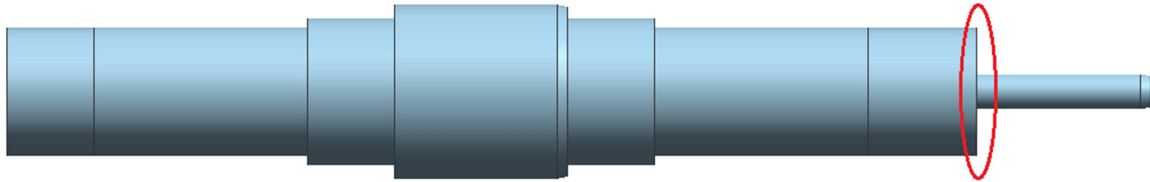
Stator motorgenerátoru 2 je uložen v domku 1 a zajištěn šrouby.

5.2.7 Hřídel rotoru baterie

Rozměry hřídele baterie jsou odvozeny od radiálních magnetických ložisek a otvoru v motor-generátoru. Jako materiál hřídele, je zvolena slitina hliníku EN AW 2007. Nízká hustota materiálu snižuje hmotnost baterie. Jelikož je materiál nemagnetický, je vyloučena možnost ovlivňování senzorů magnetických ložisek.

Pevnostní kontrola hřídele v nejužším místě hřídele:

Hřídel je zatěžována pouze kroutícím momentem od motor-generátoru.



Obr. 5.16 – Hřídel rotoru baterie

Průměr hřídele v nejužším místě	8mm
Největší krouticí moment	1,02Nm=1020Nmm
Mez kluzu materiálu v tahu $R_{p0,2}$	250Mpa
Mez kluzu ve smyku	0,5. $R_{p0,2}$

$$W_k = \frac{\pi d^3}{16} = \frac{\pi \cdot 8^3}{16} = 100,53 \text{ mm}^3$$

$$\tau = \frac{M_k}{W_k} = \frac{1020}{100,53} = 10,15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_D = \frac{R_{p0,2}}{k} = \frac{250}{1,5} = 166,67 \text{ MPa}$$

$$\tau_D = \sigma_d \cdot 0,5 = 166,67 \cdot 0,5 = 83,335 \text{ MPa}$$

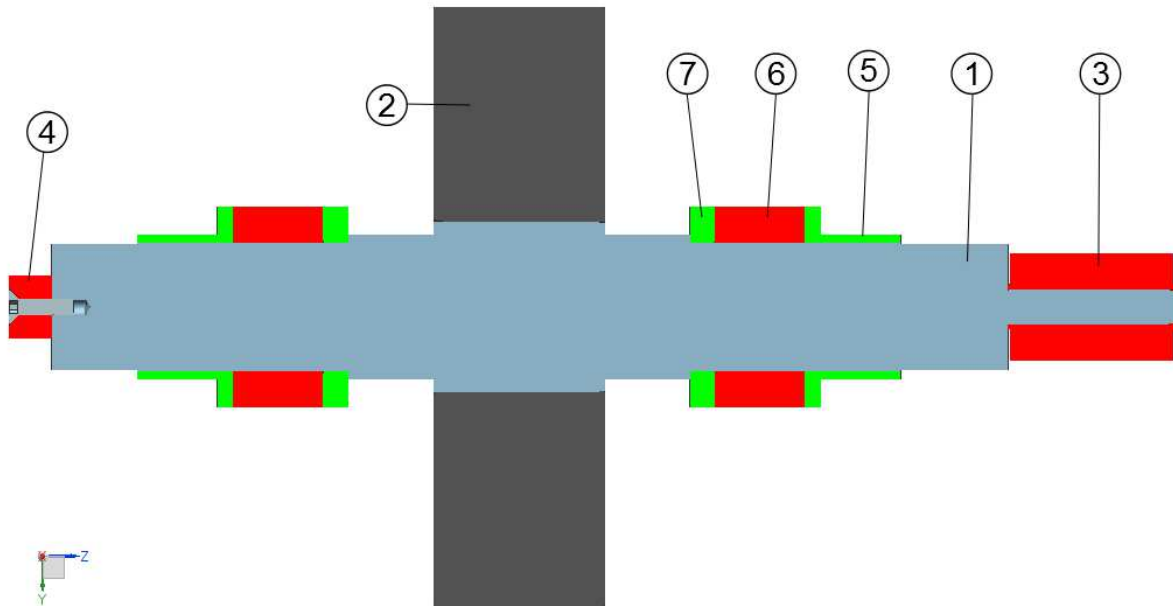
$$\tau \leq \tau_D \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

5.2.8 Setrvačník rotoru baterie

Byl zvolen setrvačník z jednoho kusu materiálu ze slitiny hliníků EN AW 2007. Nízká hustota materiálu umožňuje uložit menší množství energie, ale pro účely demonstrace je dostačující a s baterií se bude díky menší hmotnosti snáze manipulovat. Materiál je běžně dostupný a dobře obrobitelný.

Pevnostní kontrola setrvačníku je spojena s výpočtem nalisování.

5.2.9 Sestava rotoru baterie



Obr. 5.17 – Sestava rotoru baterie - řez

1 hřídel rotoru baterie, 2 setrvačnick rotoru baterie, 3 rotor motor-generátoru, 4 permanentní magnet axiálního ložiska, 5 cíl snímačů, 6 rotorové plechy radiálního magnetického ložiska, 7 zarážka rotorových plechů.

Součásti 2, 5, 6, 7 jsou na hřídeli 1 nalisovány. Součást 4 je připevněna šroubem a součást 3 přilepena.

Výpočet nalisování setrvačnicku [5]:

Dáno: $d_1=40\text{mm}$; $d_2=140\text{mm}$; $M_k=1,02\text{Nm} = 1020\text{Nmm}$; $l=35\text{mm}$; $n=10000\text{ ot.min}^{-1}$

Materiál: Dural EN AW 2007

$R_{p0,2}=250\text{MPa}$; $E=7,25 \cdot 10^4\text{ MPa}$; $G=2,75 \cdot 10^4\text{ MPa}$; $\nu=0,34$; $f=1$; $\rho=2850\text{kg.m}^{-3}$

Potřebný tlak ve spoji:

$$P = \frac{2M_k k}{\pi d_1^2 l f} = \frac{2 \cdot 1020 \cdot 2}{\pi \cdot 40^2 \cdot 35 \cdot 1} = 0,0232\text{Mpa}$$

Potřebný přesah pro vyvození tlaku P:

$$a = \frac{d_2}{d_1} = \frac{140}{40} = 3,5$$

$$C = \frac{(a^2 + 1)}{(a^2 - 1)} = \frac{(3,5^2 + 1)}{(3,5^2 - 1)} = 1,18$$

$$\Delta d_p = \frac{P \cdot d_1}{E} (C + 1) = \frac{0,0232 \cdot 40}{7,25e^4} (1,18 + 1) = 2,7904e^{-5} = 0,000028\text{mm}$$

Zvětšení přesahu o uvažované ohlazení při montáži:

$$\Delta d_z = 1,2(R_{zh} + R_{zd}) = 1,2(2 + 2) = 4,8e^{-3}\text{mm} = 0,0048\text{mm}$$

Zvětšení přesahu o uvažovanou deformaci při maximálních otáčkách:

$$D_{\omega} = \frac{\rho \omega^2}{8} = \frac{\rho \pi^2 n^2}{2 \cdot 60^2} = \frac{2850 \cdot \pi^2 \cdot 10000^2}{2 \cdot 60^2} = 390,672e^6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\begin{aligned} \sigma_t &= 2D_{\omega}[(1 - \nu)r_1^2 + (3 + \nu)r_2^2] = \\ &= 2 \cdot 390,672e^6 \cdot [(1 - 0,34) \cdot 0,02^2 + (3 + 0,34)0,07^2] = 12,99e^6 \text{ Pa} = 13 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\Delta d_r = \frac{d_1 \sigma_t}{E} = \frac{40 \cdot 12,99}{7,25e^4} = 0,007 \text{ mm}$$

Určení celkového minimálního přesahu:

$$\Delta d = \Delta d_p + \Delta d_z + \Delta d_r = 0,000028 + 0,0048 + 0,007 = 0,012 \text{ mm}$$

Určení uložení:

$$H7_0^{+25} / s7_{+43}^{+68}$$

Pevnostní kontrola:

Nebezpečné místo je průměr otvoru setrvačníku, proto je s ním počítáno.

$$\sigma_D = \frac{R_{p0,2}}{k} = \frac{250}{1,5} = 166,67 \text{ MPa}$$

$$P_D = \frac{\sigma_D}{C + 1} = \frac{166,67}{2,18} = 76,45 \text{ MPa}$$

$$P_{maxL} = \frac{\Delta d_{max} E}{d_1(C + 1)} = \frac{0,068 \cdot 7,25e^4}{40 \cdot (1,18 + 1)} = 56,54 \text{ MPa}$$

$$P_{maxR} = \frac{\sigma_t}{C} = \frac{13}{1,18} = 11 \text{ MPa}$$

$$P_{max} = P_{maxL} + P_{maxR} = 56,54 + 11 = 67,54 \text{ MPa}$$

$$P_{max} < P_D \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

$$\sigma_{red} = P_{max}(C + 1) = 56,54 \cdot (1,18 + 1) = 118,94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{red} < \sigma_D \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Potřebná lisovací síla:

$$F_t = \pi d l P_{maxL} f = \pi \cdot 40 \cdot 35 \cdot 56,54 \cdot 1 = 248676 \text{ N}$$

Výpočet lepeného spoje rotoru motoru:

Dáno: $d_1=7,8\text{mm}$; $M_k=1,02\text{Nm}=1020\text{Nmm}$; $l=39,5\text{mm}$;

Napětí v lepeném spoji:

$$\tau_t = \frac{2M_k}{d_1^2 \cdot \pi \cdot l} = \frac{2 \cdot 1020}{7,8^2 \cdot \pi \cdot 39,5} = 0,27\text{MPa}$$

Pevnost běžných lepidel na kov udává výrobce [29] mezi 13-15MPa. Z toho plyne, že spoj vyhoví s dostatečnou bezpečností.

Technologický postup výroby rotoru baterie:

Setrvačnick rotoru se vyrobí na soustruhu z polotovaru $\varnothing 150 \times 45\text{mm}$ podle výkresu č.402

Hřídel rotoru se vyrobí na soustruhu z polotovaru $\varnothing 40 \times 300\text{mm}$ podle výkresu č. 401

Pro obě součásti se použije materiál EN AW 2007

Po nalisování všech součástí podle výkresu sestavy č. 400 se celý rotor obrobí na čisto podle výkresu č. 405 a vyváží se.

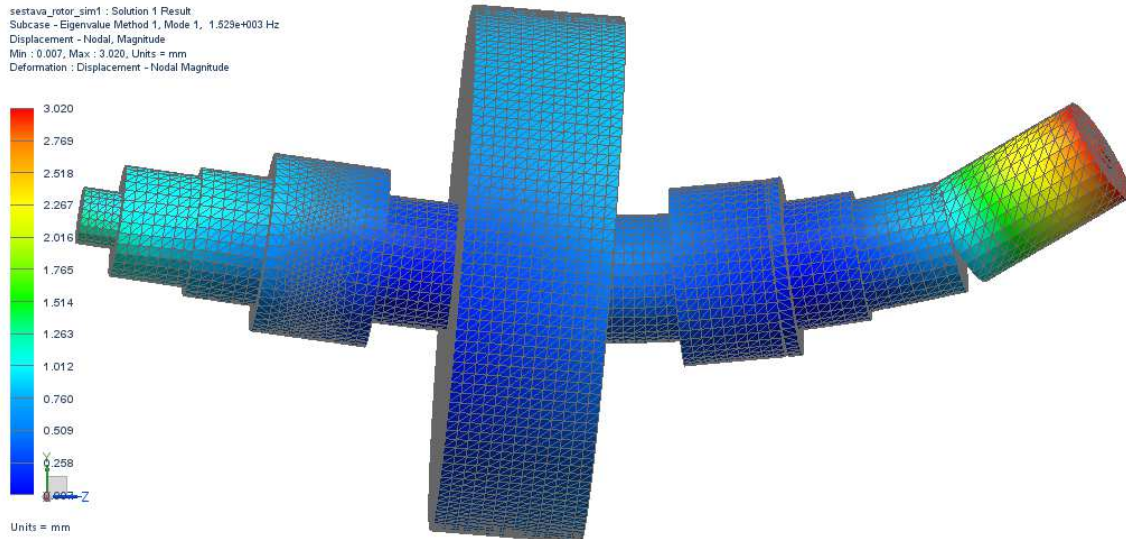
Modální analýza sestavy rotoru

Modální analýza zjistí hodnoty vlastních tvarů a frekvencí. Pokud by se shodovaly vlastní frekvence s frekvencí buzenou rotorem došlo by k rezonanci, náhlému silnému rozkmitání rotoru a v krajním případě až k jeho destrukci. Je-li to možné je třeba se vlastním frekvencím vyhnout, případně je rychle překonat. Největší deformace nastávají při první vlastní frekvenci, která je proto nejvíce nebezpečná.

S hřídelí jsou všechny součásti pevně spojeny nalisováním nebo šroubovým spojem a tvoří spolu tuhý celek, proto i součásti modelu jsou sítí spojeny v jeden celek. Modální analýza není obecně náročná na kvalitu sítě, proto byla použita tetraedrová síť (CTETRA(4)) s velikostí elementů 3mm, která zkrátí čas výpočtu.

Jelikož je rotor baterie uložen v magnetických ložiscích a volně levituje v magnetickém poli, nejsou při výpočtu použity žádné vazby. Aby se nezobrazovaly vlastní frekvence odpovídající šesti stupňům volnosti tuhého tělesa, byl nastaven spodní limit frekvenčního pásma na 10Hz. Pro výpočet je použit řešič NX NASTRAN, typ řešení SOL 103 Real Eigenvalues.

Baterii je plánováno využívat v pásmu otáček od 0 do 10 000 ot/min, tomu odpovídá frekvenční pásmo 0 až 167 Hz. Podle výpočtu se první vlastní frekvence objevuje kolem 1500 Hz, to odpovídá 90 000 ot/min. Je patrné, že celé uvažované pásmo otáček rotoru baterie je dalece vzdáleno první vlastní frekvenci a nebude ji muset přecházet.



Obr. 5.18 – 1. Vlastní frekvence rotoru baterie

Tabulka 5.1 vlastní frekvence rotoru baterie

Pořadí vlastní frekvence	Hodnota vlastní frekvence [Hz]
1. Vlastní frekvence	$1,529e^3$
2. Vlastní frekvence	$1,532e^3$
3. Vlastní frekvence	$2,943e^3$
4. Vlastní frekvence	$2,948e^3$
5. Vlastní frekvence	$3,782e^3$
6. Vlastní frekvence	$3,795e^3$

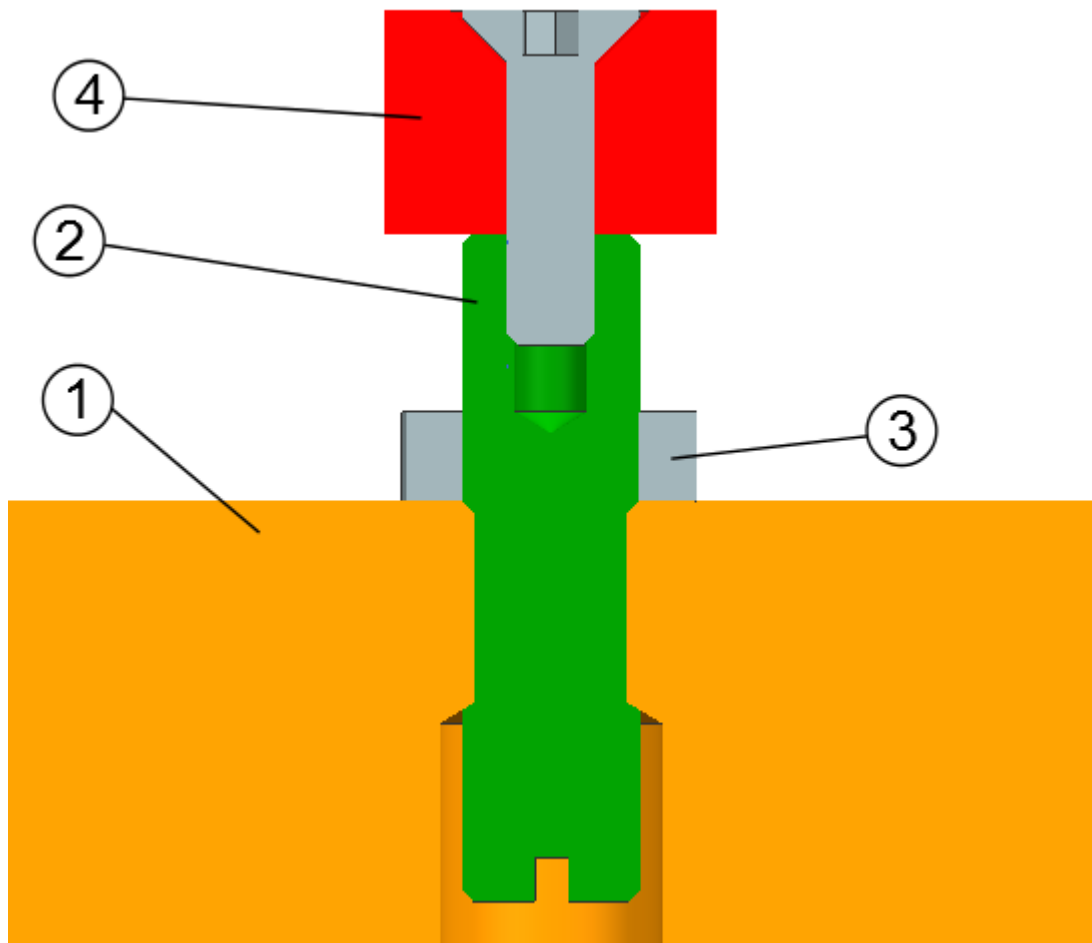
Je patrné, že vlastní frekvence uvedené v tabulce 5.1 se objevují ve dvojici mající téměř stejnou hodnotu. Je to způsobeno rotační symetrií tělesa. Deformace rotoru by měla být stejná, ale pootočená o 90°

5.2.10 Axiální ložiska

Pro zachycení axiálních sil se využijí pasivní magnetická ložiska vlastní konstrukce. Axiální ložisko se skládá ze dvou neodymových magnetů, které jsou k sobě natočeny souhlasnými póly, takže se odpuzují. Stavěcím šroubem 2 se nastaví vhodná vzdálenost mezi magnety, aby rotor levitoval mezi záchytnými ložisky. Za současného přidržení stavěcího šroubu 2 se dotáhne pojistná matice 3. Stavěcí šroub je uvažován s jemným závitem se stoupáním 0,75mm.



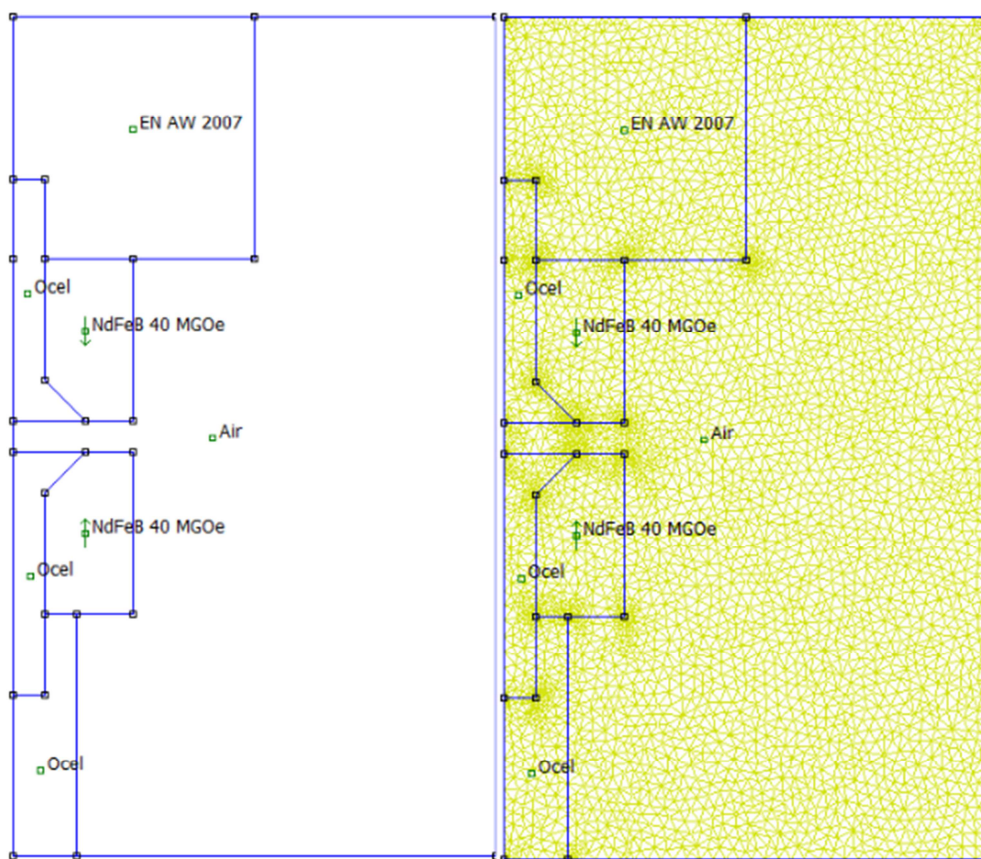
Obr. 5.19 – Neodymové magnety axiálního ložiska [17]



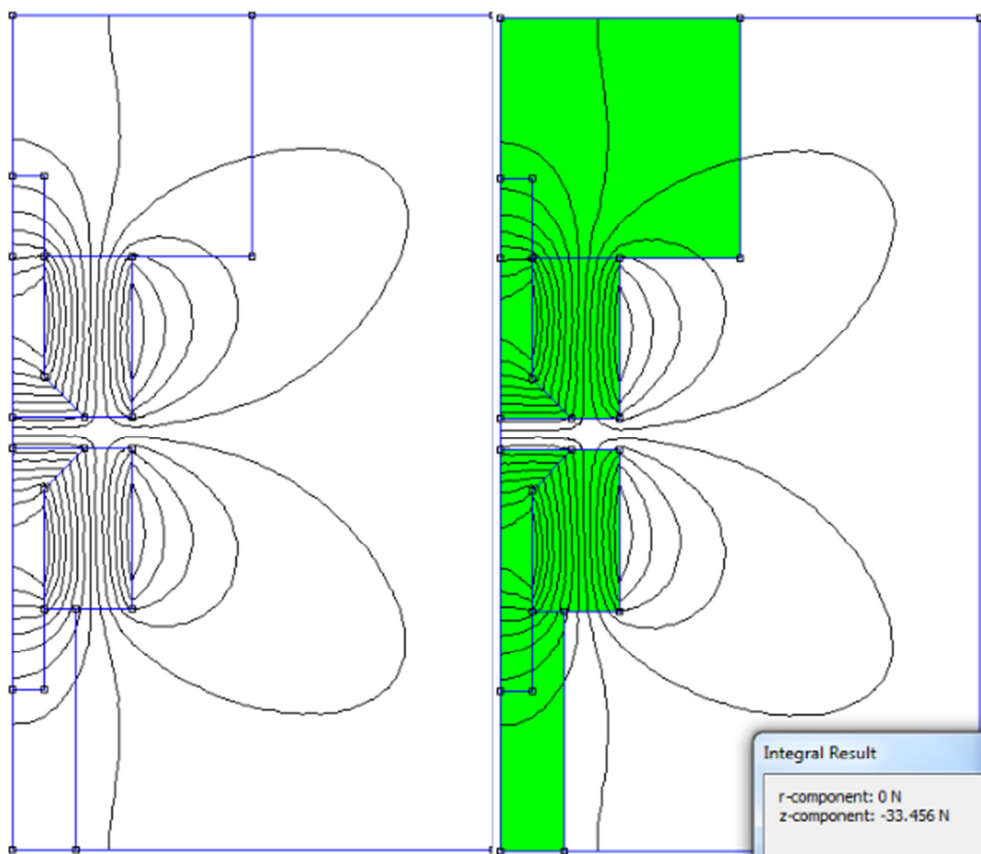
Obr. 5.20 – Sestava domku axiálního ložiska - řez

1 domek axiálního ložiska, 2 stavěcí šroub axiálního ložiska, 3 pojistná matice, 4 permanentní magnet

Ověření funkčnosti ložiska a přibližný výpočet vzdálenosti mezi neodymovými magnety je proveden pomocí softwaru FEMM 4.2. Pro výpočet je postaven rotačně symetrický 2D model, do kterého byly přiřazeny materiály jednotlivých součástí. Síť je vytvořena automaticky a má 5543 uzlů. Úloha je řešena jako magnetický problém. Odpuzující síla při vzdálenosti magnetů 2mm vychází 33N. Magnetická odpudivá síla velmi prudce klesá nebo stoupá se vzdáleností magnetů, takže pro rotor s tíhou 28N se dá předpokládat právě vzdálenost magnetů kolem 2mm.

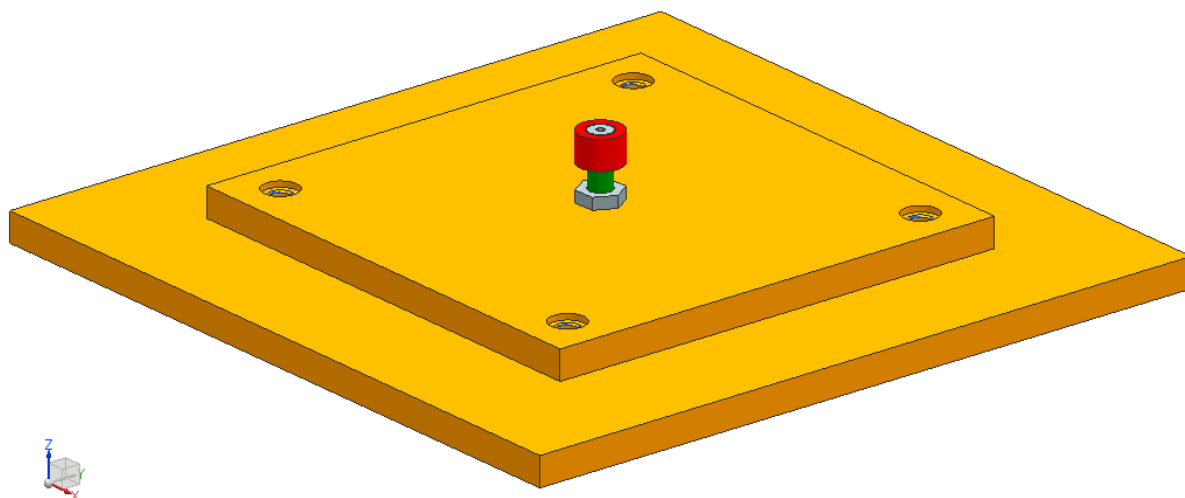


Obr. 5.21 – 2D model s okrajovými podmínkami a sítí



Obr. 5.22 – Ukázka siločar a výsledné odpuzivé síly

5.2.11 Sestava domku axiálního ložiska

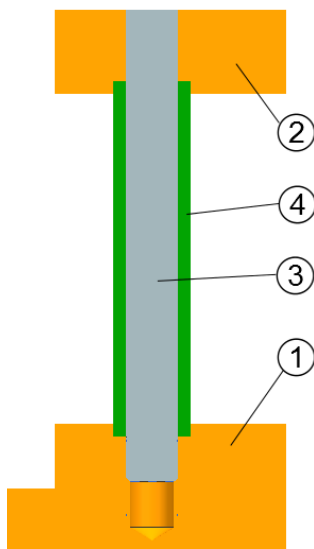


Obr. 5.23 – Sestava domku axiálního ložiska

5.2.12 Sestava rámu

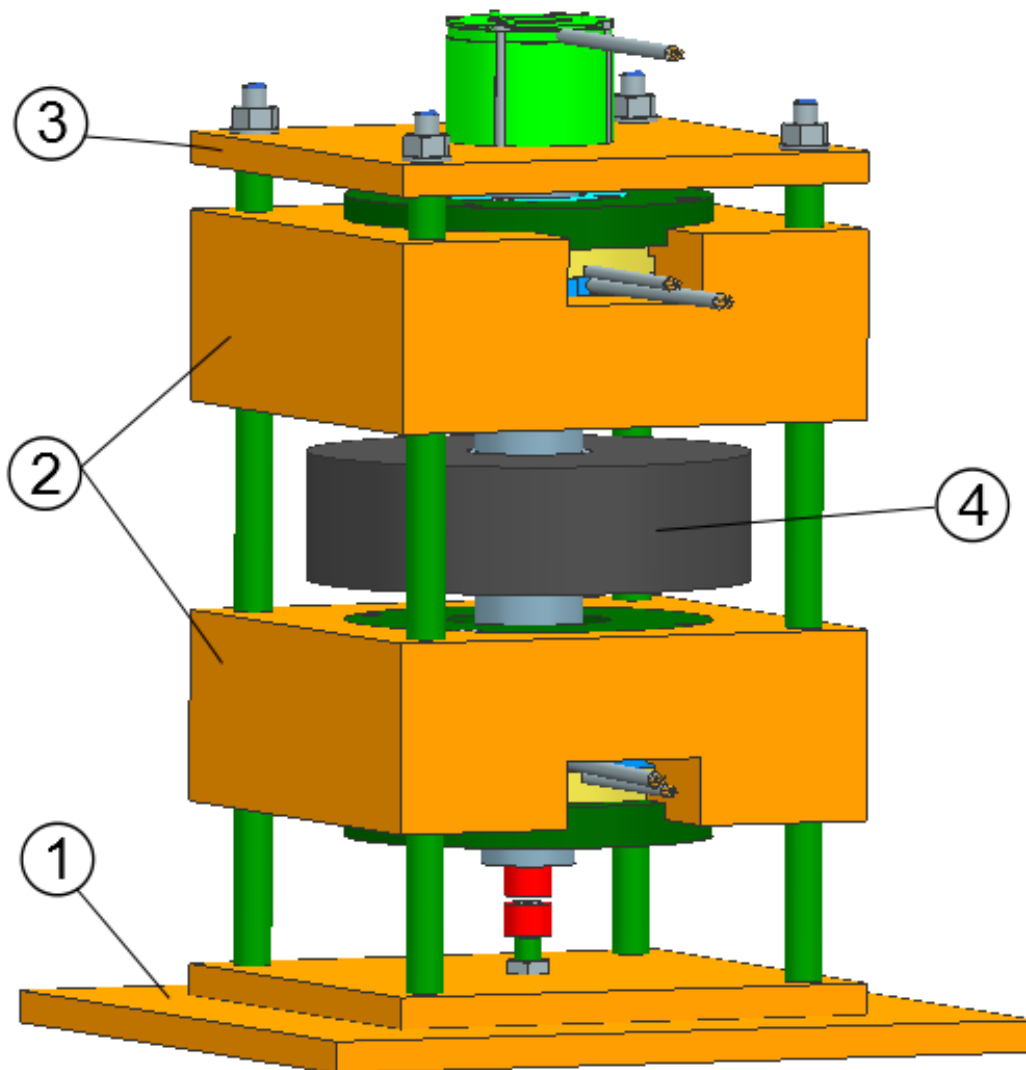
Rám zajišťuje tuhé a přesné uložení ložiskových domků. Zároveň umožňuje pohled na komponenty demonstrátoru.

Rám baterie je tvořen domky radiálních ložisek, domkem motor-generátoru a axiálního ložiska. Domky jsou spojeny svorníky, na nichž jsou nasunuta vymežovací pouzdra. Vymežovací pouzdra jsou slícována s válcovým zahlabením na domkách ložisek a motor-generátoru. Tím je zajištěna souosost všech domků, jimiž prochází rotor.



Obr. 5.25 – Řez svorníkem

1 domek axiálního magnetického ložiska, 2 domek radiálního magnetického ložiska, 3 svorník, 4 vymežovací pouzdro.



Obr. 5.24 – Sestava mechanické baterie

1 domek axiálního magnetického ložiska, 2 domky radiálních magnetických ložisek, 3 domek motor-generátoru, 4 rotor baterie

5.2.13 Sestava baterie

Technické parametry navržené baterie

Hmotnost celková	16,2kg
Hmotnost rotoru	M= 2,828kg
Poloměr setrvačnosti rotoru	R= 62,786mm
Maximální otáčky	n= 8100 ot/min

Maximální kapacita baterie:

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{\pi \cdot 8100}{30} = 848 \text{ rad/s}$$

$$J = MR^2 = 2,828 \cdot 0,062786^2 = 0,011148 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,011148 \cdot 848^2 = 4008 \text{ J}$$

Baterie bude provozována v optimálním režimu mezi otáčkami n_1 a n_2 , které se zjistí při testování po sestavení baterie. Nyní je možno otáčky odhadnout na $n_1=5000\text{ot/min}$ a $n_2=8000\text{ot/min}$, tomu pak odpovídá kapacita cca 2380J to umožní elektromotoru o výkonu 50W točit se přibližně 46 sekund. V reálném případě to bude méně, protože nebyly započítány ztráty.

Experiment je plánované využívat pro výukové účely demonstrace systému KERS a levitace v magnetických ložiscích. Později, až se otestuje a odladí, bude na něm možné simulovat různé jízdní cykly pro různá vozidla.

Při používání, je plánováno, že demonstrátor bude umístěný na stole. Mechanická baterie bude připevněna ke stolu upínkami nebo svěrkami, aby nemohlo dojít k jejímu posouvání vlivem vibrací a případnému pádu ze stolu.

5.3 Simulátor jízdních podmínek

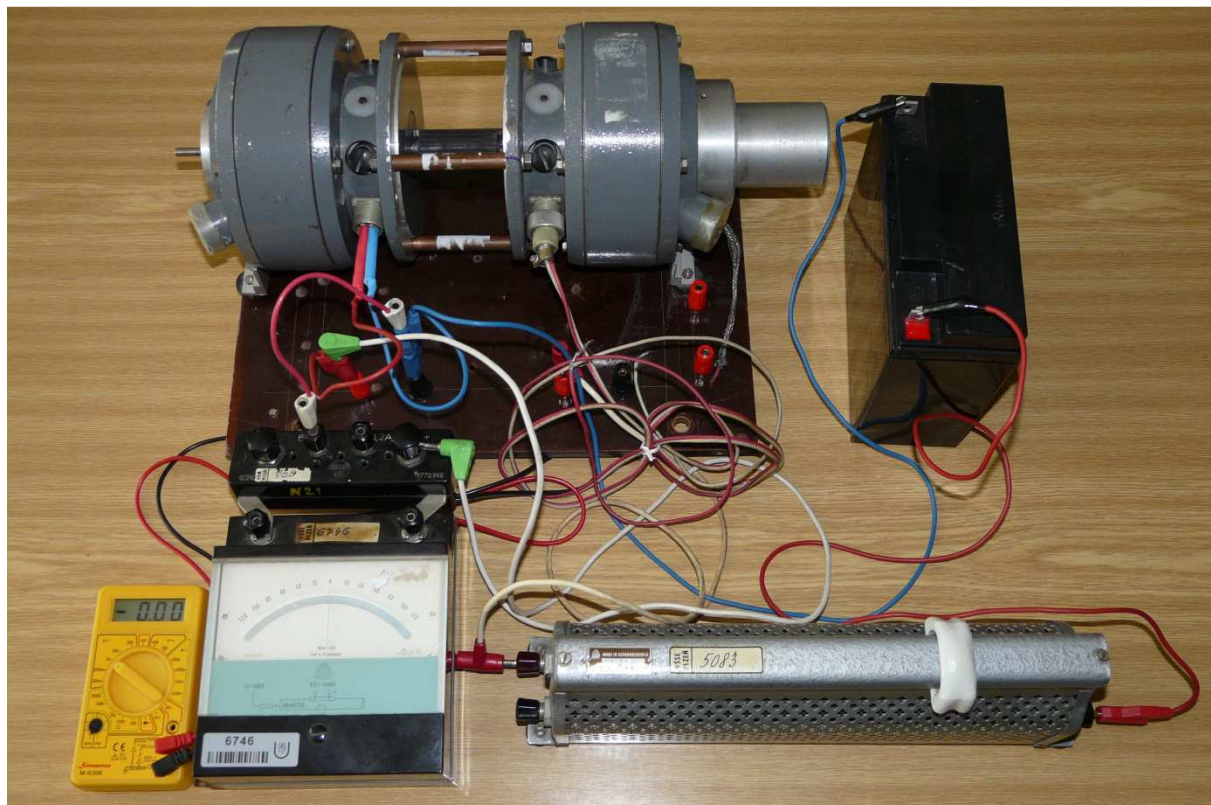
Byla vybrána koncepce dvou elektromotorů se spojenými hřídelemi. Jeden motor představuje motor-generátor, který buď pohání vozidlo, nebo rekuperuje nadbytečnou energii. Druhý motor simuluje jízdní odpory. Jízdní odpory budou simulovány v měřítku k uvažovanému vozidlu a jeho parametrům. Změna jízdních odporů se docílí řízením motoru pro simulaci jízdních podmínek, viz kapitola 6.

Pro simulátor se využijí dva stejnosměrné motory z vybavení laboratoře. Na motorech chybějí štítky s označením, takže jejich parametry se musely zjistit experimentálně.

Motory jsou uloženy na desce, ve které jsou umístěny napájecí svorky pro přehledné zapojení.

Technické parametry motorů:

Výkon	50W
Napájecí napětí	12V
Napájecí proud	5A
Otáčky	700ot/min



Obr. 5.26 – Experiment pro zjištění parametrů motorů

6 Návrh způsobu akvizice dat a řízení experimentu

Celý experiment bude ovládán prostřednictvím osobního počítače. Software pro řízení experimentu a akvizici dat se nabízí buďto LabView nebo MATLAB. Oba dva nabízejí jednak výpočetní prostředí pro vývoj modelu vozidla a simulaci, jednak rozhraní na fyzické soustavy prostřednictvím různých měřících karet a podobných zařízení, jednak prostředí pro vývoj uživatelského rozhraní. Pro účely této práce je zvolen software MATLAB s nadstavbou Simulink.

Významná část systému je řídicí jednotka magnetických ložisek, popsaná kapitole 5.2. Řídicí jednotka magnetických radiálních ložisek obsahuje vlastní systém pracující na TI320, ke kterému lze přistupovat z MATLABu přes sériovou linku a nastavovat parametry regulátoru, popř. monitorovat stav zařízení pomocí vestavěných sensorů.

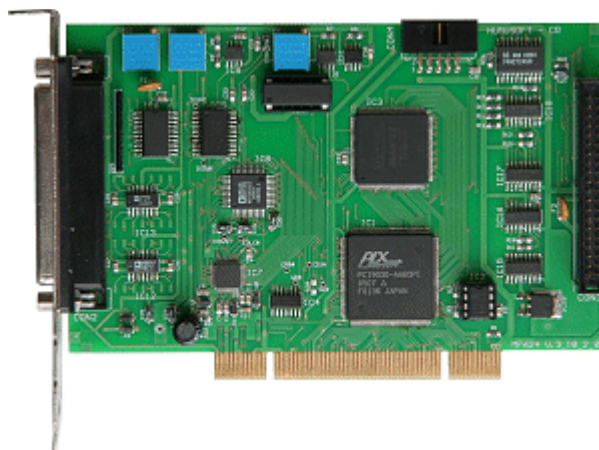
Hardware potřebný k ovládní zbývajících částí experimentu může být některá z podporovaných převodníkových karet. Ideální volba je MF624, alternativně AD622.

Popis karty MF 624 [30]:

Multifunkční vstupně výstupní karta MF 624 je navržena pro potřeby propojení počítačů PC a kompatibilních se signály v reálném světě. Tato karta obsahuje 8-kanálový rychlý 14-bitový A/D převodník, 8-bitový digitální vstupní port a 8-bitový digitální výstupní port, 4 kvadraturní kódovací vstupy s jednoduše zakončeným nebo rozdílovým rozhraním a 5 časovači nebo čítači. Karta je navržena pro standardní získávání dat a řídicí aplikace a je optimalizována pro použití s toolboxem "Real Time" pro Simulink®. Karta má plnou 32-bitovou architekturu pro vysokou propustnost.

Parametry karty:

- Osm 14-bitových analogových vstupů
- Osm 14-bitových analogových výstupů
- 8 digitálních vstupů, 8 digitálních výstupů
- Krátká doba převodu
- 4 vstupy inkrementálních snímačů (diferenciální)
- 4 čítače/časovače
- Nízká spotřeba
- Ovladač pro Real Time Toolbox pro MATLAB
- Ovladač pro Real-Time Windows Target
- Ovladač pro xPC Target
- Ovladač pro Windows, 32 i 64-bitové aplikace



Obr. 6.1 - Měřící karta MF624 [30]

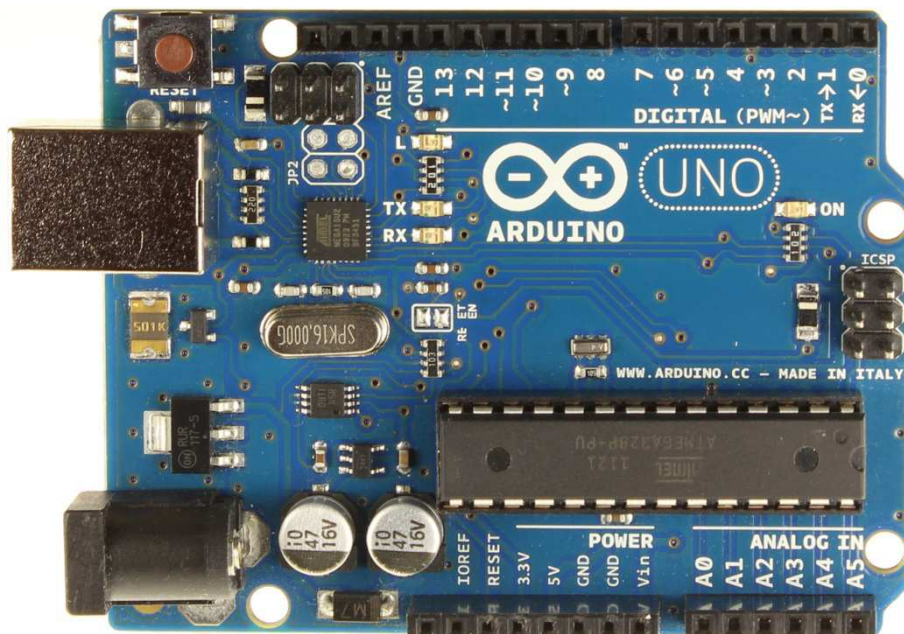
Jako levná alternativa je možné využít také desku Arduino, která nabízí dostatečný počet, dostatečně rychlých (pro naši aplikaci) vstupů a výstupů. Deska Arduino jde jednoduše naprogramovat (C++ nebo MATLAB) a provozovat jako embedded modul, jednoduše ji lze ovládat přímo z MATLABu a může být využita podobně jako mnohem dražší převodníková karta.

Popis desky Arduino [31]:

Arduino Uno je mikrokontrolerová deska založená na ATmega328. Má 14 digitálních vstupně/výstupních pinů (ze kterých může být 6 použito jako PWM výstupy), 6 analogových vstupů a 16 MHz keramický rezonátor, USB připojení, napájecí konektor, ICSP konektor a resetovací tlačítko. Obsahuje vše potřebné pro potřebu mikrokontroleru; je jednoduše zapojitelný do počítače s USB kabelem nebo může být napájen AC-DC adaptérem nebo baterií.

Parametry desky:

Mikrokontroler	ATmega328
Provozní napětí	5V
Vstupní napětí (doporučené)	7-12V
Vstupní napětí mezní)	6-20V
Digitální I/O piny	14 (ze kterých 6 zajišťuje PWM výstup)
Analogové vstupní piny	6
DC proud na I/O pin	40 mA
DC proud pro 3.3V pin	50 mA
Flash paměť	32 KB (ATmega328) ze kterých 0.5 KB použito jako zavaděč
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Frekvence	16 MHz



Obr. 6.2 - Deska Arduino Uno [31]

Program pro zpracování dat z experimentu je vytvořen v prostředí MATLAB-Simulink, verze 2013a. Využívá standardní zobrazovací nástroje a bloky pro zpracování signálu Simulinku. Pro propojení s experimentem je navržena nadstavba Simulinku Real Time Windows Target (pro karty MF624 a AD622) popř. Arduino IO, Arduino Simulink Target (pro desku Arduino). Výhodou posledních verzí MATLABu je, že obsahují rozhraní na platformu Arduino a lze tak velmi snadno kombinovat rozsáhlé výpočetní možnosti MATLABu s měřením na reálné fyzikální soustavě, porovnávat výsledky, řídit soustavu apod.

Pro návrh grafického uživatelského rozhraní lze použít nástroj GUIDE z prostředí MATLABu. Grafické prostředí bylo navrženo jen rámcově a je uvedeno na obrázku 6.4

Experiment bude osazen sensory:

- enkodér pro snímání otáček motoru
- proudové sensory pro měření proudu v obou motorech (simulátor jízdních režimů) – nepřímé měření momentu

Prostřednictvím PWM výstupů bude řízen motor sloužící jako simulátor jízdy. Parametry výstupu budou generovány z modelu jízdního cyklu vytvořeného v Simulinku. Tvorba tohoto modelu je mimo rámec této diplomové práce. Model je v Simulinkovém schématu naznačen jako Subsystem Model jízdního cyklu.

Na obrázku 6.3 je naznačen způsob zpracování dat s využitím desky Arduino.

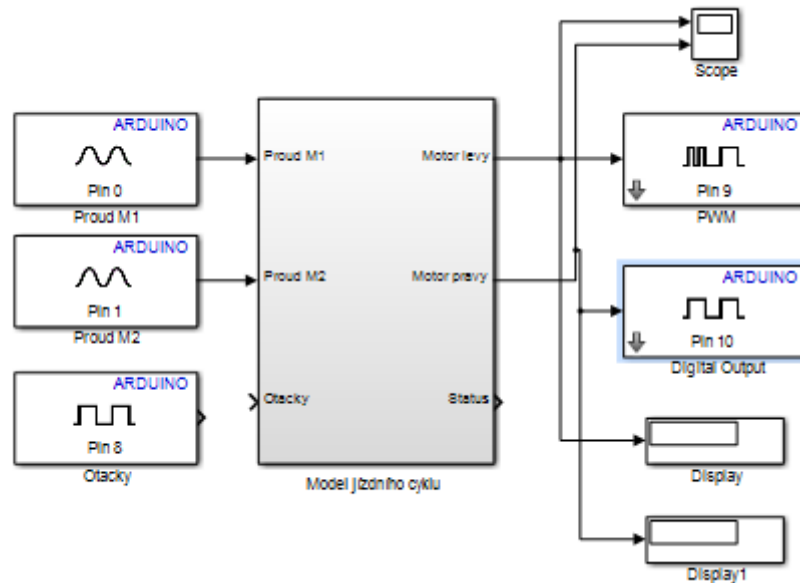
Program (viz obrázek 6.3) velikost proudu ze sensorů na vstupních kanálech A0, A1, otáčky motoru na kanálu A2. Hodnoty jsou vstupem do Modelu jízdního cyklu, který generuje průběh otáček a posílá je přes PWM výstup do regulátoru motoru.

Regulátor motoru je tvořen můstkem Sabertooth 2x5, který je v našem případě řízen v RC módu, tj. podobně jako modelářské servo délkou pulsu (alternativně by bylo možné použít jiný způsob řízení H-můstku popř. použít jiný můstek s proudy alespoň 2A)

Aktuálně měřená data jsou zobrazována na třech zařízeních typu Display a vykreslovány pomocí bloku Scope. Kromě toho je možné data ukládat do pracovního prostoru MATLABu pro další zpracování pomocí bloku To Workspace.

Toto jednoduché uživatelské rozhraní lze pomocí nástroje GUIDE začlenit do aplikace běžící na MATLABu, obsahující obvyklé prvky grafického uživatelského rozhraní, jako jsou tlačítka, vstupní pole, grafy, zobrazování hodnot, přepínače, apod.

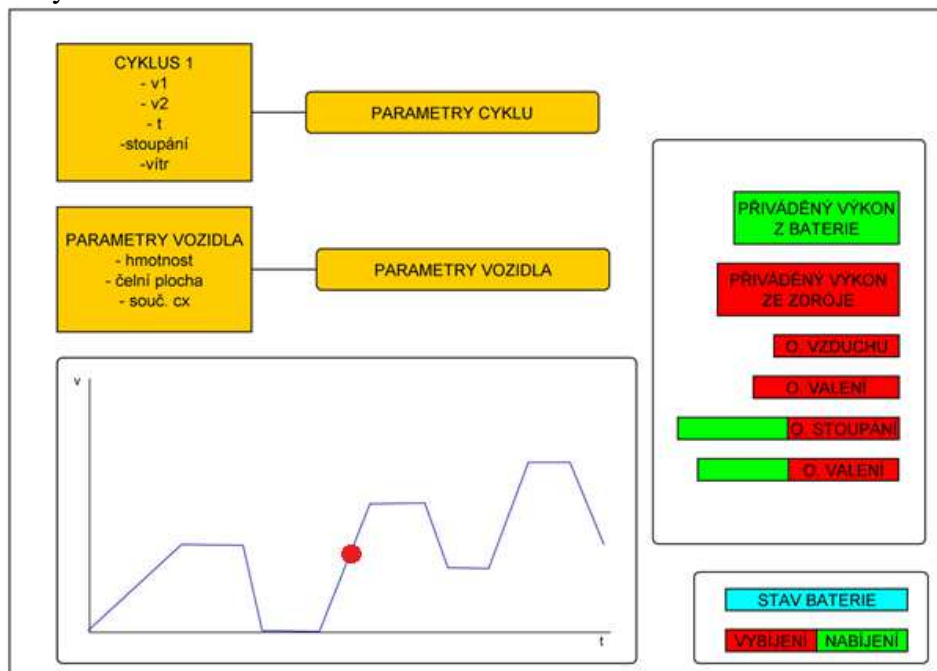
V případě požadavku na využívání tohoto způsobu zpracování dat je možné jednak rozšířit schema v Simulinku (např. čtení z dalších sensorů, řízení aktuátorů a pohonů, rozsáhlejší zpracování dat, filtrace signálů, apod.), jednak je možné vytvořit rozsáhlejší aplikaci běžící v MATLABu, přímo pod operačním systémem na PC nebo na nějaké jiné cílové platformě.



Obr. 6.3 – Akvizice dat v Simulinku

V grafickém uživatelském rozhraní bude možné zadat parametry simulovaného vozidla, jízdní cyklus a jízdní odpory, případně i detailnější parametry vozidla například odstupňování převodů či výkon odebíraný komfortními systémy vozidla.

Zvolený jízdní cyklus se bude skládat z jednotlivých příkazů změn rychlosti v čase. Jeden příkaz bude tvořen zadáním počáteční rychlosti, koncové rychlosti, času, za kterou se změna rychlosti provede. K cyklu bude možné zvolit jízdní podmínky (druh a stav vozovky, síla větru, sklon stoupání nebo klesání) a parametry vozidla (hmotnost, čelní plocha, součinitel odporu vzduchu C_x). Na grafech se bude v reálném čase ukazovat aktuální hnací síla a výkon. Grafy bude také znázorněno, kolik energie se vozidlu přivádí, kolik je energie rekuperováno nebo zpětně využíváno.



Obr. 6.4 – Návrh grafického uživatelského rozhraní

7 Předpokládané pořizovací náklady

Náklady na materiál

POLOŽKA	MATERIÁL	POLOTOVAR [mm]	HMOTNOST [kg]	POČET KS	CENA [Kč/1]	CENA [Kč]
1	EN AW 5754	Ø120X15	0,458	2	86	78,78
2	EN AW 5754	70X70X4	0,053	2	86	9,12
3	EN AW 5754	170X170X62	4,828	2	86	830,42
4	EN AW 5754	245X245X25	4,052	1	86	348,47
5	EN AW 5754	120x120x4	0,156	2	86	26,83
6	EN AW 5754	165X165X12	0,735	1	86	63,21
7	EN AW 2007	Ø150X45	2,227	1	91	202,66
8	EN AW 2007	Ø40X300	1,07	1	91	97,37
9	INCONEL 600	Ø50X7	0,113	2	909	205,43
10	INCONEL 600	Ø50X25	0,402	2	909	730,84
SUMA						2 593,12

POLOŽKA	NÁZEV SOUČÁSTI	CENA [Kč]
11	Motor BN2323, kontrolér BDP-Q2-50-10	34424
12	Trubka Ø12x1,5x650mm, EN AW 6082 T6	40
13	Ostatní (šrouby, matky, lepidlo, závitová tyč)	300
SUMA		34764

Náklady na práci

ČAS PRÁCE [h]	CENA ZA HODINU PRÁCE [Kč/h]	CENA [Kč]
10	900	9000

NÁKLADY CELKEM		46 357 Kč
-----------------------	--	------------------

8 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo prokázat potenciál systému KERS, provést rešerši používaných principů a konstrukčních řešení, rozpracovat a navrhnout experiment pro demonstraci systému KERS v laboratorních podmínkách, rámcově navrhnout akvizici dat a řízení experimentu.

Pro prokázání smysluplnosti a potenciálu systému KERS je zpracována energetická bilance. Výpočty prokázaly, že energie potřebná pro zrychlení vozidla má dominantní podíl (na příkladu s referenčním vozidlem 93%) z celkové energie dodané během zvoleného cyklu. Je zřejmé, že dodávat stále znovu takové množství energie při každém zrychlení není výhodné a systém KERS, který dokáže pomocí rekuperace kinetické energie tuto energii potřebnou pro zrychlení snížit, je cestou k úspoře pohonných hmot a tím i k úspoře finančních prostředků a menšímu množství emisí v ovzduší.

V rešeršní části jsou popsány principy technologií s jejich výhodami a nevýhodami. Jsou ukázány a popsány konkrétní aplikace, které jsou již ve formě prototypů, zkušebním provozu nebo se uplatňují při závodech na okruzích.

V kapitole varianty konstrukčních řešení pro demonstrátor jsou rozpracovány různé koncepce použitelných principů a technologií se zhodnocením jejich vhodnosti pro náš laboratorní experiment.

Konstrukční návrh má několik podkapitol. Zahrnuje v sobě možné způsoby řešení jednotlivých částí mechanické baterie s popisem. U vybraných řešení jsou uvedeny potřebné výpočty pro návrh a kontrolu, popsané 3D modely, MKP simulace, modální analýza, popis funkce jednotlivých částí a zpracována výkresová dokumentace. U simulátoru jízdních režimů je ukázáno zvolené řešení s využitím dvou stejnosměrných motorů.

Návrh způsobu akvizice dat a řízení experiment zahrnuje popis vhodného hardwarového vybavení (měřících karet, desek, regulátoru motoru), popis možného softwarového vybavení (MATLAB, Simulink). Schéma řízení experimentu v softwaru Simulink. Na obrázku je ukázána možná vizuální podoba grafického uživatelského rozhraní s popisem zadávání parametrů jízdního cyklu a okrajových podmínek.

Na konci textové části jsou rozepsány odhadované náklady na realizaci experimentu.

9 Použitá literatura.

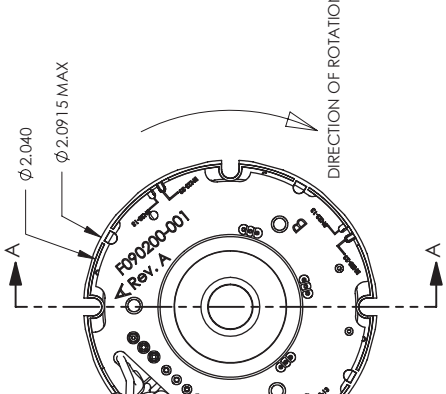
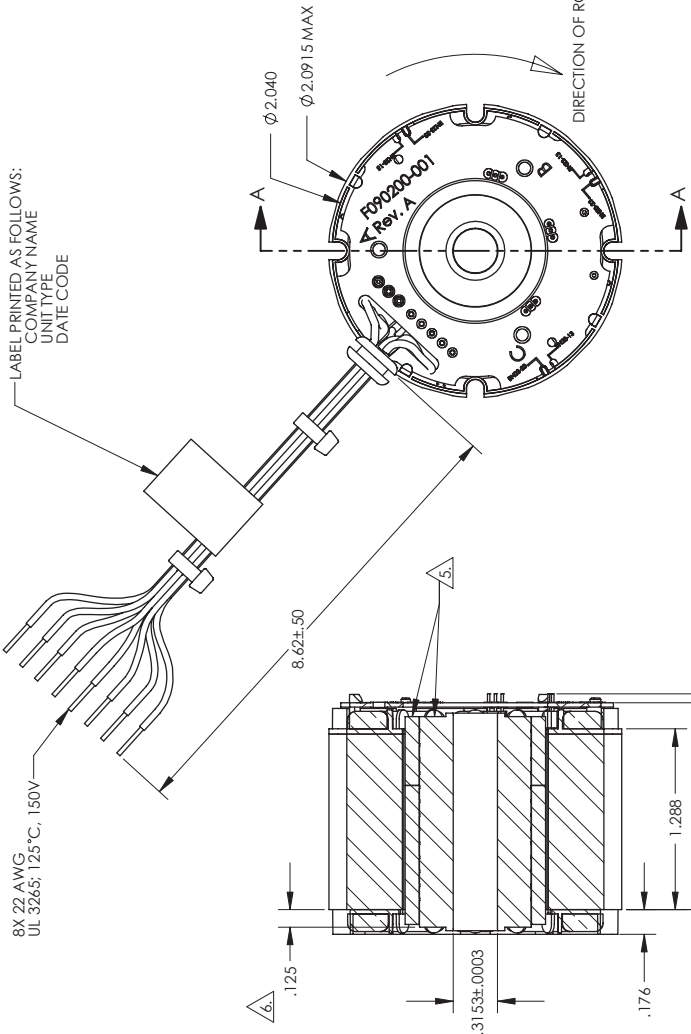
- [1] PHIL LINO GUZZAELLA, ANTONIO SCICARRETTA. *Vehicle Propulsion Systems Introduction to Modeling and Optimization*. Springer, 2. edice, 2007
- [2] RAJAMANI R. *Vehicle Dynamics and Control*. New York, Springer – Verlag 2006
- [3] HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. *Příručka strojního inženýra I*. Brno: Computer Press, 1999. ISBN 80-7226-055-3
- [4] LEINVEBER, J., VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. Úvaly: Albra, 2003. ISBN 80-86490-74-2
- [5] BOLEK, A., KOCHMAN, J. *Části strojů I. svazek*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-00046-7
- [6] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0024-2
- [7] <http://www.green.autoblog.com/2007/04/20/sae-world-congress-ups-delivery-truck-with-fev-hydraulic-series/>
- [8] <http://www.ret-monitor.com/articles/1082/magneti-marelli-electrical-kers/>
- [9] <http://www.wired.com/autopia/2010/10/flywheel-hybrid-system-for-premium-vehicles/>
- [10] <http://www.auto.cz/porsche-911-gt3-r-hybrid-2610>
- [11] <http://www.extremetech.com/extreme/92794-kers-of-the-hybrid-car-flywheels-and-ultracapacitors-give-you-a-10-second-jolt>
- [12] <http://www.autoblog.com/2010/02/11/videos-porsche-911-gt3-r-hybrid-uses-williams-f1-flywheel-kers/>
- [13] <http://www.sport-prestige.com/253765/porsche-911-kers/>
- [14] <http://www.autoline.tv/journal/?p=545>
- [15] <http://www.teatechnik.cz/magneticke-spojky-1/>
- [16] http://www.mcfarlandassociates.net/mac_products/motors/servo_motors/brushless_servo_motors/rotor_stator_part_sets/bps2300_brushless_rotor_stator_part_set.html
- [17] <http://unimagnet.cz/94-magnet-KR-15-04-10-N.html>
- [18] <http://www.tc.gc.ca/eng/programs/environment-etv-techbmw118d-eng-2188.htm>
- [19] <http://www.magnetimarelli.com/excellence/technological-excellences/hybrid-electric-drive>
- [20] <http://www.metricmind.com/data/cycles.pdf>
- [21] http://www.mcfarlandassociates.net/mac_products/motors/servo_motors/brushless_servo_motors/rotor_stator_part_sets/bps2300_brushless_rotor_stator_part_set.html
- [22] <http://zpravy.ihned.cz/c1-59212450-cinska-mesta-zahalil-husty-smog-rusi-se-lety-vlada-vyzyva-obyvatele-aby-zustali-doma#fotogalerie-gf493191-13-2184850>
- [23] <http://www.flybridsystems.com>
- [24] http://www.formule.cz/formule/index.php?obsah=zobraz&id_clanku=15384
- [25] <http://www.innas.com/home.html>
- [26] <http://www.zytekautomotive.co.uk>
- [27] <http://www.skf.com/files/515051.pdf>
- [28] <http://contentmanager.3dpublisher.net/3DContentCentral/download-model.aspx?catalogid=280&id=204>
- [29] <http://www.uhu.cz/lepeni-kovu>
- [30] <http://www.humusoft.com/produkty/datacq/mf624/>
- [31] <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- [32] www.skoda-auto.cz/SiteCollectionDocuments/skoda-auto/ke-stazeni/fabia-katalog.pdf

PŘÍLOHA č. 1

Dokumentace k motor-generátoru

ZONE	REV.	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	A	NEW DRAWING/NTD 10178		

8X 22 AWG
UL 3285; 125°C, 150V

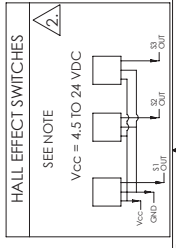
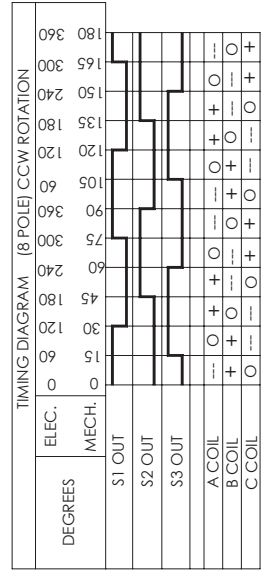


SECTION A-A

- NOTES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
- INTERPRET DRAWING PER ASME Y14.100.
 - OPEN COLLECTOR OUTPUTS. USE PULL UP RESISTORS BETWEEN VCC AND OUTPUTS.
 - TESTED AS A MOTOR ASSEMBLY MOUNTED TO 6" X 6" X 1/4" ALUMINUM PLATE. STILL AIR.
 - MAXIMUM WINDING TEMPERATURE OF 155°C.
 - MAGNET RING AND ROTOR CORE: FLUSH ±.002 ON THIS SIDE.
 - RECOMMENDED ROTOR CORE TO STACK MOUNTING DIMENSION.

PARAMETER	SYMBOL	UNITS	TOLERANCE	VALUE
TERMINAL VOLTAGE	V	VOLTS DC	NOMINAL	24
PEAK TORQUE	T _p	OZ-IN	MAXIMUM	143
CONTINUOUS STALL TORQUE	T _c ¹	OZ-IN	MAXIMUM	42.8
NO LOAD SPEED	S _{NL}	RPM	NOMINAL	8100
RATED SPEED	S _r	RPM	NOMINAL	6060
RATED TORQUE	OZ-IN	MAXIMUM		40.3
RATED CURRENT	AMPS			9.47
RATED POWER	WATTS			181
TORQUE SENSITIVITY	K _t	OZ-IN/AMP	±10%	3.85
BEMF CONSTANT	K _e	VOLTS/KRPM	±10%	2.85
TERMINAL RESISTANCE	R _w	OHMS	±12%	0.178
TERMINAL INDUCTANCE	L _w	mH	±30%	0.220
MOTOR CONSTANT	K _M	OZ-IN/? WATTS	NOMINAL	9.13
SPEED TORQUE GRADIENT	RPM/OZ-IN			50.80
MECHANICAL TIME CONSTANT	msec			2.50
ELECTRICAL TIME CONSTANT	msec			1.24
THERMAL RESISTIVITY	°C/WATT			2.36

COLOR	CONNECTION
VIOLET	A COIL
BLACK	B COIL
GREEN	C COIL
YELLOW	VCC
GREY	GROUND
BROWN	S1 OUT
BLUE	S2 OUT
WHITE	S3 OUT



MOOG COMPONENTS GROUP

BRUSHLESS D.C. MOTOR

OUTLINE

CAD GENERATED DRAWING, DO NOT MANUALLY UPDATE

APPROVALS	DATE	TITLE
DESIGNED: R. PACE	1/31/06	
CHECKED: R. MARTIN	2/10/06	
DESIGNED: D. THOMPSON	2/10/06	
RELEASED: R. MARTIN	2/14/06	
SHOP PROOF: L. FORRISTER	2/13/06	
DATE: 2/10/06		

DO NOT SCALE DRAWING MATERIAL

SCALE: 1.5:1	CAGE CODE: BN23-23ZMG-011H
SHEET 1 OF 1	

Silencer® Series Brushless Controllers

TYPICAL APPLICATIONS

Control of Brushless Motors for:

- Medical pumps and blowers
- Air-handling equipment
- Packaging and printing products
- Semiconductor handling and insertion machines
- Industrial automation equipment
- Office automation and equipment

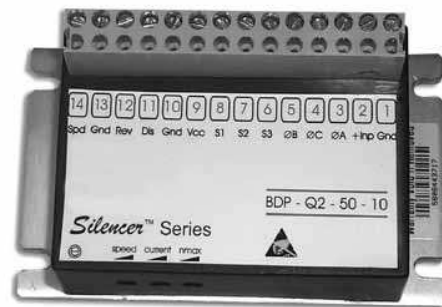
FEATURES

- 2-quadrant speed controllers for electronically commutating three-phase brushless motors with Hall sensors, which are arranged offset at 120 electrical degrees
- Speed of the motor is preset by means of either an internal or an external potentiometer
- Maximum constant current can be adjusted via an on-board potentiometer
- Direction of rotation of the motor can be preset by means of the direction control input. The controller output stage can be activated and deactivated by means of the disable control input
- Controller is safeguarded against heat overload by means of an internal thermal cutoff
- Controller output stage has been constructed using POWER-MOSFET technology, resulting in very high efficiency

BENEFITS

- Compact packaging minimizes space demands
- Matched drives and motors from a single supplier
- Complete system testing provides high reliability
- Terminal block connections for ease of wiring
- Multiple methods of speed control
 - Input voltage
 - Internal potentiometer
 - External potentiometer
 - External voltage reference

BDP-Q2-50-10 ***2-quadrant speed controller for brushless motors***



Silencer® brushless controllers are available in a variety of voltage and current ratings. Their compact packaging minimizes space demands. All controllers have generous terminal blocks to facilitate ease of wiring.

Silencer drives are compatible with Silencer Series Brushless DC Motors. Silencer motors are available in sizes 12, 17, 23, 28, 34 and 42 in standard frames with 1.2 to 4.15 inch diameters. They offer speeds up to 20,000 rpm and continuous torques ranging from 1.2 to 519 oz-in. Standard options include gearheads, resolvers and encoders.

If you have questions about Silencer drives or would like to speak to an applications engineer, please call us or visit our web site.

BDP-Q2-50-10 SPECIFICATIONS

Electrical Data	BDP-Q2-50-10
Operating voltage -+input and Gnd Residual voltage < 5%	20 - 50 VDC
Maximum constant current (adjustable)*	10A
Supply voltage for Hall switches	6 V / 20 mA

*At higher input voltages, additional heat-sinking may be required for maximum current.

Inputs

- Direction of rotation – (REV) open collector / TTL / CMOS / switch
- Disable output stage – (DIS) open collector / TTL / CMOS / switch

Temperature Range

Storage -40 to +85° C
Operation -10 to +45° C

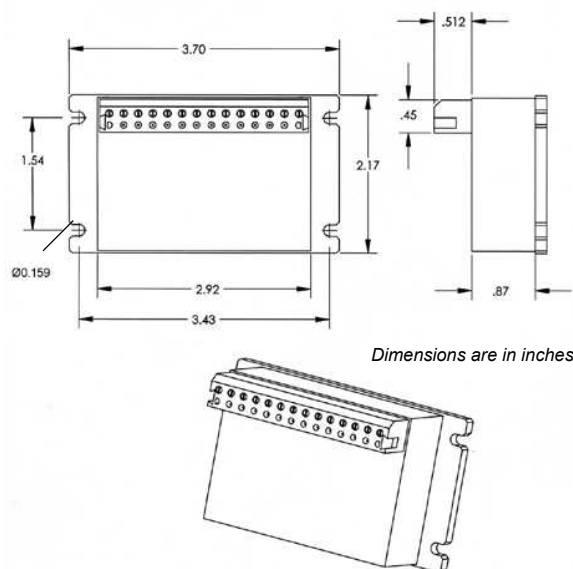
Moisture Range

20 to 80% non-condensed

Mechanical Data	BDP-Q2-50-10
Weight	4.93 oz
	140 gm
Dimensions - (L x W x H) -	2.17 x 3.70 x 1.54 in (55 x 94 x 39 mm)
Mounting -	4 x M3 with a distance between holes of 1.54 x 3.43 in (39 x 87 mm)
Drill Diameter -	4.0 mm - (4) places

Termination Table		
Terminal #	Nomenclature	Description
1	GND	Gnd for Supply Voltage
2	Positive Input	Positive Supply Voltage
3	Phase A	Motor Phase A
4	Phase C	Motor Phase C
5	Phase B	Motor Phase B
6	S3	Hall Switch #3
7	S2	Hall Switch #2
8	S1	Hall Switch #1
9	VCC	Supply for Hall Switches
10	GND	Gnd for Hall Switches
11	DIS	Control Input - Disable
12	REV	Control Input - Reverse
13	GND	Gnd for Dis and Rev
14	SPD	Set value input for speed

Outline Drawing - Three Views



Moog GmbH
Hanns-Klemm-Str. 28
71034 Böblingen
Tel.: +49 (07031) 622 - 0

Hydraulic Motion Systems
Verkauf Fax: 622 - 191
Reparatur Fax: 622 - 423

Defense Control Systems
Fax: - 07031 622 250

MOOG



Moog GmbH P.O.Box 1670 71006 Böblingen

ANGEBOT/QUOTATION

99999

From Sales Office:
GERMANY

Attn: **Uni. of West Bohemia, CZ**

Our VAT ID No.: **DE145165479** TAX ID-No. **56461 / 00020**

Your VAT ID No.:

Delivery Conditions: **EXW - ex works (Incoterms 2010)**

Payment: **Advance Payment**

QUOTATION	Q65669
Date 17/05/13	Cust. No. 99999
Your Request for Quotation e-mail / Jakub Kroll Phone	Request Date 17/05/13 Fax 0078123290192
Our Contacts Heike Raica	Phone/Fax/email 49(7031)6220 49(7031)622191 hraica@moog.com
Heike RAICA	49(7031)622336 49(7031)62246336 hraica@moog.com

Page: 1 of 2

Item	Quantity	Moog Part-No. Boxcar	Description	Unit Price EUR
Thank you for your inquiry. We are pleased to offer you, based on our General Terms and Conditions of Sale (June 2011), the following items:				
1	1,0 pc	BN23-23ZMG-01LH	MOTOR	598,00
		netprice The price is valid only in connection with item 2, brushless driver lead time: 7-8 weeks (subject to changes)		
2	1,0 st	BDP-Q2-50-10 SCP-B1-50-10	CONTROLLER	726,00
		netprice lead time: 3-4 weeks (subject to changes)		

Moog GmbH
Hanns-Klemm-Str. 28
71034 Böblingen
Tel.: +49 (07031) 622 - 0

Hydraulic Motion Systems
Verkauf Fax: 622 - 191
Reparatur Fax: 622 - 423

Defense Control Systems
Fax: - 07031 622 250



Moog GmbH P.O.Box 1670 71006 Böblingen

ANGEBOT/QUOTATION

99999

From Sales Office:
GERMANY

Attn: Uni. of West Bohemia, CZ

Our VAT ID No.: DE145165479 TAX ID-No.56461 / 00020

Your VAT ID No.:

Delivery Conditions: EXW - ex works (Incoterms 2010)

Payment: Advance Payment

QUOTATION	Q65669
Date 17/05/13	Cust. No. 99999
Your Request for Quotation e-mail / Jakub Kroll Phone	Request Date 17/05/13 Fax 0078123290192
Our Contacts Heike Raica Heike RAICA	Phone/Fax/email 49(7031)6220 49(7031)622191 hraica@moog.com 49(7031)622336 49(7031)62246336 hraica@moog.com

Page: 2 of 2

Item	Quantity	Moog Part-No. Boxcar	Description	Unit Price EUR
<p>In case of order please advise our quotation no.</p> <p>Export regulation: In case of re-export the items purchased are subject to the appropriate national export control regulations and in case of U.S. originated items also the U.S. Department of Commerce Export Administration Regulation applies. Depending on the application or the country of destination the AWG/AWV (German Export Regulation Laws) and/or the EG-Dual Use VO 428/2009 may also be applicable. The Buyer accepts full responsibility for, and agrees to comply fully with such regulations, including obtaining export licenses and re-export authorization.</p>				
Sub-Total				EUR 1.324,00
Total Amount				EUR 1.324,00
<p>For all items with Country of Origin USA, the following applies: In case of re-export it is the buyer's responsibility to check the requirements and obtain the US licenses if necessary. In case of order an enduse statement can be required.</p> <p>Valid until 16/07/13</p>				

Best regards
Moog GmbH

Heike RAICA
Customer Service

This document has been computer generated and is valid without signature.

0201015

PŘÍLOHA č. 2

Výkresová dokumentace mechanické baterie