



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Vojtěch Ludvík

**KONSTRUKČNÍ NÁVRH ROTUJÍCÍ ČÁSTI
SETRVAČNÍKOVÉ BATERIE**

Bakalářská práce

ROK ODEVZDÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE: 2017



K616.....Ústav dopravních prostředků

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Vojtěch Ludvík

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – ITS – Inteligentní dopravní systémy

Název tématu (česky): **Konstrukční návrh rotující části setrvačnickové
baterie**

Název tématu (anglicky): Design of rotational part of flywheel battery

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Proved'te rešerši setrvačnicků.
- Uved'te požadavky na rotor v setrvačnickové baterii.
- Navrhňte a vytvořte optimální 3D tvar rotoru setrvačnicku a zvolte vhodné materiály.
- Navrhňte způsob uchycení kotouče na hřídel.
- Vyřešte způsob napojení elektromotoru na hřídel.





- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: M. Valendin: Mechanika I - Dynamika
J. Plomer: Hybridní pohon městského vozidla s inovativní akumulací energie
M. F. Ashby: Materials selection in mechanical design

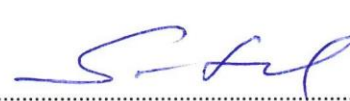
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.**
Ing. Jan Plomer, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: **25. října 2015**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **28. srpna 2017**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


.....
doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D. prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
vedoucí děkan fakulty
Ústavu dopravních prostředků





Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.


.....
Vojtěch Ludvík
jméno a podpis studenta

V Praze dne 2. prosince 2016

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomáhali při tvorbě této práce. Zvláště pak děkuji mému vedoucím bakalářské práce, panu Ing. Janu Plomerovi Ph.D., který mi byl vždy nápomocen. Dále pak děkuji panu Ing. Jiřímu Firstovi za úvod do tématu, panu Ing. Jaroslavem Valachovi Ph.D. za pomoc při vytváření části o materiálech a panu Ing. Josefu Míkovi Ph.D. za pomoc s formálními záležitostmi ohledně mé práce. Rád bych také poděkoval firmě Advanced Engineering s.r.o. za zprostředkování dočasné licence na program Inspire od společnosti solidThinking. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině a přítelkyni za materiální a psychickou podporu v době vytváření této bakalářské práce.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/200 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon)

V Praze dne 14. června 2017

Vojtěch LUDVÍK

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

KONSTRUKČNÍ NÁVRH ROTUJÍCÍ ČÁSTI SETRVAČNÍKOVÉ BATERIE

Bakalářská práce

Červen 2017

Vojtěch Ludvík

ABSTRAKT

Předmětem bakalářské práce „**Konstrukční návrh rotující části setrvačnickové baterie**“ je analyzovat dosud používané setrvačnický a určit podle zadaných kritérií optimální tvar a materiál rotoru pro použití v dopravních prostředcích, jeho napojení na systém vozidla a uchycení rotoru v setrvačnickové baterii.

ABSTRACT

The subject of the bachelor thesis „**Design of rotational part of flywheel battery**“ is to analyse already existing flywheel batteries and to find out, which shape and material is the best according to setted criteria for a vehicle use. This thesis presents a concept, how to connect and stabilise the rotor of the flywheel and how to connect this flywheel battery in the vehicle.

KLÍČOVÁ SLOVA

Setrvačnický, setrvačnicková baterie, FES, rotor, uchování energie, doprava, výběr materiálu

KEY WORDS

Flywheel, flywheel battery, FES, rotor, energy storage, transportation, material selection

Obsah

Seznam použitých zkratk	- 6 -
1 Úvod	- 8 -
2 Energie	- 9 -
2.1 Jednotky energie	- 9 -
2.2 Podoby energie	- 10 -
2.2.1 Mechanická energie	- 10 -
2.2.2 Elektrická energie	- 11 -
2.2.3 Chemická energie	- 11 -
2.3 Způsoby uchovávání energie	- 12 -
2.3.1 Uchovávání mechanické energie	- 12 -
2.3.2 Uchovávání chemické energie	- 12 -
2.3.3 Uchovávání elektrické energie	- 13 -
2.3.4 Uchovávání elektrochemické energie	- 13 -
2.3.5 Uchovávání tepelné energie	- 14 -
3 Setrvačnick	- 16 -
3.1 Setrvačnick v čase	- 16 -
3.2 Komponenty setrvačnicku	- 19 -
3.2.1 Rotor	- 19 -
3.2.2 Uložení	- 19 -
3.2.3 Prostředí a obal	- 20 -
3.3 Fyzikální stránka setrvačnicku	- 20 -
3.3.1 Moment setrvačnost	- 20 -
3.3.2 Úhlová rychlost	- 21 -
4 Problematika materiálu rotoru	- 22 -
4.1 Izotropní materiály	- 23 -
4.2 Anizotropní materiály	- 23 -
4.3 Způsoby porovnání materiálů	- 23 -

4.4	Příklady materiálů	- 25 -
5	Možné návrhy rotorů setrvačnickové baterie	- 27 -
5.1	Požadavky na setrvačnickovou baterii a její rotor	- 27 -
5.2	Jednotlivé návrhy.....	- 27 -
5.3	Optimalizovaný návrh	- 28 -
5.4	Varianty	- 31 -
5.4.1	Varianta 1	- 32 -
5.4.2	Varianta 2	- 33 -
5.4.3	Varianta 3	- 34 -
5.4.4	Varianta 4	- 35 -
5.4.5	Varianta 5	- 36 -
5.4.6	Varianta 6	- 37 -
5.4.7	Varianta 7	- 38 -
5.4.8	Varianta 8	- 39 -
5.4.9	Srovnání variant	- 40 -
6	Závěr	- 43 -
7	Použité zdroje	- 45 -
8	Seznamy.....	- 50 -
8.1	Seznam tabulek.....	- 50 -
8.2	Seznam obrázků.....	- 50 -

Seznam použitých zkratek

AISI – Americký institut pro železo a ocel (Americas iron and steel institute)

C – uhlík

cca – asi (circa)

CNG – stlačený zemní plyn (compressed natural gas)

CO – oxid uhelnatý

CO₂ – oxid uhličitý

CVT – převodovka s plynulou změnou převodu (continuously variable transmission)

F1 – formule 1

FES – setrvačnicková baterie (flywheel energy storage)

H – vodík

H₂O – voda

H₂SO₄ – kyselina sírová

CH₄ – methan

IT – informační technologie

KERS – rekuperace kinetické energie (kinetic energy recovery system)

KOH – hydroxid draselný

Li-ion – lithium-iontový

LNG – zkapalněný zemní plyn (liquefied natural gas)

NaNiCl baterie – sodíkovo-niklo-chloridová baterie

NaS – sulfid sodný

NiCd baterie – nikel-kadmiová baterie

NiMH – nikel-metal hydridový

O – kyslík

P2G – přeměna elektrické energie na plyn (power to gas)

RPM – otáček za minutu (revolution per minute)

SI – mezinárodní systém jednotek (Le Système International d'Unités)

SMES – uložení energie do magnetického superkondenzátoru

(superconducting magnetic energy storage)

SNG – náhradní zemní plyn (substitute natural gas)

TDI – turbodiesel s přímým vstřikováním (turbocharged direct injection)

tzv. – takzvaný

UPS – zdroj nepřetržité energie (uninterruptible power supply)

USA – Spojené státy americké

VRLA – ventilem regulovaný olověný akumulátor (valve regulated lead acid)

VW – Volkswagen

ZEBRA – bezemisní baterie, sodíková (zero emissions batteries research activity)

1 Úvod

V roce 2015 došlo v USA ke zjištění, že koncern VW dodával své TDI motory se softwarem, který během laboratorních testů dokázal až 40x snížit množství vyfukovaných oxidů dusíku. [1] I díky tomuto podvodu dokázat splnit tamní zákonné limity. Evropská unie má v rámci své politiky také zájmy v životním prostředí a nakládáním s přírodními zdroji. [2] Z těchto důvodů dochází v posledních letech k velkému rozmachu alternativních a hybridních pohonů, ve kterých bývají často využívány akumulátory energie. Ty by mohly do budoucna doplnit nebo v některých případech zcela nahradit setrvačnickové baterie.

V této práci se věnuji zajímavé formě uchovávání energie, která má potenciál posunout moderní pohonné systémy ještě o kousek dál. Jedná se o setrvačnickovou baterii, což je forma krátkodobé akumulace kinetické energie do rotujícího kotouče. Tato energie může pokrýt vysoké krátkodobé poptávky po energii, tedy při akceleraci.

Stávající brzdové systémy u automobilů fungují na třecím principu – brzdové destičky tlačí na brzdny kotouč, dochází ke tření, při kterém se rotační energie kotouče mění na tepelnou energii. To je v zásadě dvojitá ztráta, protože nevratně ztrácíme kinetickou energii vozidla spolu s brzdny médiem na destičkách, což má ekologický i ekonomický dopad. Toto lze velice elegantně vyřešit elektromotorem u převodovky, který bude fungovat jako generátor elektrické energie. Tu pak můžeme uložit do baterie nebo právě do naší setrvačnickové baterie a později využít.

Kapacita setrvačnickové baterie je odvozena v zásadě od 2 parametrů, kterými jsou tvar a otáčky rotující části (rotoru). Při vysokých otáčkách dochází k velkému napětí v materiálu způsobenému odstředivými silami, které může způsobit až rozpad rotoru. Je tedy zřejmé, že hlavní roli bude hrát materiál, případně materiály, ze kterých bude rotor vytvořen. Při dosažení kritického napětí dojde k destrukci rotoru, takže je potřeba kolem něj udělat bezpečnostní ochranný kryt, aby nedošlo k ublížení na zdraví či k poškození okolních komponent. Zároveň tím dojde k zamezení možnosti dotyku cizího předmětu a rotoru setrvačnickové baterie.

V této práci se budu zabývat hlavně ideálními tvary a materiály pro tyto rotory. Zároveň zmíním, jaké podmínky by bylo vhodné mít k efektivnímu a bezpečnému provozu setrvačnickové baterie. Mým úkolem není vyladit jednu variantu k dokonalosti, ale porovnat větší množství variant s lehce rozdílnými parametry a s pomocí počítačových simulací přijít na to, jak by měl vypadat optimální tvar a jaké materiály by byly pro jeho výrobu nejvhodnější.

2 Energie

Energie není nijak starým pojmem. Prvně byla použita skotským fyzikem Williamem Rankinem v roce 1853, kdy potenciální energii označil schopnost tělesa konat práci v závislosti na své poloze ve vnějším silovém poli. Pojem kinetická energie byl zaveden o tři roky později Williamem Thomsonem. [3]

Nejpoužívanější definice je, že „energie je schopnost konat práci“.

2.1 Jednotky energie

Energie se v soustavě SI značí E a má jednotku Joule [J]. Vzhledem k prolínání energie mezi mnoha odvětvími se můžeme dostat do styku i s jinými jednotkami, jako jsou:

Kilokalorie: $1 \text{ kcal} = 4185 \text{ J}$

Je to energie potřebná k ohřátí 1 l vody o 1 °C, používá se v potravinářství.

Kilowatthodina: $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^9 \text{ J}$

Jedná se o energii odpovídající práci stroje s příkonem 1 kW po dobu 1 hodiny, používá se tedy v energetice a elektrotechnice.

Elektronvolt: $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Je to energie, kterou získá elektron urychlený napětím 1 V, používá se ve fyzice.

Tuna měrného paliva: $1 \text{ tmp} = 2,931 \cdot 10^{10} \text{ J}$

Jedná se o energii, kterou získáme spálením 1 tuny vysoce kvalitního černého uhlí o výhřevnosti $29,3 \text{ GJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, používá se v energetice.

Práce se dá definovat jako míra změny energie, neboli že práce je rovna úbytku energie:

$$W = - \Delta E$$

2.2 Podoby energie

Rozdělení energie podle druhu se se zdrojem liší. Nejbližší mi bylo toto rozdělení energií:

- Mechanická
- Elektrická
- Tepelná
- Zářivá
- Chemická
- Jaderná

Vzhledem k problematice, kterou se budu zabývat, rozepíšu hlavně energii mechanickou (pohyb setrvačnicku), elektrickou (práce elektromotoru či baterie) a chemickou (spalovací motory, baterie).

2.2.1 Mechanická energie

Mechanická energie E_m se skládá ze dvou složek, kinetické energie E_k a potenciální energie E_p , jejichž součet se v izolované soustavě nemění.

$$E_m = E_k + E_p = konst.$$

Potenciální energie je v zásadě energie, která se mění s pohybem v nějakém poli síly. Může se jednat o pole gravitační (tíhové), elektrostatické, tlakové či o pole pružnosti. Nejčastěji se setkáváme s potenciální energií v gravitačním poli, jejíž velikost je závislá na hmotnosti tělesa m [kg], výšce nad povrchem Země h [m] a gravitačním zrychlením g [$m \cdot s^{-2}$], které je závislé na zeměpisné šířce. Pro jednoduchost se tedy zavedla hodnota normálního tíhového zrychlení, které není závislé na zeměpisné šířce a má hodnotu $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Fyzikální vztah pro potenciální energii v tíhovém poli je:

$$E_p = mgh$$

Kinetická energie je charakterizována pohybem tělesa. Pohyb může být buď translační (posuvný) nebo rotační (otočný). Kinetická energie posuvného pohybu je dána hmotností m [kg] tělesa a jeho rychlosti v [$m \cdot s^{-1}$] vztahem:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Kinetická energie rotačního pohybu závisí na úhlové rychlosti otáčení ω [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] a momentu setrvačnosti tělesa k ose J [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] a je dána vztahem:

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

Momentu setrvačnosti se budu podrobněji věnovat v kapitole o setrvačnicích.

2.2.2 Elektrická energie

Jak jsem se již zmiňoval, změna energie závisí na pohybu v nějakém poli. V případě elektrické energie se jedná o pohyb náboje v magnetickém B a elektrickém E poli, které dohromady označujeme jako elektromagnetické pole. Pohybem náboje v elektrickém poli proti směru působení síly zvyšujeme jeho elektrickou potenciální energii E_p a konáme práci:

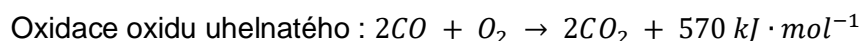
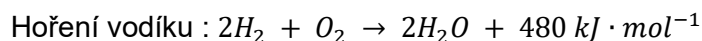
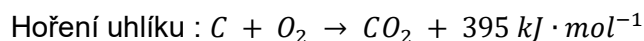
$$W = qU = \Delta E_p = UIt$$

Poslední vztah je v souvislosti s problematikou mé bakalářské práce nejdůležitější, protože se přes něj počítají energetické toky ve vozidle. Skládá se z elektrického napětí U [V], elektrického proudu I [A] a z času t [s].

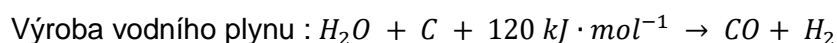
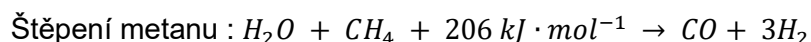
2.2.3 Chemická energie

Chemická energie je v zásadě energie vazbová mezi atomy molekuly. Při chemických reakcích dochází ke štěpení vazeb, vzniku nových vazeb či obojího. Podle finální energetické bilance dělíme reakce na exotermické, při kterých se energie uvolňuje, a endotermické, při kterých se naopak energie spotřebovává. Zde je pro zajímavost několik vyčíslených chemických reakcí:

Exotermické:



Endotermické



Nejznámější formou exotermické reakce je hoření, při kterém dochází v průběhu spalování (oxidaci) paliva k uvolňování tepla. K porovnávání paliv používá tzv. výhřevnost paliva H [$J \cdot kg^{-1}$], což je energie, kterou získáme spálením 1 kg daného paliva, pokud nepočítáme „uniklou“ energii vodních par, které také vznikají při hoření. V energetice se pro větší množství používá jednotka tnp (tuna měrného paliva), která je rovna energii získané spálením 1tuny měrného paliva. Měrné palivo je vysoce kvalitní černé uhlí s výhřevností $2,931 \cdot 10^7 J \cdot kg^{-1}$. [3]

Chemických reakcí využívají také všechny možné baterie a akumulátory, těm se budu věnovat později.

2.3 Způsoby uchovávání energie

Problematika skladování energie je všudypřítomná. Jedná se například o akumulátory v našich mobilních telefonech či elektromobilech, nebo nutnost vyrovnávání energetické poptávky a nabídky (například provoz v noci, kdy je poptávka nízká a výroba tak převyšuje spotřebu).

Nejčastější rozdělení je podle druhu energie, se kterou daný systém pracuje, případně jejich kombinací. Dělíme je tedy na [4]:

- Mechanické
- Chemické
- Elektrické
- Elektrochemické
- Tepelné

2.3.1 Uchovávání mechanické energie

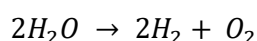
Nejběžnějším systémem pro uchování mechanické energie jsou přečerpávající vodní nádrže, které fungují tak, že v době přebytku energie v síti čerpají vodu do horní nádrže (nejčastěji přes noc) a v době nedostatku energie v síti pouštějí vodu do spodní nádrže. Padající voda pohání turbíny, které generují elektrickou energii. Účinnost těchto systémů se pohybuje v rozmezí 70-85 %. Existují i systémy využívající pro svoji činnost vodu mořskou.

Další možností jsou systémy využívající stlačeného vzduchu, který se v případě potřeby smíchá se zemním plynem a spálí. Účinnost tohoto procesu je 50 %.

FES (flywheel energy storage) je anglická zkratka pro setrvačnickovou baterii. Tu můžeme najít například v dětských hračkách či gyrobusech. V moderní době je také využíváme ke krátkodobému uskladnění energie (například ve F1 – KERS) či k bezproblémovému přechodu na záložní zdroj při výpadcích elektrické energie. Je možné, že nám pomůžou vyřešit problematiku skladování energie v elektromobilech či jiných dopravních prostředcích založených na bezemisním provozu. Setrvačnickům bude věnována celá jedna kapitola.

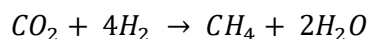
2.3.2 Uchovávání chemické energie

Způsoby uchovávání chemické energie jsou založeny na získání molekuly vodíku. Ta se získá elektrolýzou vody (musíme dodat energii), při které vznikne molekula vodíku H_2 a molekula kyslíku O_2 . [5]



Vodík je v zásadě palivo, jehož hořením (oxidací) získáme vodu a tepelnou energii, kterou pak přeměníme na energii elektrickou.

Je tu ještě druhá možnost, kdy vzniklý vodík necháme reagovat s oxidem uhličitým CO_2 za vzniku syntetického zemního plynu, neboli metanu (SNG), a vody.



SNG pak můžeme použít jako například kapalný zemní plyn (LNG) nebo stlačený zemní plyn (CNG). Tento způsob skladování energie je vhodný hlavně v místech, kde dochází k nadbytku elektrické energie a oxidu uhličitého, což jsou převážně elektrárny spalující fosilní paliva.

Pro tyto systémy můžeme najít i pod názvem P2G (power to gas), jejich účinnosti se odvíjí od účinnosti dané elektrolýzy v rozmezí 43-82 %. Výhodou je možnost využití stávající plynovodové sítě. [6]

2.3.3 Uchovávání elektrické energie

Moderní formou uchovávání elektrické energie jsou buď superkondenzátory nebo supravodivé magnetické akumulátory. Superkondenzátory jsou založené na elektrostatice, jejich hlavním prvkem je elektroda o velkém povrchu (například pórovitý uhlík, který má plochu $2000 \text{ m}^2/\text{g}$), jinak se jedná o klasický kondenzátor. [7]

Supravodivé magnetické akumulátory (SMES) vznikly s objevením supravodivosti a následným objevením materiálů, u kterých dochází k supravodivosti při vyšších teplotách. [8] Supravodivost je jev, kdy při nízkých teplotách dochází k téměř vymizení odporu průchodu elektrického proudu materiálem – ten se tím pádem nezahřívá a nedochází ke ztrátám energie. Z tohoto materiálu je vyrobená cívka pro magnetický akumulátor.

Velkou výhodou těchto systémů je velice rychlé nabití a zároveň vybití, dlouhá životnost a vysoká účinnost – okolo 85 %. [9]

2.3.4 Uchovávání elektrochemické energie

K uchovávání elektrochemické energie používáme nejčastěji baterie. Jsou to spojení 2 a více elektrických článků k sobě, jednotlivé články přeměňují chemickou energii na elektrickou a naopak. Baterie, které můžeme otočením směru proudu nabíjet (přeměňovat elektrickou energii na chemickou) nazýváme akumulátory. Baterie dělíme podle použitých chemických látek na:

- Olověné
- Niklové
- Sodíkové
- Lithiové
- Kov-vzduchová
- Průtokové

Olověná baterie je v automobilech baterií nejrozšířenější. Jedná se hlavně o klasické baterie, ne baterie elektromobilů. Elektrolytem je v této baterii kyselina sírová H_2SO_4 . Dříve se musely tyto baterie dolévat destilovanou vodou, protože z nich často unikal vodík. Tyto baterie jsou nyní nahrazeny utěsněnými s přetlakovým ventilem, které nazýváme VRLA (valve-regulated sealed lead acid). [10] Problém těchto baterií vzhledem k využití v elektromobilech je, že při vyšším odběru proudu prudce klesá jejich kapacita.

Mezi nejznámější niklové baterie patří nikl-kadmiová *NiCd* a nikl-metal hydridová *NiMH*. Oboje používají jako elektrolyt hydroxid draselný *KOH*. Největší předností niklových baterií je jejich odolnost vůči nízkým teplotám. I proto nalezneme největší NiCd baterii na Světě na Aljašce. [11]

Sodíkové baterie mají neobvyklý požadavek – musejí být zahřáty na teploty kolem 300 °C [10]. Mezi ty nejpoužívanější patří sodíkovo-sírová baterie *NaS* či tzv. ZEBRA (Zero Emission Battery Research), což je sodíko-niklo-chloridová baterie *NaNiCl*. Tyto baterie už byly v několika elektromobilech použity, příkladem může být třeba první generace elektrického vozidla Smart Fortwo electric drive. [12]

Lithium-iontové baterie *Li-ion* se začaly ve velkém používat na přelomu tisíciletí, nejčastěji v mobilních zařízeních – telefonech a počítačích. V poslední době je vidáme hlavně ve spojení s rozmachem elektrokol, výjimkou nejsou ani v elektromobilech (například Tesla Roadster). [13] Jejich výhodou je vysoká kapacita vůči hmotnosti či objemu, na druhou stranu jsou celkem drahé.

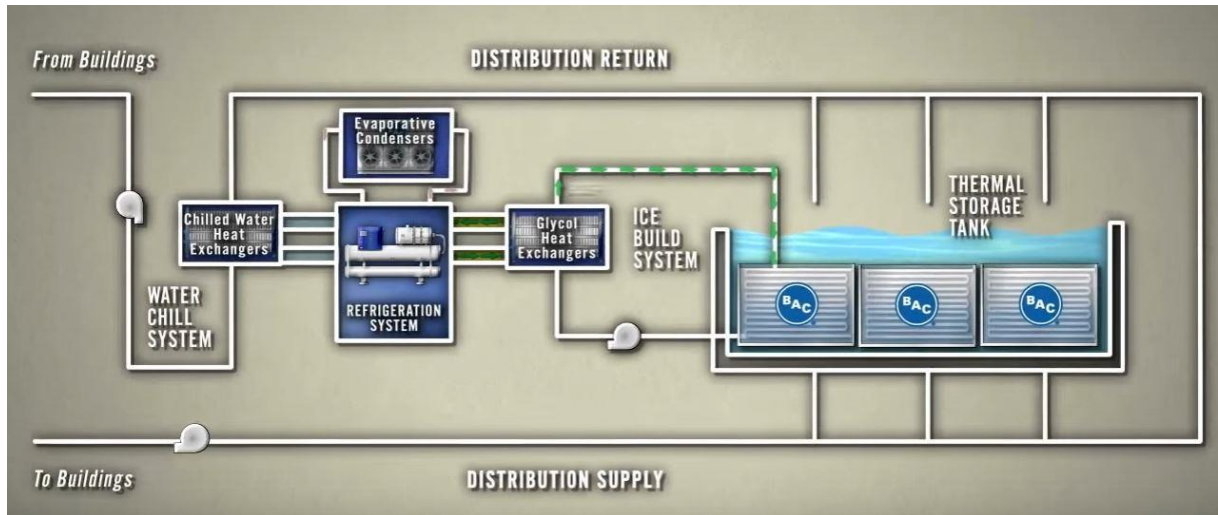
Kov-vzduchové baterie fungují na trochu jiném principu než ostatní. Během chemických reakcí dochází k opotřebování elektrody a ta musí být po určité době vyměněna. Dalo by se říct, že se jedná o obdobu paliva, avšak s mnohem tišším procesem spalování. [10] Nejčastěji používané kovy v těchto systémech jsou hliník, zinek a lithium.

Průtokové baterie jsou akumulátory, které mají 2 nádrže na elektrolyty. Ty přecházejí z nabitého do vybitého stavu a tím se generuje elektrická energie. [10] Kapacita i výkon celého systému lze snadno ovlivnit. Pro zvýšení výkonu musíme zvětšit styčné plochy elektrolytů, pro zvýšení kapacity musíme zvýšit objem nádrží. Díky tomu má tento systém pestré možnosti využití.

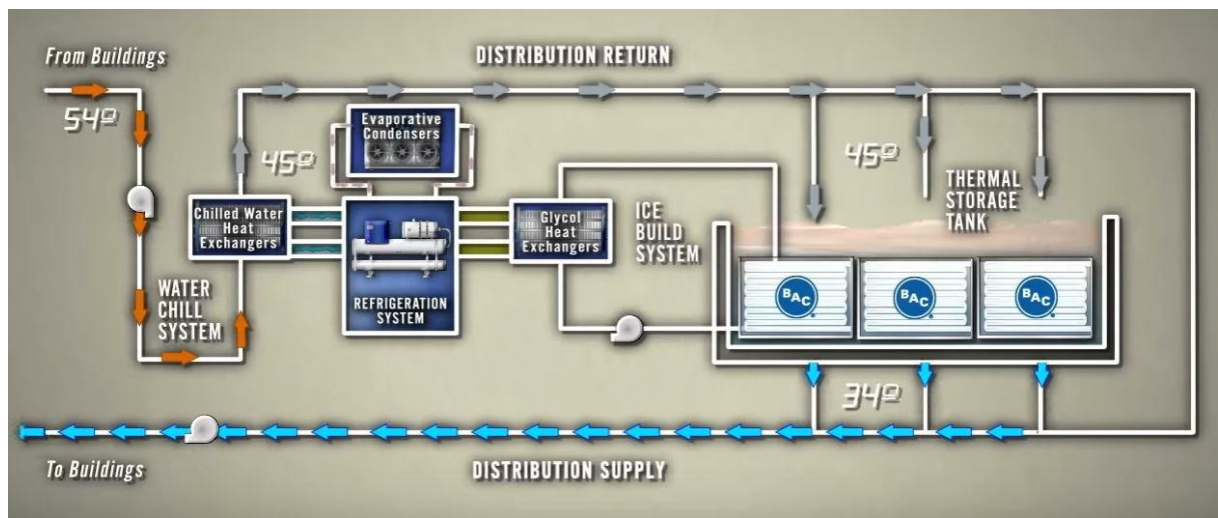
2.3.5 Uchovávání tepelné energie

Skladování tepelné energie se děje v izolovaných tancích, kde médiem (většinou voda) procházejí trubky s nějakou kapalinou, například glykolem. Ve velkém je tento systém v Chicagu, kde je umístěno 5 takovýchto zařízení.

Přes noc, kdy je elektřina levná a je jí přebytek, dochází k ochlazování trubic s glykolem. (obrázek 1) Přes den proudí teplá voda z města do těchto výměníků, kde díky chladným trubicím sniží svoji teplotu. (obrázek 2) Následně je opět vpuštěna zpět do oběhu. Díky tomuto systému je snížena spotřeba elektrické energie na klimatizování kancelářských a obchodních prostor. [14]



Obrázek 1, Noční provoz systém v Chicagu [14]



Obrázek 2, Denní provoz systému v Chicagu [14]

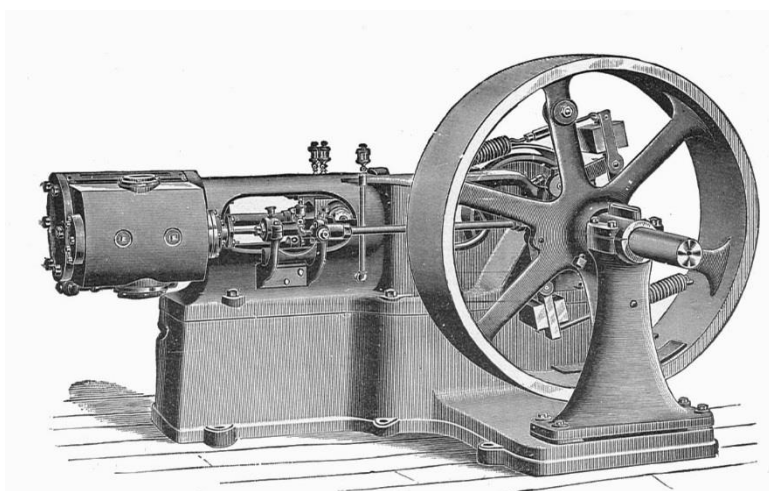
3 Setrvačnick

Jak jsem se již zmiňoval v předchozích kapitolách, setrvačnick je zařízení, které je schopné akumulovat kinetickou energii tím, že rotuje kolem vlastní osy. Je založen na principu momentu setrvačnosti. Setrvačnick se skládá z rotoru (rotující část setrvačnicku) a jeho uložení a statoru (nehybná část setrvačnicku) a jeho uložení.

3.1 Setrvačnick v čase

Datovat, kdy byl objeven princip setrvačnicku, je vzhledem k nekoherentnosti zdrojů téměř nemožně. Shodují se ale, že kolem roku 3000 před naším letopočtem byl již princip setrvačnicku objeven v souvislosti s rozšiřováním důležitosti hrnčírské výroby. [15] Setrvačnick se tu používal v rychlých hrnčírských kruzích, díky kterým dokázal člověk vymodelovat kvalitní nádobu během několika minut. Setrvačnick byl udržován v pohybu kopáním nohy hrnčírě, byl tedy umístěn pod hrnčírským stolem a s rotující deskou spojen tyčí.

Další významnou etapou setrvačnicku bylo období páry a průmyslová revoluce. Setrvačnick byl součástí tehdejších parních strojů a pomáhal jim překonat mrtvé body nacházející se v horní a dolní úvrati. [16] Byla to tehdy nejrozměrnější část celého parního stroje. (obrázek 3)

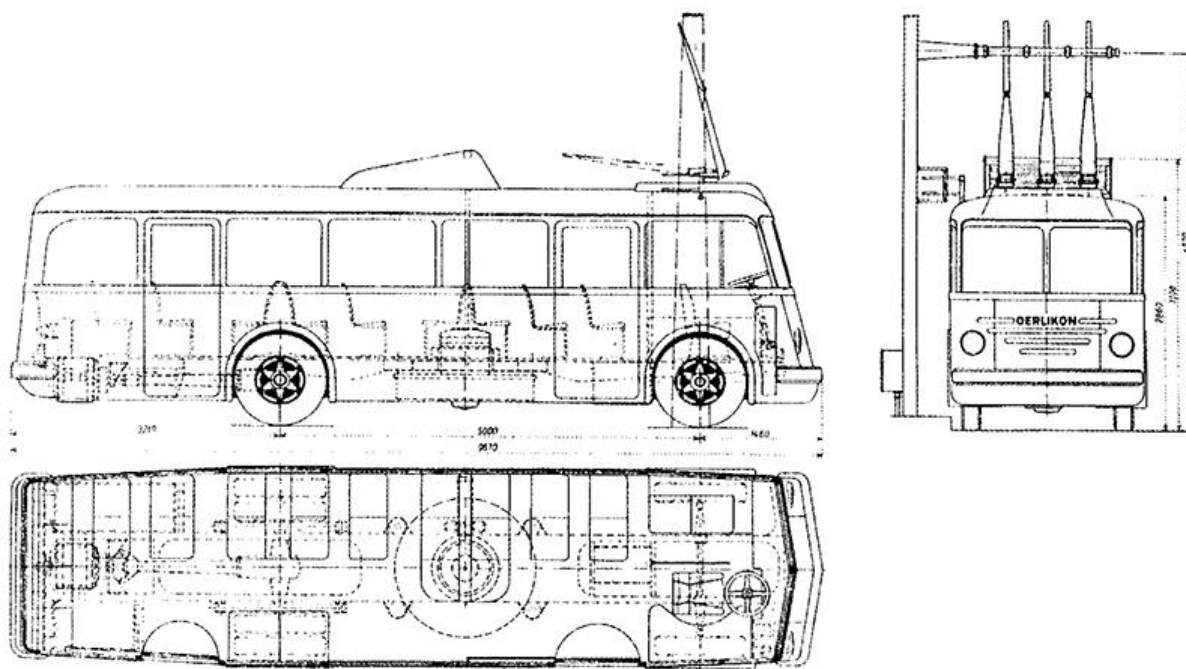


Obrázek 3, Starý parní stroj [16]

Později v 19. století byla kvůli armádním potřebám zvýšená poptávka na oblečení, a tak přišel na svět šicí stroj, kterému energii dodával právě setrvačnick. [17] Ten byl udržován v pohybu pomocí kolébky, kterou nohou ovládala švadlena.

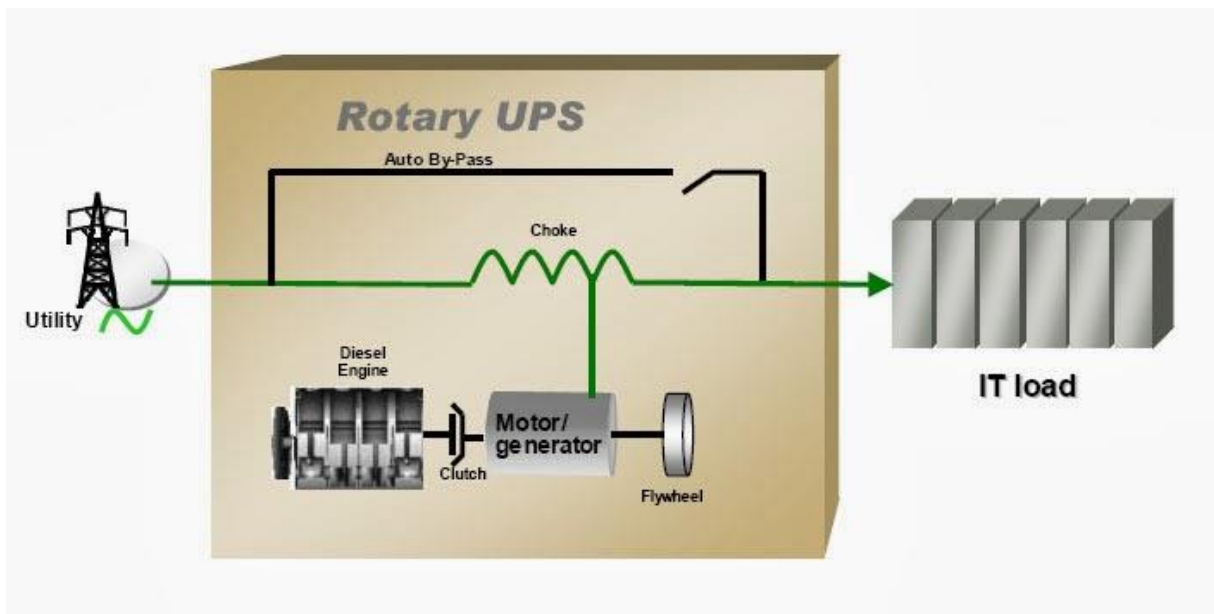
Pojetí setrvačnicku jako jediné pohonné jednotky zajímavě zpracovali a uvedli do provozu v polovině minulého století Švýcaři. Jednalo se o Gyrobus (obrázek 4), což byl autobus poháněný pouze setrvačnickem, který byl dobíjen z dobíjecích stanic na zastávkách nebo brzděním. [18] Vyvinula ho firma Maschinenfabrik Oerlikon a z původních 19 kusů se dodnes dochoval pouze jeden jediný, který můžeme najít ve vlámském vlakovém

a autobusovém muzeu v Antwerpách. [19] Výroba byla po několika letech z důvodu neekonomičnosti ukončena (tehdy byla elektřina relativně drahá oproti naftě, takže se provoz prodražoval). Mezi nesporné klady tohoto systému patřil bezemisní a tichý provoz spolu s rychlým dobíjením na stanicích, takže nebylo potřeba nevzhledných trolejí. Naopak mezi zápory patřil dojezd pouze cca 6 km, vysoká hmotnost a neochota měnit směr jízdy. Ta byla zapříčiněna gyroskopickými efekty setrvačnicku, které ale zároveň stabilizovaly vozidlo, takže byla jízda pro cestující pohodlnější než v konvenčních autobusech.



Obrázek 4, Gyrobus Oerlikon [19]

S příchodem IT systémů přichází nutnost nepřetržité dodávky elektrické energie (UPS), tedy používání záložních zdrojů. Velké systémy mívají záložní dieselový agregát (obrázek 5), který je v případě nutnosti schopen dodávat dostatečné množství energie. [20] Jeho problémem je ale nástupní doba, která činí cca 2 s. [21] Proto se zde často vyskytují právě setrvačnický, které dokáží ihned poskytnout dostatečné množství energie a zaplnit tak čas potřebný k náběhu záložního zdroje.

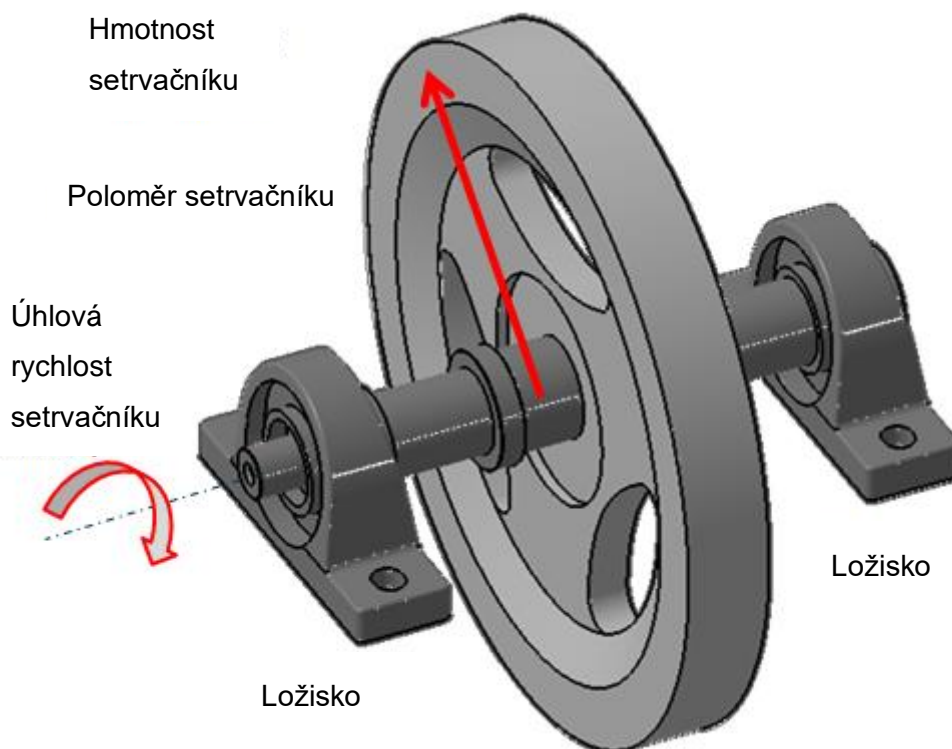


Obrázek 5, UPS systém se setrvačником [20]

Ve světě motorismu je setrvačnik v posledních letech hodně opakovaným pojmem. Jedním z důvodů je vniknutí setrvačniku jako způsobu krátkodobého uchování energie pro Formule 1, kdy se energie vzniklá brzděním ukládá, aby byla v potřebnou chvíli (většinou při výjezdu ze zatáčky) uvolněna. Tento systém je známý hlavně pod pojmem KERS (Kinetic Energy Recovery System) a rozděluje svět F1 na dva tábory. Za stejným účelem byl vyvinut rekuperační systém pro Porsche 911 GT3 R, který by se později v obměněné verzi mohl objevit i u běžně prodávaných automobilů. [22] V civilním světě začíná být setrvačnik používán stejným stylem, ale z jiného důvodu. Tím je snížení spotřeby paliva a emisí, což je v současné době nejdůležitější úkol všech výrobců automobilů a jejich dodavatelů. Pomocí rekuperace energie při brzdění se švédské automobilce Volvo podařilo s jejím modelem S60 dosáhnout úspory až 25 % paliva. [23] Důležitým prvkem tohoto systému je plynulá převodovka, neboli CVT (Continuously Variable Transmission), díky které dochází k efektivnímu přenosu momentu mezi koly a setrvačnikem. Tento systém se jmenuje Flybrid a kromě Volva ho používá také například automobilka Jaguar. [24]

3.2 Komponenty setrvačníku

Každý setrvačnick se skládá z rotoru a statoru. Jejich propojení je zajištěno pomocí ložisek. Při rotaci setrvačnick vznikají 2 odpory – valivý odpor v ložiskách a odpor vzniklý třením o vzduch. Setrvačnick a jeho parametry můžeme vidět na obrázku 6.



Obrázek 6, Setrvačnick [25]

3.2.1 Rotor

Rotor je rotující část setrvačnicku. Jedná se většinou o plný nebo dutý válec. Rotory se vyrábějí z mnoha materiálů, které se liší hlavně pevností a hustotou. Od jeho designu a použitých materiálů se poté odvíjí jeho schopnost zachovávat kinetickou energii. Obvykle bývá uchycen na hřídeli, která je zároveň jeho osou rotace.

3.2.2 Uložení

V běžných setrvačnickách se buď nepoužívají žádná ložiska (například u autíčka na setrvačnick, kde je setrvačnick jen nacvaknutý) nebo ložiska valivá. S rostoucí potřebou maximalizovat uloženou energii a účinnost procesu dochází ke snižování všech možných odporů. Jedním z nich je odpor v ložiscích. Ten můžeme odstranit tak, že použijeme ložiska magnetická, tedy bezdotyková. [26] Dalším nárokem pro uložení vysokootáčkových setrvačnicků je jejich schopnost vypořádat se s vibracemi, které při rotaci vznikají, případně jejich relativně krátká životnost. Toto také řeší bezdotyková ložiska.

3.2.3 Prostředí a obal

Obal setrvačníku je zároveň statorem, tedy nehybnou částí zařízení. Jak jsme se již bavili v odstavci o uložení – jsou tu pokusy o minimalizaci ztrát. Při otáčkách rotoru dochází k tření o vzduch. Logickým postupem tedy je odčerpat vzduch pryč, čímž vznikne v okolí rotoru vakuum. Obal je zároveň bezpečnostním prvkem, protože v případě destrukce rotoru, kdy je v jedné chvíli uvolněno velké množství energie, zachytí části rotoru, které by mohly poškodit své okolí. [27]

Celý systém má kvůli svým gyroskopickým momentům vliv na řízení vozidla. Tento vliv může být vyřešen dvěma způsoby. Buď se použije ještě jeden systém, jehož rotor se bude otáčet v opačném směru než ten první, nebo se celý systém uloží na kardanův závěs (gimbal). [28]

3.3 Fyzikální stránka setrvačníku

U setrvačníku nás zajímá hlavně to, kolik energie je schopen pojmout. Maximální hodnota kinetické energie E [J] setrvačníku je dána vztahem:

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

Kde J [kg*m²] je moment setrvačnosti tělesa k ose a ω [rad*s⁻¹] je úhlová rychlost otáčení rotoru. [29] Z daného vztahu vyplývá, že zvýšíme-li moment setrvačnosti dvakrát, zvýšíme i jeho energii dvakrát. Pokud však zvýšíme dvakrát úhlovou rychlost, zvýší se nám energie setrvačníku čtyřikrát! Proto jsou moderní setrvačníky vysokootáčkové, protože mají lepší poměr uchované energie vůči rozměrům a hmotnosti.

3.3.1 Moment setrvačnost

Setrvačnou sílu mají tělesa o nějaké hmotnosti, která rotují v nějaké vzdálenosti od osy. [29] Hmotný bod rotující kolem osy má moment setrvačnosti vyjádřen vztahem:

$$J = m \cdot r^2$$

kde m je hmotnost hmotného bodu [kg] a r je poloměr otáčení [m]. Stejně tak je vyjádřen i moment setrvačnosti obruče a zanedbatelné tloušťce.

Hmotnost materiálu můžeme vyjádřit z jeho objemu a hustoty. [30] V případě plného válce vypadá rovnice takto:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot \pi \cdot h \cdot r^2$$

Kde ρ je hustota materiálu [kg*m⁻³], V je objem tělesa [m³], π je konstanta o hodnotě 3,14159265359, h je výška tělesa [m] a r je poloměr tělesa [m].

Výpočet momentu setrvačnosti tuhých těles je v principu nalezení vztahu pro element hmotnosti a následné integrace. Každý tvar má tedy jiný moment setrvačnosti k ose rotace. V tabulce 1 je přehled nejčastějších tvarů a jejich momentů setrvačnosti:

Tabulka 1, Momenty setrvačnosti běžných těles

Koule k ose procházející středem	$J = \frac{2}{5} m r^2$
Plný válec k ose souměrnosti	$J = \frac{1}{2} m r^2 = \frac{1}{2} \rho h \pi r^4$
Dutý válec k ose souměrnosti	$J = \frac{1}{2} m (r_2^2 + r_1^2) = \frac{1}{2} \rho h \pi (r_2^4 - r_1^4)$
Tenkostěnný válec (obruč) k ose souměrnosti	$J = m r^2$

kde r_2 je vnější poloměr [m] a r_1 je vnitřní poloměr [m]. Tučně zvýrazněné jsou ty, které jsou nejčastěji používané.

3.3.2 Úhlová rychlost

Úhlová rychlost ω [rad*s⁻¹] je jinými slovy počet otáček, které setrvačnick udělá, za jednu sekundu. Jedna otáčka jsou 2π radiány, takže chceme-li získat hodnotu RPM (otáčky za minutu), musíme úhlovou rychlost v radiánech za sekundu vynásobit přibližných koeficientem 9,55 (60/2π). Úhlovou rychlost lze také vyjádřit vztahem

$$\omega = \frac{v_t}{r}$$




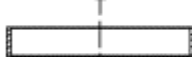
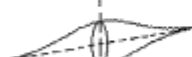
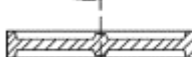
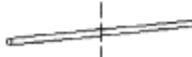
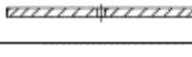

kde v_t je tečná rychlost [m*s⁻¹] a r je poloměr tělesa [m] [29].

Zatímco moment setrvačnosti je po vyrobení rotoru neměnný, úhlová rychlost se mění. Je tím pádem veličinou pro měření energie v setrvačnicku. Úhlovou rychlost nemůžeme zvyšovat do nekonečna, protože s rostoucí úhlovou rychlostí rostou i odstředivé síly a tím pádem i napětí materiálu v tahu. Rotor systému KERS může točit až 1000 otáčkami za sekundu. [31]

4 Problematika materiálu rotoru

Chceme-li zvýšit energii setrvačníku, musíme zvýšit jeho úhlovou rychlost. Bohužel ale nemůžeme zvyšovat rychlost rotorů donekonečna, protože se zvyšující úhlovou rychlostí se zvyšuje i odstředivá síla, která působí na materiál rotoru. Pokud je však napětí tak velké, že působí mimo pásmo pružné deformace, dochází k deformaci, případně až k destrukci rotoru. [32]

Abychom mohli porovnávat jednotlivé materiály mezi sebou, zavádíme jednotky jako specifická hustota energie [W/kg] a objemová hustota energie [W/m³]. Objemová hustota energie se používá například při hledání optimálního materiálu pro rotor setrvačníku dětského autíčka, kde se nemusíme obávat, že by dítě dokázalo dosáhnout takových otáček, že by napětí rotoru přesáhlo svojí mez. [33] V těchto případech je poloměr a objem setrvačníku spolu s maximálními otáčkama omezen, hledáme tedy materiál s největší hustotou. Na rozdíl od toho specifická hustota energie je používána právě při porovnávání například rotorů setrvačnickových baterií. Nejlepší materiály pro rotory vysokootáčkových setrvačnicků mají mít vysokou pevnost v tahu a nízkou hustotu. [30] Zde hraje roli také koeficient K , což je jednoduše řečeno hodnota udávající využití potenciálu materiálu v daném tvaru rotoru. Tyto koeficienty najdeme na obrázku 7 a platí pro tenké rotory z homogenního izotropního materiálu s hodnotou Poissonova čísla rovné 0,3 (což je například ocel).

Fly wheel geometry	Cross section	Shape factor K
Disc		1.000
Modified constant stress disc		0.931
Conical disc		0.806
Flat unpierced disc		0.606
Thin firm		0.500
Shaped bar		0.500
Rim with web		0.400
Single bar		0.333
Flat pierced bar		0.305

Obrázek 7, Tvarový součinitel K [28]

V trojrozměrných tělesech dochází k trojrozměrnému napětí, což je pro anizotropní materiály problém. Ideální tvar pro tyto materiály je dutý válec, jehož konstanta K je rovna 0,5.

Další neodmyslitelnou položkou pro porovnávání materiálů je jejich cena. [35]

Materiály obecně dělíme na izotropní a anizotropní. Rozdíl mezi nimi je v tom, že izotropní materiály mají na rozdíl od anizotropních stejné vlastnosti ve všech směrech. [33]

4.1 Izotropní materiály

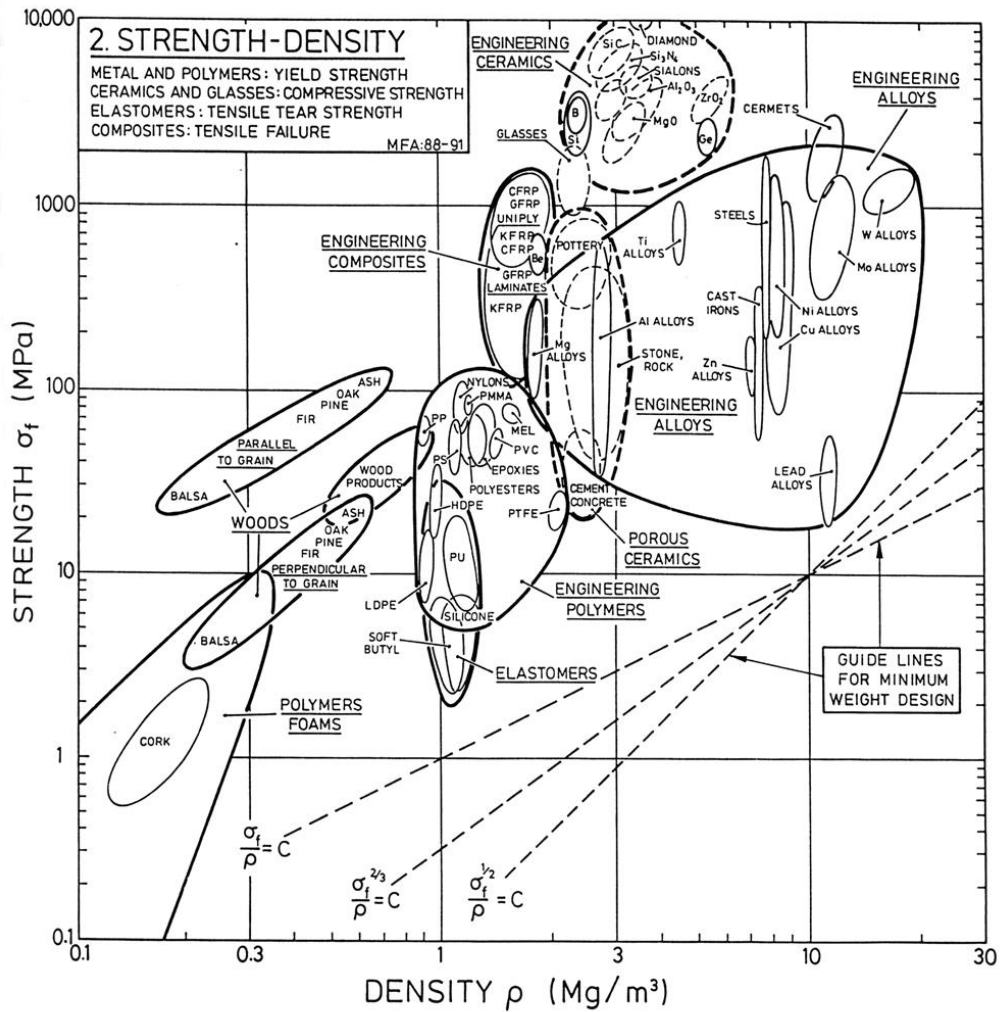
Mezi klasické izotropní materiály patří zejména kovy a jejich slitiny. Díky obrobitelnosti můžeme získat tvar, který má všude stejné napětí, což nám v zásadě zvyšuje účinnost rotoru, protože není žádná jeho část výjimečně namáhána. Mezi izotropní materiály patří i keramika. Izotropním materiálem může být i vhodně sestrojený kompozit. Tyto materiály se často vyskytují ve tvarech, ve kterých dochází k rovnoměrnému napětí (tvar s koeficientem $K=1$).

4.2 Anizotropní materiály

Typickými představiteli anizotropních materiálů jsou určité druhy kompozitů, například dřevo či uhlíková vlákna. Takové látky mají ve směru vláken dobrou odolnost vůči namáhání. Kompozity jsou látky, které se skládají z dvou a více materiálů, které dohromady vytvářejí materiál a lepších vlastnostech, než jeho jednotlivé komponenty. V případě uhlíkového kompozitu se jedná o uhlíková vlákna zalitá pryskyřicí, výsledkem je materiál s vyšší pevností a nižším modulem pružnosti ve směru vláken.

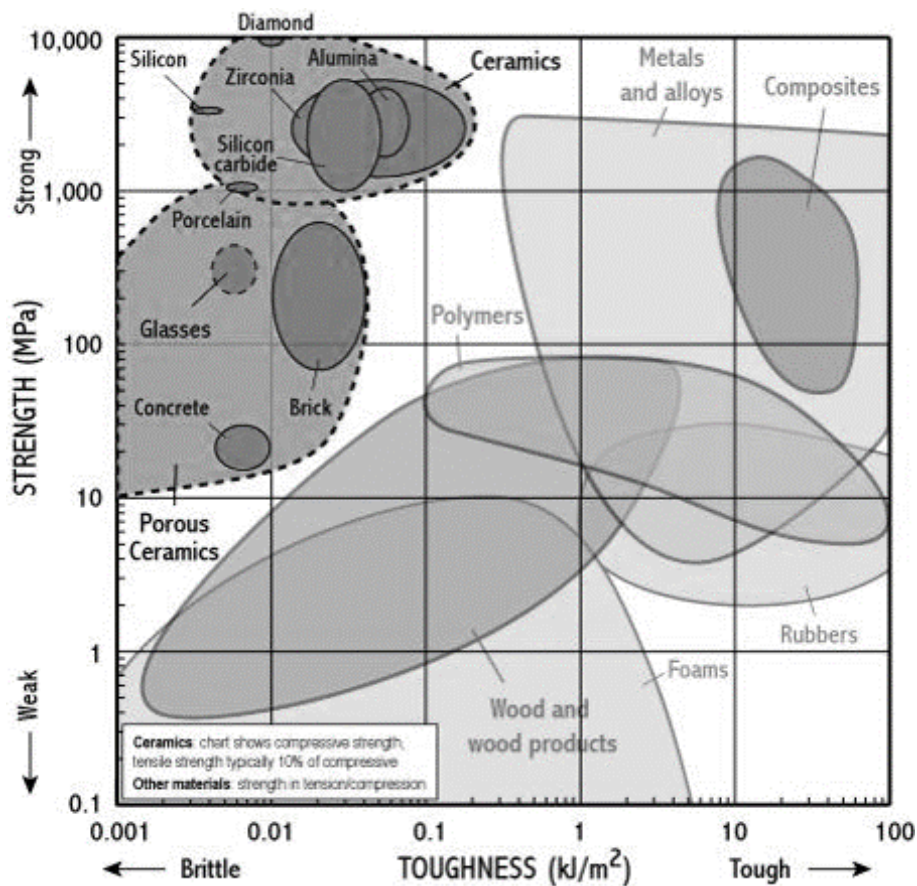
4.3 Způsoby porovnání materiálů

Jak již bylo zmíněno, materiály pro výrobu rotoru setrvačnickové baterie porovnáváme pomocí specifické hustoty energie, což je v zásadě poměr maximálního dovoleného napětí materiálu v tahu a jeho hmotnost. Čím větší číslo, tím je materiál vhodnější. To lze vyčíst z obrázku 8, ve kterém jsou zobrazeny vlastnosti nejčastěji používaných materiálů. V grafu je na logaritmické stupnici zobrazena pevnost v tahu (strength) a hustota (density).



Obrázek 8, Graf napětí a hustoty materiálů [36]

Z toho lze snadno vyčíst, proč používáme kompozity či titanové slitiny namísto korku či slitin olova. Tento graf ale také ukazuje, že by pro nás bylo naprosto nejlepší, kdybychom k výrobě rotoru setrvačnickové baterie použili keramiku. Ta by se poměrem maximálního napětí a hustoty zdála být optimálním materiálem pro setrvačnickové baterie. Keramika má ale jednu nepřijatelnou vlastnost, a to její křehkost. V případě naprosto dokonalé keramiky by to nebyl problém, ale protože v reálném světě není nic 100 %, byla by zde s velkou pravděpodobností nějaká prasklina, která by se právě kvůli křehkosti keramiky rozšířila a došlo by k destrukci tělesa. Obrázek 9 zobrazuje v logaritmických stupnicích maximální napětí (strength) a pevnost (toughness) jednotlivých materiálů.



Obrázek 9, Graf křehkosti a napětí materiálů [37]

4.4 Příklady materiálů

Pro uchování energie nemají olověné rotory z dětských hraček uplatnění. Používají se většinou různé ocele či uhlíkové kompozity. Pro porovnávání materiálů jsem jako hlavní kritéria zvolil specifickou hustotu energie a cenu za materiál. Cena je pouze za materiál, ne za vyrobený rotor, takže například rotory z kompozitních materiálů budou ve finále ještě mnohem dražší kvůli náročnosti jejich výroby. [33]

Z uhlíkových kompozitů zařadím do srovnání T1000 a AS4C. Každý vyrábí jiná firma a původně vznikly pro letecký a kosmický průmysl. T1000 se nyní dost využívá pro stavbu rámu bicyklů. Z ocelí budu porovnávat AISI 4340 (Ni-Cr-Mo ocel), AISI 4130 (25CrMo4) a titanovou ocel Ti6Al4V. Pro zajímavost uvedu ještě hliníkovou slitinu, konkrétně 7020T6. Všechny výše zmíněné materiály jsou spolu s důležitými vlastnostmi uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2, Vlastnosti vybraných materiálů [38, 39, 40, 41. 42]

Materiál	Specifická hustota energie [MPa*m³/kg]	Hustota [kg/m³]	Pevnost v tahu [MPa]	Cena [\$/Kg]	Cenová výhodnost [MPa*m³/\\$]
Olovo	0,00106	11340	12	1,90	0,00056
AISI 4130	0,07134	7850	560	0,65	0,10975
AISI 4340	0,09490	7850	745	1,0	0,09490
Ti6Al4V	0,26786	4480	1200	13,0	0,02060
7020T6	0,12590	2780	350	2,9	0,04341
T1000	2,00000	1520	3040	101,8	0,01965
AS4C	1,23933	1780	2206	31,3	0,03960

Jak je vidět z tabulky 2, bez ohledu na cenu materiálu jasně vyhrává uhlíkový kompozit T1000. Protože je ale zároveň nejdražším, zdá se, že ekonomicky nejvýhodnější je materiál AISI 4340 (Ni-Cr-Mo ocel), spolu s AISI 4130 (25CrMo4). [27] Avšak vzhledem k tomu, že jsem vybral jen určitý vzorek materiálů, je pravděpodobné, že existuje i vhodnější materiál.

Pevnost v tahu musíme ještě vydělit bezpečnostním koeficientem, aby nedošlo k trvalé deformaci nebo destrukci materiálu. Musíme se tedy pohybovat v oblasti pružné (elastické) deformace, kde se těleso po ukončení působení síly vrátí do původního tvaru. Velikost napětí tedy v žádném případě nesmí překročit mez pružnosti, případně smluvní mez kluzu (pokud je mez pružnosti rozeznatelná). Pro obě dále používané ocele (AISI 4130 a 4340) jsem zvolil koeficient bezpečnosti 5, stejně tak pro hliníkovou slitinu 7020T6. [43] Volba tohoto koeficientu bezpečnosti by měla být dostatečná.

5 Možné návrhy rotorů setrvačnickové baterie

Dříve byly používány těžké ocelové rotory a mechanická ložiska. Tyto systémy měly nevýhodu svojí hmotností a také tím, že energie v nich uložena se rychle „vytrácela“, protože docházelo ke ztrátám v ložiskách a ke ztrátám z odporu vzduchu.

Dnešní systémy jsou založené převážně na vysokých otáčkách (20000-50000 RPM), jsou většinou vyrobené z kompozitu, mají magnetická ložiska a jsou uložena ve vakuu. [26]

5.1 Požadavky na setrvačnickovou baterii a její rotor

Já se zde budu zabývat pouze tvarem a materiálem rotoru, protože to je díl, u kterého dochází k největším rozdílům. Protože celý systém musí být kompaktní, mají mé návrhy rozměrové omezení 100 mm x 100 mm x 100 mm. S těmito podmínkami jsem vytvořil několik ukázkových kombinací tvarů a materiálů rotorů. Ten paprskovitý jsem se později snažil tvarově optimalizovat v programu Inspire od společnosti solidThinking/Altair.

Všechny mnou navržené rotory by byly uloženy v magnetických ložiskách s permanentními magnety. Tento systém je jednodušší a není potřeba řídicího mechanismu. Kdyby se použily aktivní ložiska, bylo by dobré pro případ selhání uložit rotor ještě do klasických valivých ložisek. Kolem rotoru by byl hermeticky uzavřený obal z dostatečně odolného materiálu. Ten by sloužil jako ochrana před oštěpkou vzniklými případnou destrukcí rotoru. Zároveň by z něho byl odčerpán vzduch, aby byly sníženy ztráty vzniklé třením o médium (vzduch). Systém by byl dimenzován na středoevropský rozsah teplot, tedy od -30 °C do 50 °C.

5.2 Jednotlivé návrhy

Rozhodl jsem se udělat 5 návrhů a ten nejzajímavější poté optimalizovat pomocí programu Inspire. Jako materiály jsem použil ocele AISI 4130 a AISI 4340 a hliníkovou slitinu 7020T6. Ocele jsem zvolil z toho důvodu, že jsou cenově velice výhodné, hliníkovou slitinu z důvodu její nízké hmotnosti. Rád bych použil i uhlíkový kompozit T1000, protože má pro setrvačnickovou baterii velice dobré parametry. Jelikož chci všechny varianty poté porovnat, musím uhlíkový kompozit vyřadit z důvodu jeho anizotropnosti (vytvoření anizotropního materiálu by bylo příliš obtížné).

Všechny mnou navržené rotory mají vnější průměr 100 mm. Z tvarů jsem vybral plný válec o šířkách 50 mm a 10 mm a dutý válec o šířce 10 mm a tloušťce 20 mm. Plný válec o šířce 10 mm jsem se poté snažil optimalizovat, to je popsáno v části 6.3.

První návrh byl udělat rotor ve tvaru plného válce o šířce 50 mm z oceli AISI 4340, což je nikel-chrom-molybdenová (Ni-Cr-Mo) ocel. Je to nejčastěji používaný tvar v dětských hračkách s použitím vhodnějšího a levnějšího materiálu.

Pro snížení trojrozměrných napětí, která jsou kritická hlavně pro anizotropní materiály, je vhodné udělat z plného válce plný kotouč. Pro takové těleso jsem zvolil šířku 10 mm, tedy 10 % jeho průměru. Rozhodl jsem se pro 3 materiály, a to pro ocel AISI 4130 a 4340 a hliníkovou litinu 7020T6. Ocel 4340 z toho důvodu, abych mohl porovnat válec a kotouč ze stejného materiálu.

Dalším často užívaným a diskutovaným tvarem je tvar tenkostěnného dutého válce. Tento tvar můžeme také nazvat dutým kotoučkem nebo prstencem. Protože má tento tvar při stejné hmotnosti větší moment setrvačnosti, je celý setrvačnický buď lehčí, nebo je schopen uchovat větší množství energie. Materiál je opět ocel AISI 4130, aby bylo možné různé tvary porovnat. Tloušťku stěny jsem zvolil 10 mm. První tři tvary lze vidět na obrázku 10.



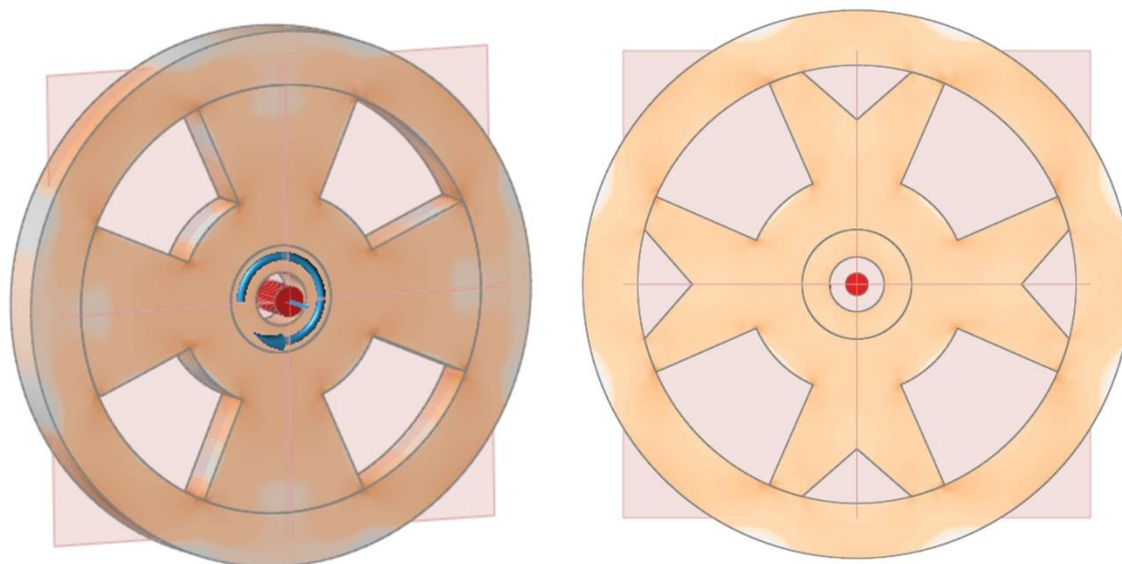
Obrázek 10. Návrhy rotoru setrvačnickové baterie
(zleva plný válec, plný tenkostěnný válec, dutý tenkostěnný válec)

5.3 Optimalizovaný návrh

Při optimalizaci v programu Inspire jsem chtěl dosáhnout toho, aby měl výsledný rotor tvar prstence s paprsky. Vycházel jsem tedy ze tvaru plného kotouče, který jsem si rozdělil na 3 části. Vnitřní, střední a vnější. Vnitřní byla do poloměru 10 mm, střední od 10 mm do 40 mm a vnější od 40 mm do 50 mm.

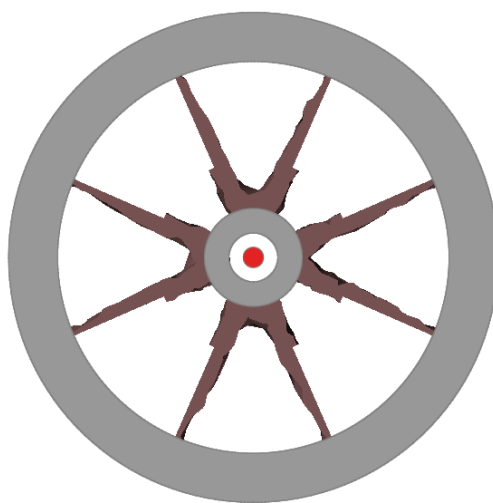
Aby měl program co počítat, musel jsem ještě vyjmout nějaký materiál ze střední části. To jsem udělal tak, že jsem do střední části udělal 4 stejné výseče, které měly úhel 42° a byly ve střední části, v rozsahu poloměru od 20 mm do 40 mm. Tímto krokem jsem z rotoru odebral 13,87 % materiálu.

Těleso jsem v programu ukotvil, nastavil mu materiál AISI 4130 a roztočil ho na 25000 RPM. Poté jsem si nechal vykreslit napětí v rotoru. (obrázek 11, vlevo) Zjistil jsem, že při vnější hraně střední části, tam, kde je materiál dlouho v kuse, je napětí nízké. Odstranil jsem tedy z rotoru další 4 segmenty materiálu, které ušetřily dalších 6,12 % hmotnosti původního rotoru. Poté jsem si opět nechal vykreslit napětí v rotoru při 25000 RPM. (obrázek 11, vpravo)



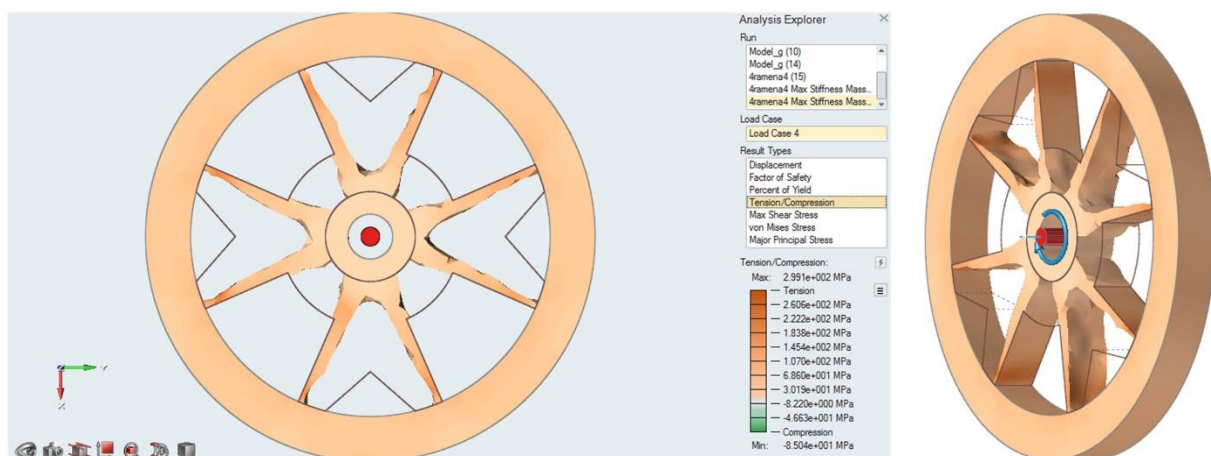
Obrázek 11, Rozložení napětí před druhým odebráním materiálu (vlevo) a po něm (vpravo)

Těleso bylo připraveno k druhé fázi optimalizace. Tou byla optimalizace tvaru podle programu. Nechal jsem ho optimalizovat tvar s tím, aby to počítal s cílem dosáhnout maximální tuhosti a při zachování 40 % původního hmotnosti. V této fázi mi program po proběhnutí simulace v krocích ukázal, kde jsou nejvíce zatížená místa a s každým dalším krokem přidal další rozpětí napětí a materiál. V prvních fázích nebyl graficky propojený vnitřní a vnější segment rotoru. Tvar na obrázku 12 vypadal slibně, a tak jsem ho použil dále k výpočtům. Při tomto tvaru bylo z tělesa odejmuto dalších 42,84 % materiálu.



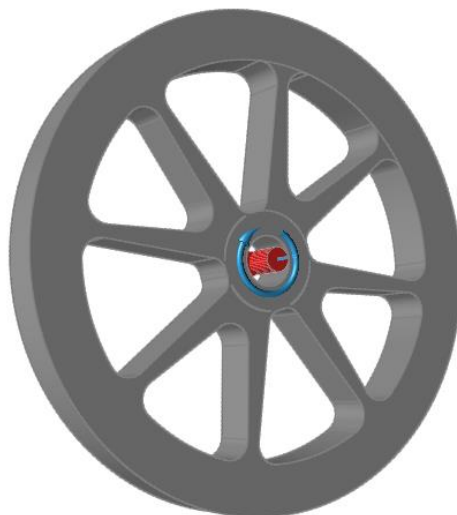
Obrázek 12, Optimalizovaný tvar rotoru setrvačnicku pomocí programu Inspire

Nakonec jsem ještě tento tvar rotoru nechal opět rotovat 25000 RPM. Z grafického znázornění je patrné, že k největšímu namáhání dochází u tohoto nového tvaru v místě styku paprsků s vnější obroucí. (obrázek 13)



Obrázek 13, Napětí v optimalizovaném rotoru

Tento tvar byl poměrně složitý a hrubý, což bylo pro výpočty hodně náročné, musel bych zadat velmi malou velikost elementu (asi kolem desetiny milimetru), což by zpomalilo výpočty na řády hodin. Z tohoto důvodu bylo nejvhodnější vytvořit nový, pravidelný tvar, složený jen z přímkou a kružnic, který byl inspirován tím vytvořeným programem.









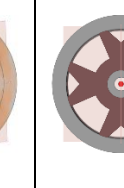
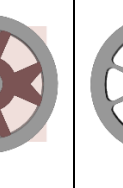
Obrázek 14, Optimalizovaný tvar inspirovaný výpočty Inspiru

Dosáhl jsem tak tvaru (obrázek 14), který oproti plnému rotoru dosáhl materiálové úspory 60,60 % za poklesu moment setrvačnosti o pouhých 40,80 %.

5.4 Varianty

Po optimalizaci je celkem 8 variant. Všechny jsem vytvořil v programu Inspire a pomocí něho je analyzoval. V tabulce 3 lze najít všechny varianty i s jejich parametry vypočtenými programem. Program práci usnadnil hlavně tím, že spočítal moment setrvačnosti a později i maximální napětí vzniklé rotací rotoru.

Tabulka 3, Tabulka tvarových vlastností jednotlivých variant

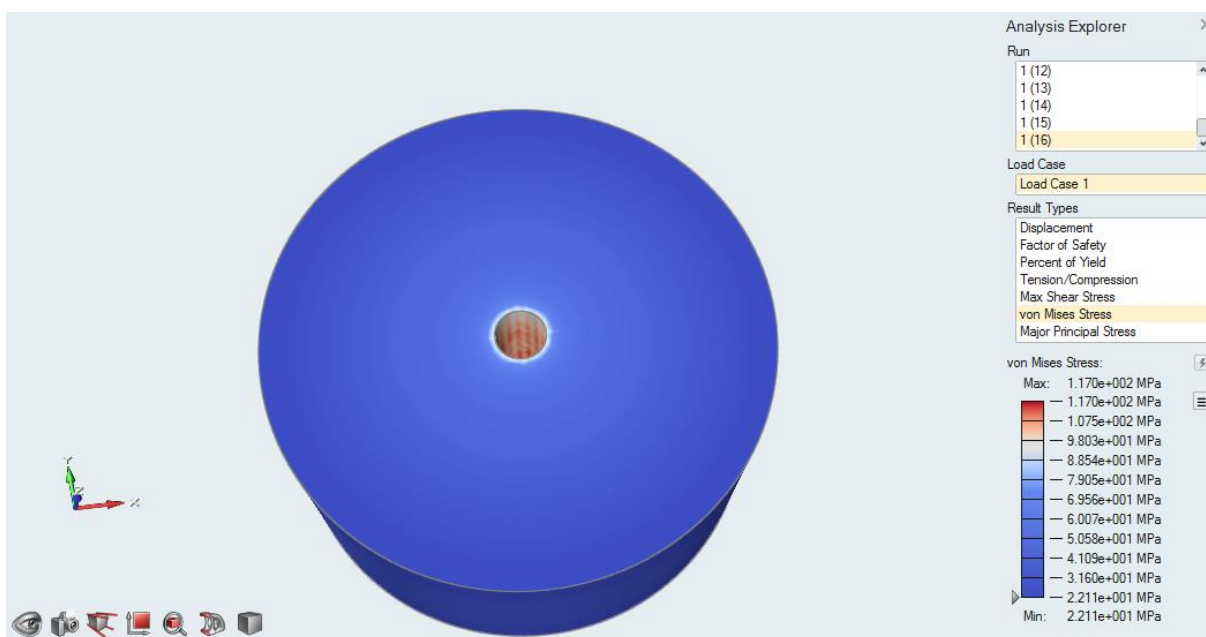
								
Varianta	1	2	3	4	5	6	7	8
Materiál	4340	4340	7020T6	4130	4130	4130	4130	4130
Hmotnost [kg]	3,0519	0,6104	0,2162	0,6026	0,2220	0,4635	0,4312	0,2374
J [kg*mm ²]	3583	770,59	272,90	760,78	455	621,69	578,19	450,35
Tloušťka [mm]	50	10	10	10	10	10	10	10
Cena [\$]	3,05	0,61	0,63	0,39	0,14	0,30	0,28	0,19
J/m [kg*mm ² /kg]	1174	1263	1262	1251	2050	1341	1341	1897

Výše uvedené varianty jsem v programu postupně zatěžoval otáčkami a sledoval, jakých hodnot dosáhne maximální napětí rotoru. Otáčky jsem volil po 5000 RPM od 10000 RPM do 50000 RPM. V následujících podkapitolách stručně popíši a ukážu, jak která varianta byla zatížením poznamenána. V každém grafu je červeně vyznačené maximální dovolené napětí a jemu odpovídající úhlová rychlost.

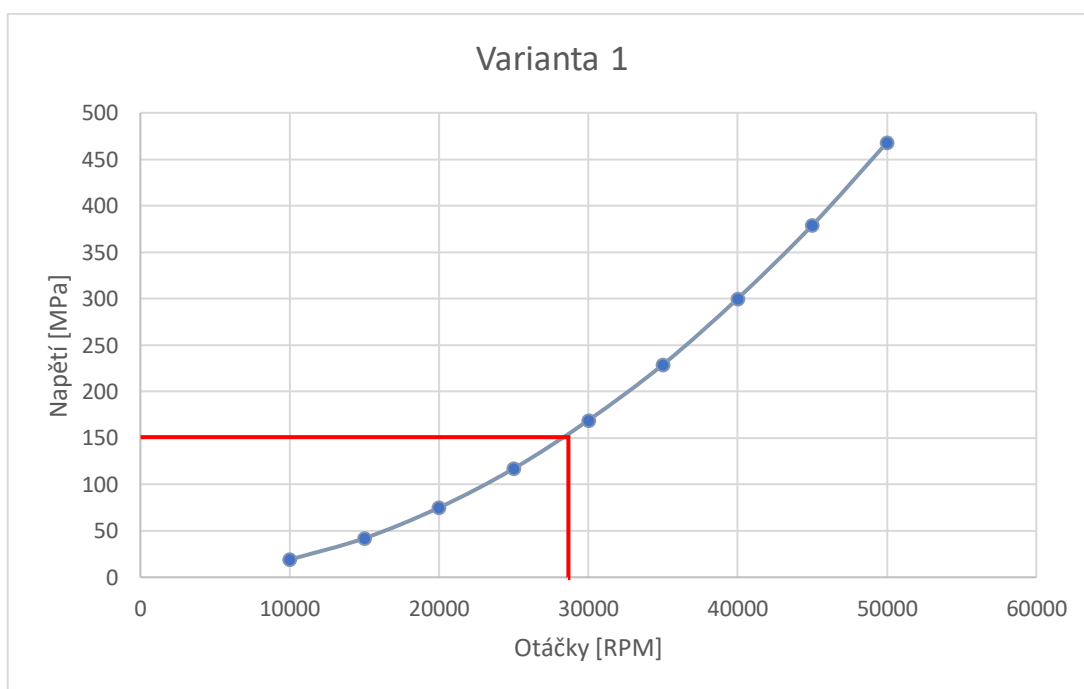
Všude dále zmiňované napětí jsou napětí von Mises. Při simulacích jsem určil pro všechny tvary stejnou velikost elementu, a to 2 mm. Díky této velikosti elementu jsem mohl provést více výpočtu a zabírat se spíše porovnáním více variant tvarů a materiálů než přesným spočítáním menšího počtu vzorků. Tento styl je pro účel mé bakalářské práce nejvhodnější.

5.4.1 Varianta 1

Tvar plného válce jsem bral jako výchozí. Už od začátku jsem začal používat kvalitní materiály. Pro tento rotor je použita ocel AISI 4340, která s použitím koeficientu bezpečnosti 5 vydrží při tomto tvaru otáčky 28000 RPM. (obrázek 16) Ze mnou vytvořených variant je tato nejtěžší, zároveň má ale největší moment setrvačnosti. Největší napětí v takovémto tvaru se nachází uprostřed tělesa v místě, kde bude připojeno na hřídel. (obrázek 15)



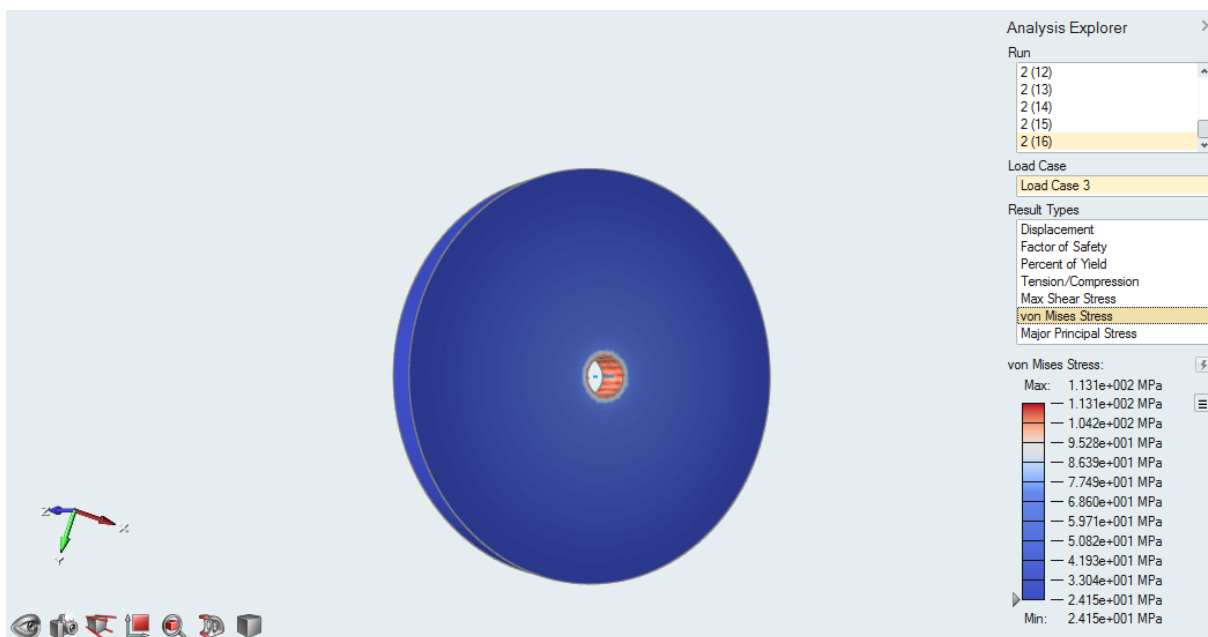
Obrázek 15, Napětí v rotoru č. 1 při 25000 RPM



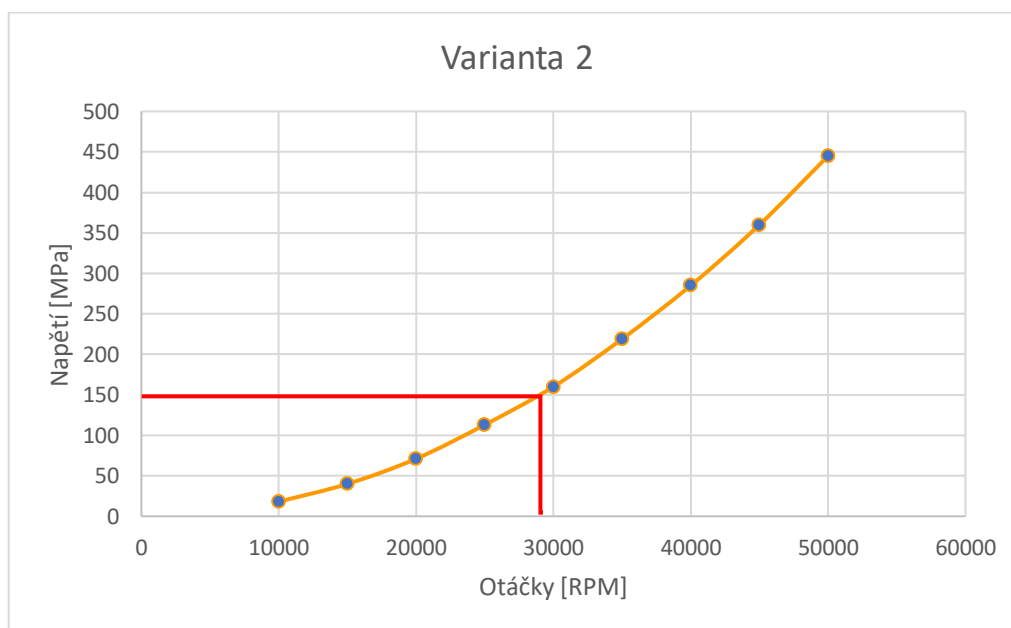
Obrázek 16, Graf napětí rotoru č. 1

5.4.2 Varianta 2

Tenkostěnný válec (či kotouč) jsem vytvořil proto, aby bylo možné umístit do systému více takovýchto rotorů opačné rotace za dodržení kompaktních rozměrů. Tím, že se budou sousední rotory točit opačným směrem, snížíme velikost gyroskopických vlivů rotoru na vozidlo. Tato varianta je vyrobena stejně jako varianta 1 z ocele AISI 4340 s koeficientem bezpečnosti 5, aby bylo možné varianty 1 a 2 porovnat. Maximální napětí se také nachází na vnitřní straně tělesa, tento rotor může dosáhnout otáček 29000 RPM. (obrázky 17 a 18)



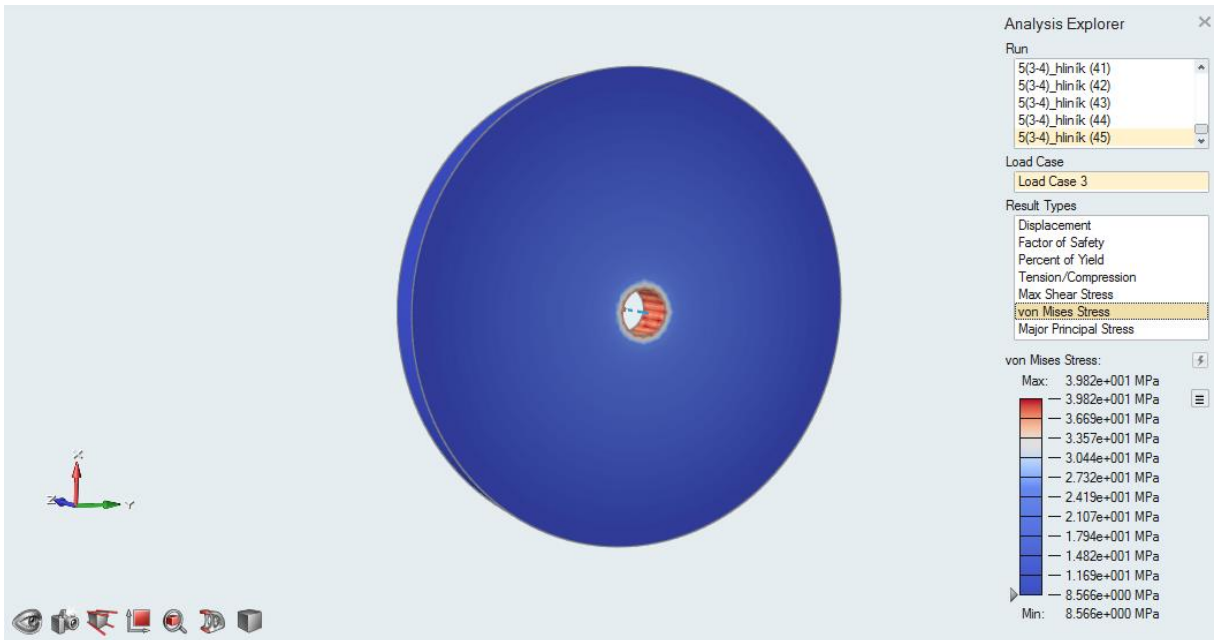
Obrázek 17, Napětí v rotoru č.2 při 25000 RPM



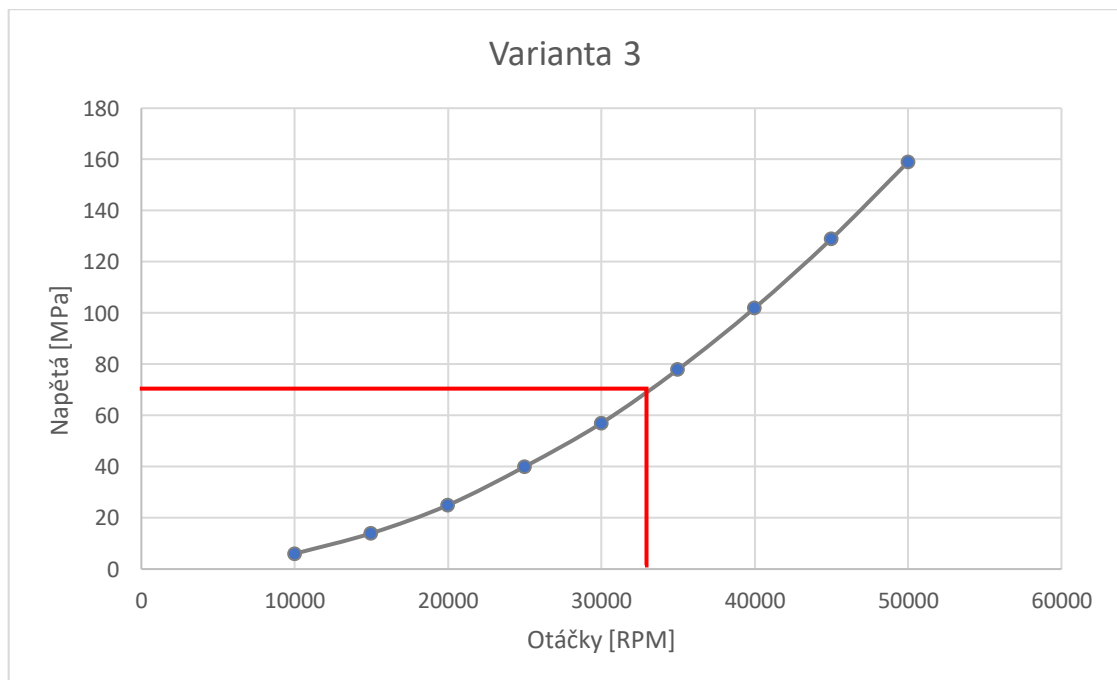
Obrázek 18, Graf napětí rotoru č.2

5.4.3 Varianta 3

Toto je jediná varianta, ve které se vyskytuje hliníková slitina, v mém případně se jedná o 7020T6. Pro tuto slitinu jsem použil stejný koeficient bezpečnosti jako pro ocel. Rozmístění napětí je také stejné (obrázek 19), jen otáčky, při kterých dochází k maximálnímu napětí, jsou vyšší. Tato hliníková slitina by měla vydržet 33000 RPM. (obrázek 20)



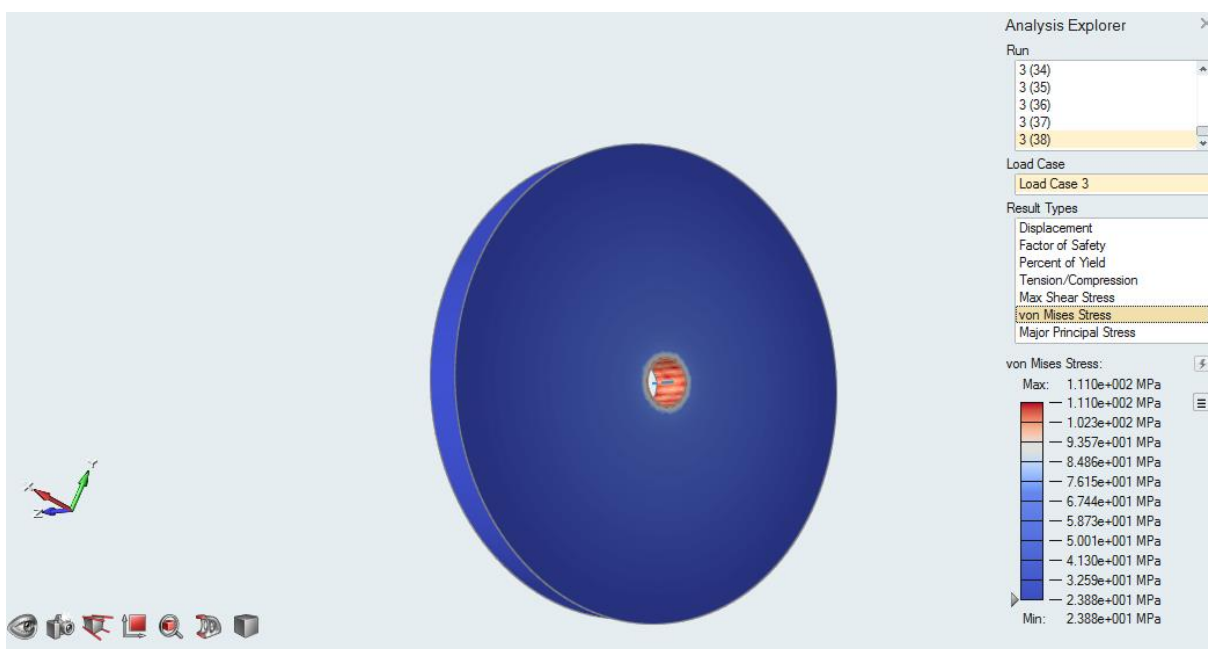
Obrázek 19, Napětí v rotoru č.3 při 25000 RPM



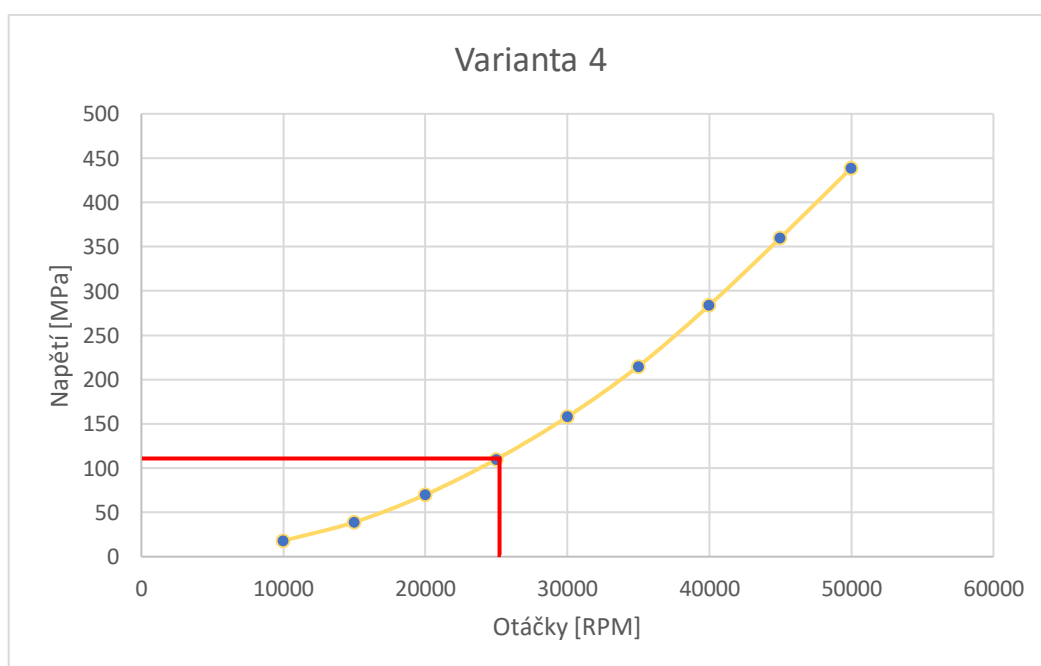
Obrázek 20, Graf napětí rotoru č.3

5.4.4 Varianta 4

Ve čtvrté variantě se poprvé objevuje materiál, který je použit ve všech následujících variantách. Jedná se o ocel AISI 4130, tedy o 25CrMo4 ocel. Pro ni jsem, jako pro ostatní, zvolil také koeficient bezpečnosti 5. Rozložení napětí je v tomto tvaru stejné, jako v předchozích. (obrázek 21) Volbou materiálu je maximální úhlová rychlost snížena na 25000 RPM. (obrázek 22) Jeho největším pozitivem je jeho cenová výhodnost.



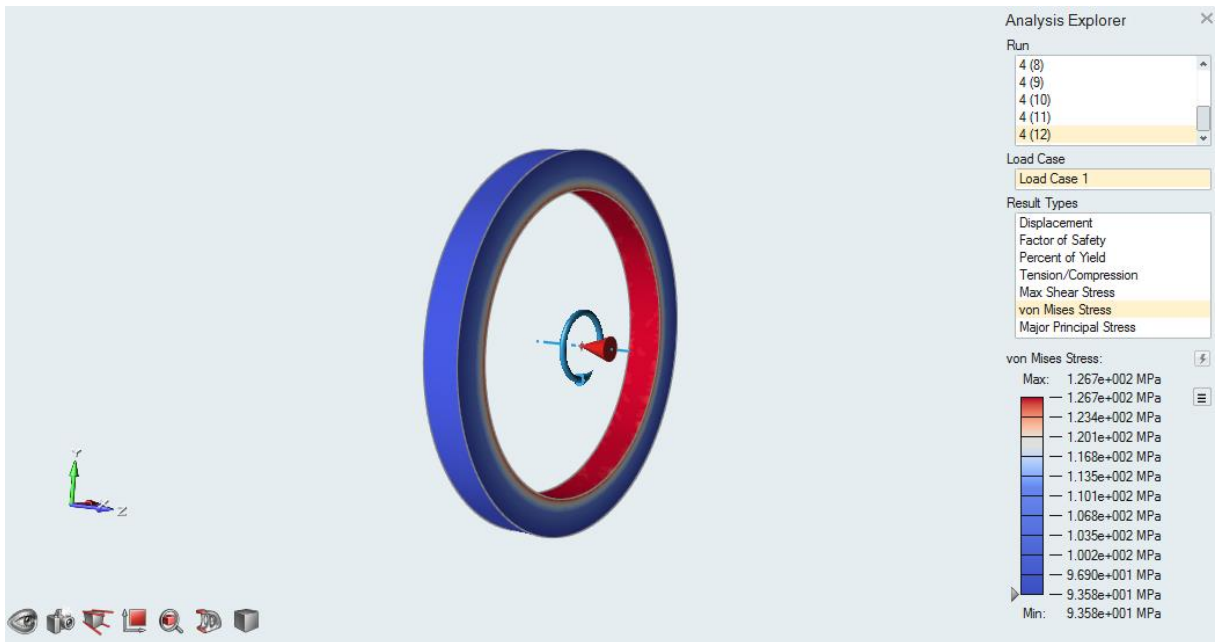
Obrázek 21, Napětí v rotoru č.4 při 25000 RPM



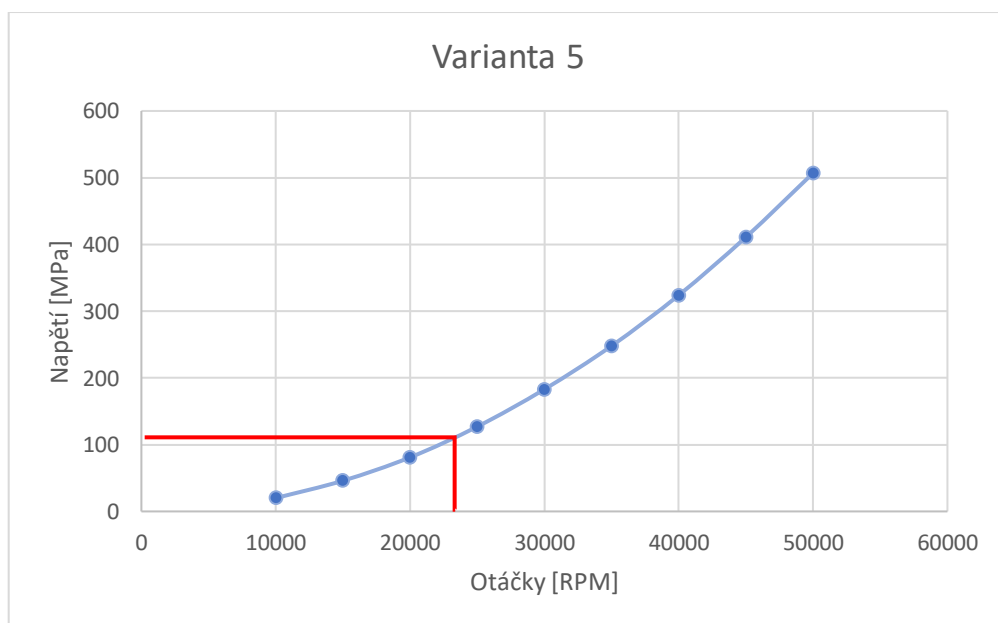
Obrázek 22, Graf napětí rotoru č.4

5.4.5 Varianta 5

Tvar tenkostěnného válce je pro maximalizaci momentu setrvačnosti nejlepší. Moje varianta má tloušťku stěny 10 mm a je vyrobena z oceli AISI 4130. Největší napětí je opět na vnitřní straně rotoru. (obrázek 23) Tento tvar má suverénně nejlepší poměr momentu setrvačnosti a ceny za materiál. Problém je, že ho ještě musíme nějak přichytit k ose. Proto vznikly další varianty. Tento prstenec dosahuje maximálního dovoleného napětí při 23000 RPM. (obrázek 24)



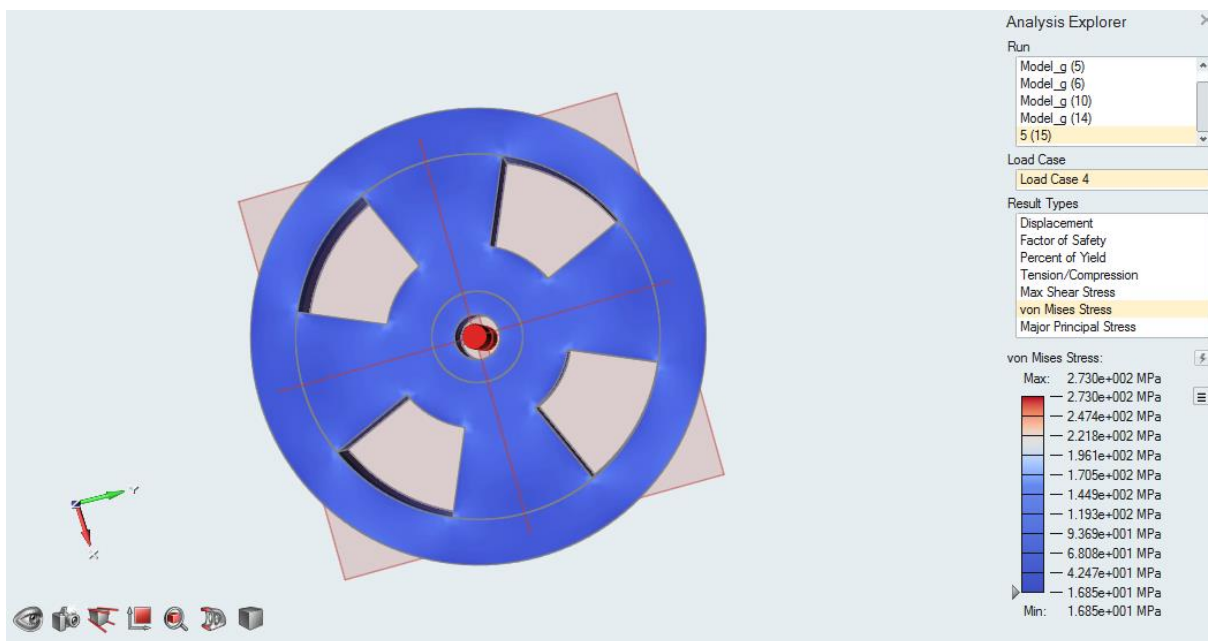
Obrázek 23, Napětí v rotoru č.5 při 25000 RPM



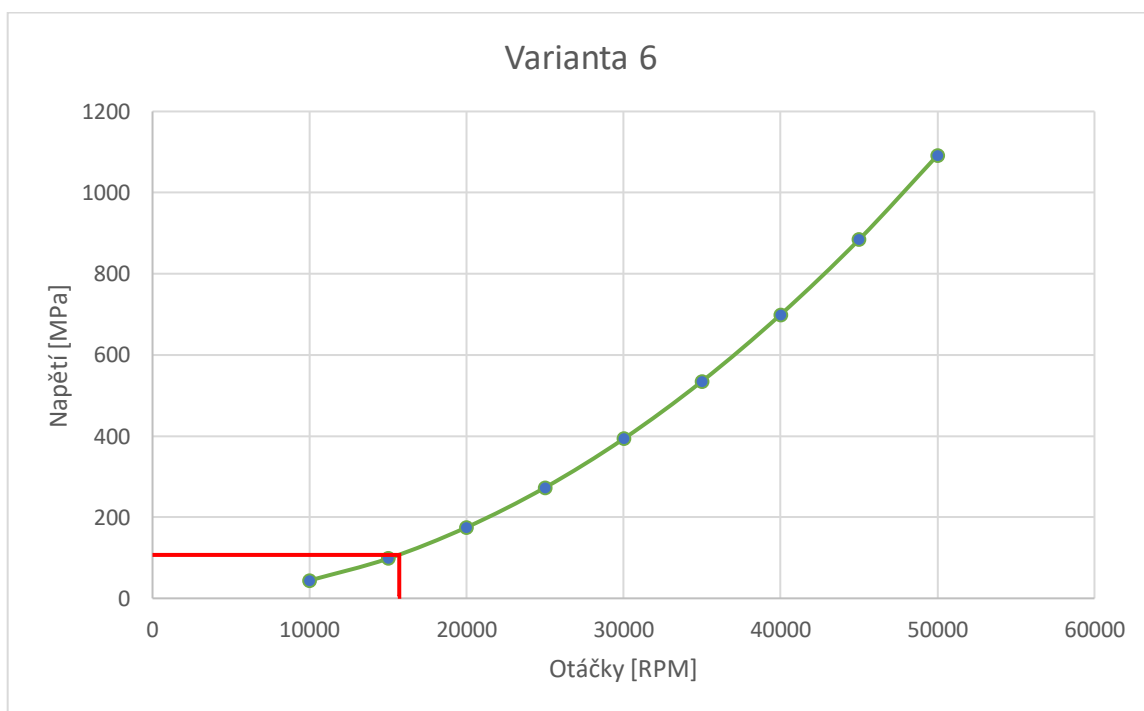
Obrázek 24, Graf napětí rotoru č.5

5.4.6 Varianta 6

Varianta 6 vznikla tak, že jsem variantu 4 odlehčil o 4 stejné segmenty. Účelem tohoto bylo, abych mohl začít pracovat s programem Inspire na optimalizaci tvaru. Takovýto rotor dosahuje maximálního dovoleného napětí při 16000 RPM (obrázek 26) a je spíše takovým mezikrokem pro další vývoj. Na obrázku 25 vidíme, že nejvyšší napětí se koncentruje ve výřezech.



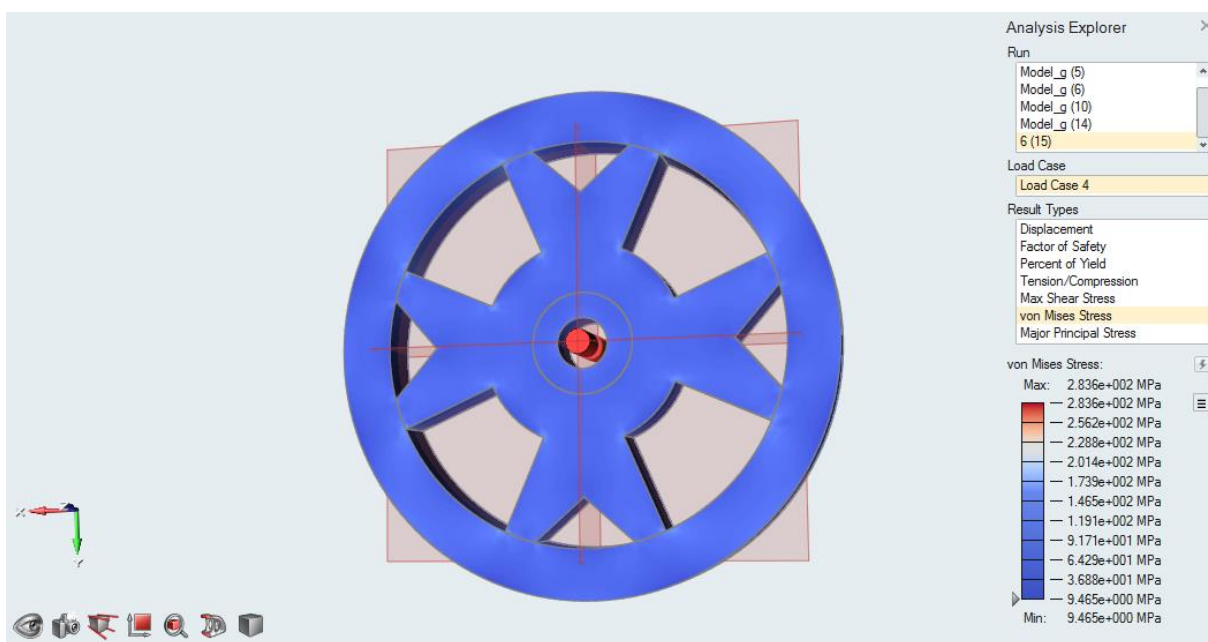
Obrázek 25, Napětí v rotoru č.6 při 25000 RPM



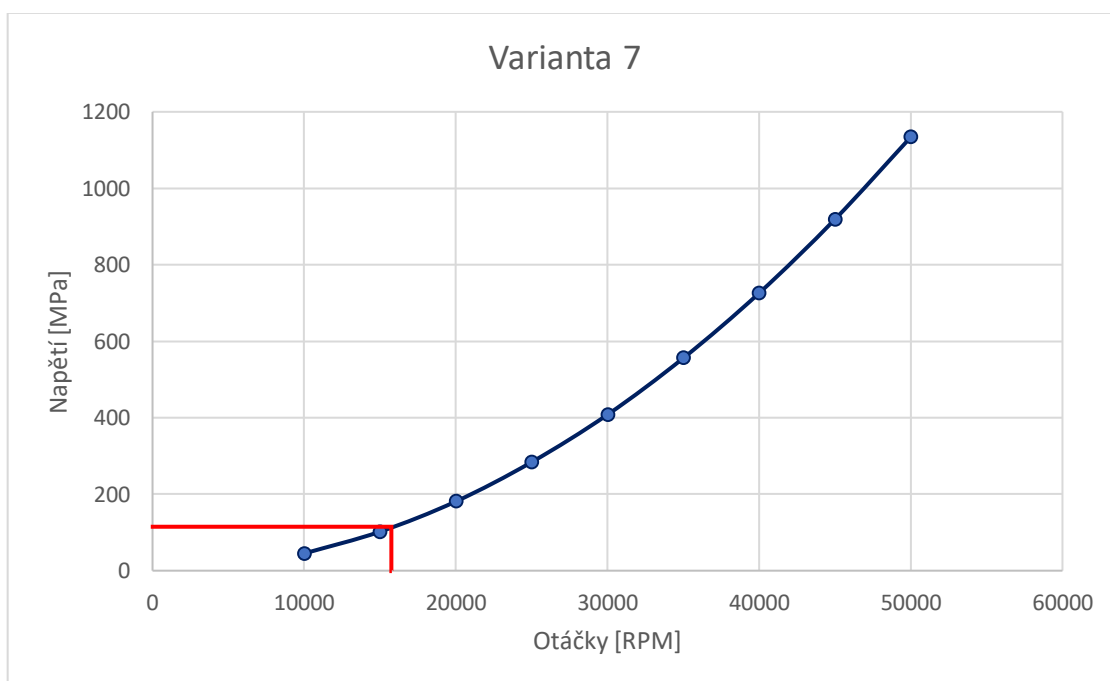
Obrázek 26, Graf napětí rotoru č.6

5.4.7 Varianta 7

Po analýze varianty 6 jsem odstranil ještě další 4 segmenty z paprsků. Toto je už tvar, který jsem později nechal tvarově optimalizovat. Tato varianta je opět takovým mezikrokem, její maximální otáčky jsou stejně jako u předchozí varianty 16000 RPM. (obrázek 28) Na obrázku 27 můžeme vidět, že největší napětí se nachází v místech styku paprsků s ostatními částmi rotoru. Zaoblením těchto úhlů snížíme maximální napětí v tomto rotoru.



Obrázek 27, Napětí v rotoru č. 7 při 25000 RPM



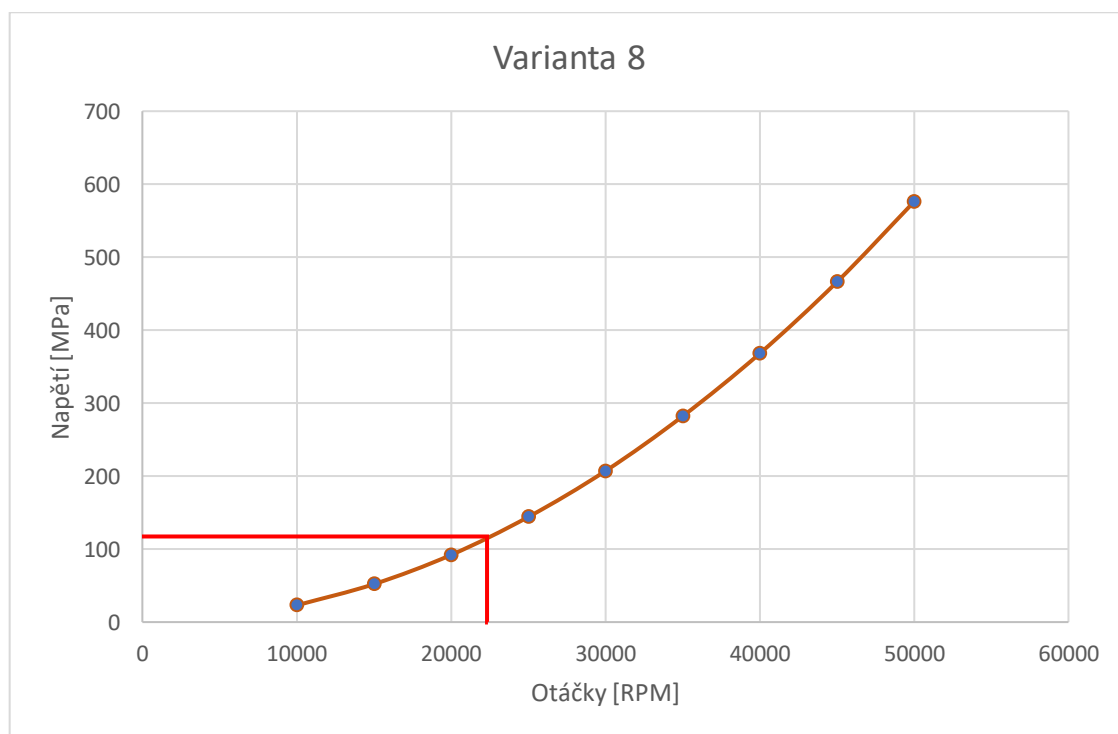
Obrázek 28, Graf napětí rotoru č. 7

5.4.8 Varianta 8

Programem optimalizovaný tvar jsem trochu zjednodušil a překreslil. Vznikl tak tento rotor s 8 paprsky. Na obrázku 29 vidět, že k největšímu napětí dochází v místech uchycení paprsků. Tyto napětí by se ještě daly snížit případným použitím jiné přechodnice nežli kružnice pro zaoblení spojů paprsků. Maximální otáčky jsou 22000 RPM. (obrázek 30)



Obrázek 29, Napětí v rotoru č.8 při 25000 RPM


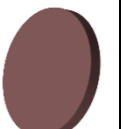


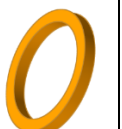

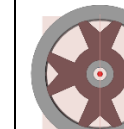
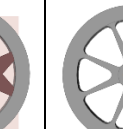


Obrázek 30, Graf napětí rotoru č.8

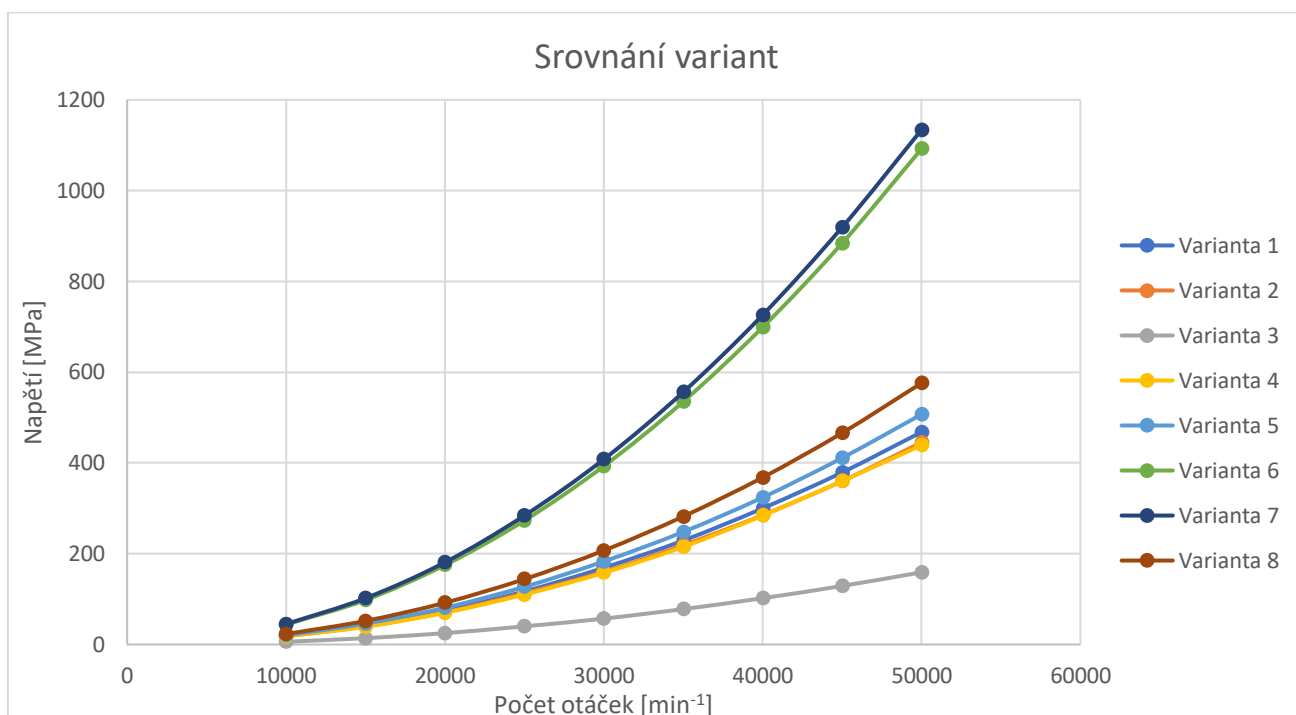
5.4.9 Srovnání variant

Tabulka 4 zobrazuje výsledky mých měření a výpočtů pomocí programu. Jak již bylo zmíněno, simulace probíhaly s velikostí elementu 2 mm, koeficient bezpečnosti pro výpočet maximálního dovoleného napětí byl určen na hodnotu 5. Tučně jsem zvýraznil ty hodnoty, které se nachází v okolí hodnot maximálního napětí.

Tabulka 4, Závislost napětí rotorů na otáčkách

								
Napětí [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8
Maximální	745	745	350	560	560	560	560	560
Dovolené	149	149	70	112	112	112	112	112
10000	19	18	6	18	20	44	45	23
15000	42	40	14	39	46	98	102	52
20000	75	71	25	70	81	175	181	92
25000	117	113	40	110	127	273	284	144
30000	169	160	57	158	183	393	408	207
35000	229	219	78	215	248	535	556	282
40000	300	285	102	284	324	699	726	368
45000	379	360	129	360	411	884	919	466
50000	468	445	159	439	507	1092	1134	576







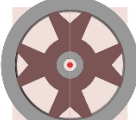

Z grafu na obrázku 31 vidíme, že největší napětí vznikaly ve variantách 6 a 7. To jsou ty, ve kterých jsem sám vyřiznul některé segmenty. Tato napětí vznikala v místech, kde nebyl plynulý přechod, což bylo v místech styku paprsků s vnitřní nebo vnější částí rotoru. Naopak nejmenší napětí vznikaly u varianty 3, a to z důvodu volby materiálu. Tato varianta byla vyrobena z hliníkové slitiny, takže byla lehká, díky čemuž nedocházelo v rotoru k vysokým napětím ani při vysokých otáčkách. Za zmínku stojí fakt, že napětí ve variantě 7 je při 50000 RPM menší, než napětí ve variantě 6 nebo 7 při 20000 RPM.



Obrázek 31, Srovnání variant, graf

Z těchto výpočtů si celkem jednoduše můžeme zjistit, jaké je nejvyšší možné zatížení daného rotoru a spočítat tak, jaké množství energie dokáže uchovat. Pro upřesnění otáček (na tisíce) jsem provedl ještě několik dodatečných simulací a porovnával jsem jejich maximální hodnoty napětí s těmi maximálními povolenými. Na závěr se porovná jeho cenová výhodnost vzhledem k uchované energii. Rotory, které dokáží uchovat nejvíce energie v porovnání ke své hmotnosti jsou nejvhodnějšími pro mobilní aplikace, protože tyto setrvačnickové baterie dokáží uchovat dostatečné množství energie a mít malý vliv na vozidlo. Mezi vlivy na vozidlo patří hlavně potřebný prostor pro zástavbu systému (v mé práci jako konstanta, 100 mm x 100 mm x 100 mm) a zatížení vozidla hmotností systému. Všechny tyto informace jsou přehledně zapsané v tabulce 5. U posledních 2 parametrů jsem tučně zvýraznil nejlepší trojici.

Tabulka 5, Energetické a ekonomické porovnání variant

								
	1	2	3	4	5	6	7	8
m [kg]	3,0519	0,6104	0,2162	0,6026	0,2220	0,4635	0,4312	0,2374
J [kg*mm ²]	3863,40	770,59	272,90	760,78	445	621,69	578,19	450,35
ω_{\max} [RPM]	28000	29000	37000	25000	23000	16000	16000	22000
ω_{\max} [rad*s ⁻¹]	2932	3037	3456	2618	2409	1676	1676	2304
E_{\max} [J]	16608	3553	1630	2607	1290	873	812	1195
cena [\$]	3,05	0,61	0,63	0,39	0,14	0,3	0,28	0,19
E_{\max}/m [J/kg]	5442	5821	7537	4327	5814	1883	1882	5034
E_{\max}/cena [J/\$]	5445	5825	2587	6685	9220	2909	2899	6290

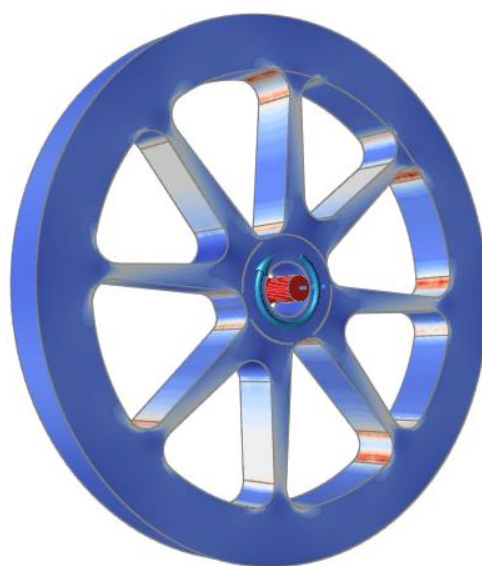
Jak můžeme vidět v tabulce 5, nejlepší poměr uchované energie na hmotnost má hliník. Cenově nejvýhodnější je prstenec, ale protože ho není možné uchytit ke hřídeli, tak ho nemohu počítat jak nejvýhodnějšího. Hned za ním je plný kotouč a programem optimalizovaný tvar. Zdá se tedy, že pro aplikace, kde hraje důležitou roli cena, je z mých kandidátů nejvýhodnější materiál AISI 4340, neboli 25CrMo4 ocel.

6 Závěr

Alternativní pohony budou v pravděpodobně více a více používané, hlavně kvůli všeobecnému tlaku na ekonomii a ekologii dopravních prostředků. Setrvačníky ani setrvačnickové baterie určitě nejsou za zenitem. Průkopníci v dopravě a motorsportu sázejí na tuto technologii, a tak je dost možné, že se za několik let objeví běžně i v civilních vozech. Velmi užité budou hlavně v dopravních prostředcích, které často mění svoji rychlost. Jedná se tedy především o městskou dopravu, ať už veřejnou, nebo osobní. Největší dopad by to mohlo mít právě v městské autobusové dopravě, protože spotřeba paliva a s tím spojené množství výfukových plynů je obrovská, navíc autobus často staví, ať už v zastávce, nebo na semaforech.

Setrvačnicková baterie s rotorem z materiálu 25CrMo4 se jeví jako slibná a dostupná varianta. Nyní záleží na tom, zda se této technologii chytne nějaká větší automobilka, která zafinancuje detailnější vývoj a následnou sériovou výrobu. Pokud výroba nebude sériová, bude pravděpodobně nákladnost systému tak vysoká, že její úspory nepřesáhnou její náklady. Pokud tomu tak bude, nebude systém rentabilní a nevyplatí se ho ani nakupovat, ale ani vyrábět. Pro moderního zákazníka musí být systém nejenom ekologický, ale i ekonomicky výhodný.

Pro budoucí vývoj by bylo vhodné zaoblit hrany křivkou, která by snížila vysoké napětí v okolí spoje paprsků s vnější či vnitřní částí rotoru. (obrázek 32) Zároveň by bylo žádoucí udělat více simulací a taky si nějaký podobný model udělat a pokusem zjistit, zda jsou naše výpočty správné, zda někde neděláme chybu.



Obrázek 32, finální verze rotoru

Dalším místem pro zpřesnění všech výpočtů by bylo s odborníkem detailně spočítat koeficient bezpečnosti po navrhované materiály při daných zatíženích. Navíc já jsem zde počítal pouze statické zatížení. Při dynamickém zatížení se budou koeficienty bezpečnosti zvyšovat, zároveň se bude zvyšovat maximální zatížení v rotorech. Důležitá bude nejvyšší hodnota decelerace, které bychom chtěli dosáhnout.

Rotor setrvačnicku by měl být uložen v magnetických ložiskách. Nejjednodušší by bylo použít pasivní magnetická ložiska, jelikož u aktivních by bylo v případě selhání řídicího systému nutné zajistit bezpečné zpomalení rotoru (sekundární valivá ložiska). Pro maximální snížení třecího odporu by měl být uložen ve vakuu. Rotor setrvačnicku by měl mít kolem sebe obal, který by v případě destrukce rotoru zamezil odletu odštěpků.

Doufám, že se programu Inspire podaří do budoucna naimplementovat i modul pro počítání s anizotropními materiály. Přidalo by to do porovnání variantu, která by pravděpodobně měla nejlepší hodnotu specifické hustoty energie. Na druhou stranu by se jednalo v vysokou pravděpodobností o nejdražší rotor co se týče nákladů na materiál a následnou výrobu rotoru z něho. Jaký by ale byl poměr uložené energie a nákladů na výrobu rotoru? To já už nezjistím, ale věřím, že toto téma zaujme i někoho z nastupujících studentů a ten na odpověď přijde.

7 Použité zdroje

- [1] JORDANS, Frank. EPA: Volkswagen Thwarted Pollution Regulations For 7 Years. *CBS Detroit* [online]. The Associated Press, 2015, 21. září 2015, **2015** [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://detroit.cbslocal.com/2015/09/21/epa-volkswagen-thwarted-pollution-regulations-for-7-years/>
- [2] PELTRÁM, Antonín a Magda MRAVČÍKOVÁ-DUCHEČKOVÁ. Doprava a životní prostředí - mýty a realita. *Doprava*. Praha: DTP Nadatur, 2009, **2009**(6), 30-35. ISSN 0012-5520. Dostupné také z: https://www.fd.cvut.cz/personal/tyfal/str/publikace/2010/doprava2009-k_reakci2.pdf
- [3] HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Energie pro 21. století*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00817-7.
- [4] Electrical Energy Storage. In: *Electrical Energy Storage: White paper* [online]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2011 [cit. 2017-06-20]. ISBN 978-2-88912-889-1. Dostupné z: <http://energystorage.org/system/files/resources/iecwp-energystorage-Ir-en.pdf>
- [5] Příprava vodíku elektrolýzou vody. In: *Enviroexperiment* [online]. Enviroexperiment, 2012 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.enviroexperiment.cz/chemie-stredni-skola/priprava-vodikuelektrolyzou-vody>
- [6] VANÝSEK, P., L. CHLADIL a P. DVOŘÁK. Velké srovnání metod a systémů uchovávání energie. Dostupně a schůdně. In: *Vyvoj.hw.cz: profesionální elektronika* [online]. Praha: HW server, 2011, 30. září 2015 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/velke-srovnani-metod-a-systemu-uchovavani-energie-dostupne-a-schudne.html>
- [7] VOJÁČEK, Antonín. Superkondenzátor - princip, vlastnosti, použití. In: *Automatizace.hw.cz* [online]. Praha: HW server, 2006, 26. prosinec 2006 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006122601>
- [8] REDAKCE ELEKTRO. Supravodivost – perspektivní technologie blízké budoucnosti. In: *Elektro: časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha: FCC PUBLIC, 2014 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/supravodivost-perspektivni-technologie-blizke-budoucnosti--12718>
- [9] Superconducting magnetic energy storage (SMES). In: *SuperPower* [online]. Schenectady: SuperPower, 2011 [cit. 2017-06-21]. Dostupné z: <http://www.superpower-inc.com/content/superconducting-magnetic-energy-storage-smes>

- [10] LARMINIE, James a John LOWRY. *Electric vehicle technology explained*. 2. Chichester: Wiley, 2012. ISBN 9781119942733.
- [11] CONWAY, Edmund. World's biggest battery switched on in Alaska. In: *The Telegraph* [online]. London: Telegraph Media Group, 2003, 28. srpen 2003 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.telegraph.co.uk/technology/3312118/Worlds-biggest-battery-switched-on-in-Alaska.html>
- [12] ANTHONY, Andrew. Smart Fortwo Ed: Is the future a Smart one? In: *Theguardian* [online]. London: Guardian News and Media, 2009, 21. březen 2009 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/technology/2009/mar/21/smart-fortwo-ed>
- [13] EBERHARD, Martin. A Bit About Batteries. In: *Tesla* [online]. Palo Alto: Tesla, 2006, 30. listopad 2006 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/blog/bit-about-batteries>
- [14] Enwave Chicago District Cooling System features large-scale Thermal Energy Storage (TES). In: *Youtube.com* [online]. Chicago: International District Energy Association, 2015 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=7IZ3PBr7dO4>
- [15] BRYANT, Victor. The Origins of the Potter's Wheel. In: *Ceramics Today* [online]. 2001, 6. duben 2001 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: http://www.ceramicstoday.com/articles/potters_wheel.htm
- [16] Steam engines. PATEL, R. C. a C. J. KARAMCHANDANI. *Elements of heat engines*. 18. Vadodara: Acharya publications, 1997, s. 241-300. Dostupné také z: <http://www.thermodynamicsheatengines.com/HeatEngines%20Vol%201%20Title%20Preface%20Contents%20Tables%20Index%20RSr.pdf>
- [17] FORSDYKE, Graham. A Brief History of the Sewing Machine. In: *ISMACS international* [online]. London: ISMACS [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: http://ismacs.net/sewing_machine_history.html
- [18] WINTERFLOOD, Beat. Voller Schwung unterwegs. In: *FBW* [online]. Wetzikon [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.fbw.ch/galerie/Gyrobus/gyrobus.HTM>
- [19] Gyrobus: a great idea takes a spin. In: *Proaktiva* [online]. 2008 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: http://photo.proaktiva.eu/digest/2008_gyrobus.html
- [20] Hitec Power Protection - Diesel Rotary UPS Systems - corporate video. In: *Youtube.com* [online]. Almelo: HITEC Power Protection, 2009, 7. duben 2009 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=jZjgx4BADf8>

- [21] Data Center Design: Battery-based / Static UPS or Rotary UPS? In: *Green Data Center Design and Management: Best Practices for Data Center Facilities Design, Efficiency and Operations* [online]. Hong Kong: Strategic Media Asia, 2013, 12. listopad 2013 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://green-data.blogspot.cz/2013/11/data-center-design-battery-static-rotary-ups.html>
- [22] -AB/TK-. V hlavní roli setrvačnick: hybridní Porsche 911 GT3 R a Panamera. *AutoTip*. 2010, **20**(4), 40-41. ISSN 12101087.
- [23] TH. Setrvačnick.: Volvo Flybrid Kers. *Automobil revue*. 2014, **58**(9), 52-53. ISSN 12119555.
- [24] Flybrid. In: *Torotrak* [online]. Leyland: Torotrak group [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.torotrak.com/products-partners/products/flybrid/>
- [25] KUMAR, Kiran. What is the amount of Power required to maintain a flywheel at an angular velocity.. In: *Physics* [online]. 2016 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <https://physics.stackexchange.com/questions/253644/what-is-the-amount-of-power-required-to-maintain-a-flywheel-at-an-angular-veloci/253647>
- [26] THOOLEN, Franciscus Johan Marie. *Development of an advanced high speed flywheel energy storage system*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1993. ISBN 90-386-0492-0.
- [27] PLOMER, Jan. *Hybridní pohon: městského vozidla s inovativní akumulací energie*. Praha, 2014. Disertační. ČVUT. Vedoucí práce Jiří First.
- [28] BOLUND, Björn, Hans BERNHOFF a Mats LEIJON. Flywheel energy and power storage systems. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 11. Upsala: Department of Engineering Sciences, Uppsala University, 2007, s. 235-258. DOI: 2005.01.004. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000146?via%3Dihub>
- [29] Active Power: White paper. In: *ActivePower* [online]. Austin: Active Power, 2008 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.anu-co.com/Technical%20Papers/Active%20Power/White%20Papers/WP112.pdf>
- [30] SIOSTRZONEK, Tomasz, Stanisław PIRÓG a Marcin BASZYŃSKI. The High-Speed Flywheel Energy Storage System. In: SHEIKH, Rafiqul Islam. *Energy Storage* [online]. Kraków: University of Science and Technology Poland, 2010, s. 37-67 [cit. 2017-06-20]. DOI: 10.5772/10096. ISBN 978-953-307-119-0. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/energy-storage/the-high-speed-flywheel-energy-storage-system->

- [31] COLLINGS, Sam. Flywheel hybrid systems (KERS). In: *Racecar Engineering* [online]. London: The Chelsea Magazine Company 2016, 2011, 24. duben 2011 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.racecar-engineering.com/articles/f1/flywheel-hybrid-systems-kers/>
- [32] FREE, Gravin a Daniel GRUNCHY. CD Shattering at 170,000FPS!: The Slow Mo Guys. In: *Youtube.com* [online]. The Slow Mo Guys, 2015 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <https://youtu.be/zs7x1Hu29Wc?t=346>
- [33] ASHBY, Michael F. *Materials Selection in Mechanical Design*. 3. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0 7506 6168 2.
- [34] *Porovnání kompozitních a tradičních materiálů používaných v cyklistickém průmyslu*. Brno, 2011. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41420. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Karel Němec.
- [35] GARDINER, Ginger. Composite flywheels: Finally picking up speed? In: *CompositesWorld* [online]. Cincinnati: Gardner Business Media, 2014, 3. duben 2014 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/blog/post/composite-flywheels-finally-picking-up-speed>
- [36] Strength-density chart. In: *Lehigh University* [online]. [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.lehigh.edu/~intribos/Resources/chart2.jpg>
- [37] VALACH, Jaroslav. *STC-7-composites: [prezentace k předmětu POM]*. 2017.
- [38] Toray: data sheet. In: *Toraycfa* [online]. Santa Anna: Toray carbon fibres america [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.toraycfa.com/pdfs/T1000GDataSheet.pdf>
- [39] HexTow® AS4C: Carbon Fibre. In: *Hexcel* [online]. Stamford: Hexcel Corporation, 2016 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/AS4C_Aerospace_HexTow_Data_Sheet.pdf
- [40] 4340 Alloy Steel. In: *Neonickel* [online]. Blackburn: NeoNickel [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cS/alloys/alloy-steels/4340-alloy-steel/>
- [41] Aluminium Alloy 7020. In: *Aircraft Materials* [online]. Buckinghamshire: AircraftMaterialsUK.com [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <https://www.aircraftmaterials.com/data/aluminium/7020.html>
- [42] *AZO Materials* [online]. Manchester: AZoNetwork [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.azom.com/>

[43] Factors of Safety. In: *The Engineering ToolBox* [online]. [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/factors-safety-fos-d_1624.html

8 Seznamy

8.1 Seznam tabulek

Tabulka 1, Momenty setrvačnosti běžných těles	- 21 -
Tabulka 2, Vlastnosti vybraných materiálů [38, 39, 40, 41. 42].....	- 26 -
Tabulka 3, Tabulka tvarových vlastností jednotlivých variant	- 31 -
Tabulka 4, Závislost napětí rotorů na otáčkách	- 40 -
Tabulka 5, Energetické a ekonomické porovnání variant	- 42 -

8.2 Seznam obrázků

Obrázek 1, Noční provoz systém v Chicagu [14].....	- 15 -
Obrázek 2, Denní provoz systému v Chicagu [14].....	- 15 -
Obrázek 3, Starý parní stroj [16]	- 16 -
Obrázek 4, Gyrobus Oerlikon [19].....	- 17 -
Obrázek 5, UPS systém se setrvačnickem [20]	- 18 -
Obrázek 6, Setrvačnick [25].....	- 19 -
Obrázek 7, Tvarový součinitel K [28].....	- 22 -
Obrázek 8, Graf napětí a hustoty materiálů [36].....	- 24 -
Obrázek 9, Graf křehkosti a napětí materiálů [37]	- 25 -
Obrázek 10, Návrhy rotoru setrvačnickové baterie (zleva plný válec, plný tenkostěnný válec, dutý tenkostěnný válec)	- 28 -
Obrázek 11, Rozložení napětí před druhým odebráním materiálu (vlevo) a po něm (vpravo) -	29 -
Obrázek 12, Optimalizovaný tvar rotoru setrvačnicku pomocí programu Inspire	- 29 -
Obrázek 13, Napětí v optimalizovaném rotoru	- 30 -
Obrázek 14, Optimalizovaný tvar inspirovaný výpočty Inspiru	- 30 -
Obrázek 15, Napětí v rotoru č.1 při 25000 RPM.....	- 32 -
Obrázek 16, Graf napětí rotoru č.1.....	- 32 -
Obrázek 17, Napětí v rotoru č.2 při 25000 RPM.....	- 33 -

Obrázek 18, Graf napětí rotoru č.2.....	- 33 -
Obrázek 19, Napětí v rotoru č.3 při 25000 RPM.....	- 34 -
Obrázek 20, Graf napětí rotoru č.3.....	- 34 -
Obrázek 21, Napětí v rotoru č.4 při 25000 RPM.....	- 35 -
Obrázek 22, Graf napětí rotoru č.4.....	- 35 -
Obrázek 23, Napětí v rotoru č.5 při 25000 RPM.....	- 36 -
Obrázek 24, Graf napětí rotoru č.5.....	- 36 -
Obrázek 25, Napětí v rotoru č.6 při 25000 RPM.....	- 37 -
Obrázek 26, Graf napětí rotoru č.6.....	- 37 -
Obrázek 27, Napětí v rotoru č.7 při 25000 RPM.....	- 38 -
Obrázek 28, Graf napětí rotoru č.7.....	- 38 -
Obrázek 29, Napětí v rotoru č.8 při 25000 RPM.....	- 39 -
Obrázek 30, Graf napětí rotoru č.8.....	- 39 -
Obrázek 31, Srovnání variant, graf	- 41 -
Obrázek 32, finální verze rotoru	- 43 -