



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE SETRVAČNÍKOVÝCH AKUMULÁTORŮ

MECHANICAL DESIGN OF FLYWHEEL ENERGY STORAGE SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Hanáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Jiří Hanáček
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce setrvačnickových akumulátorů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Setrvačníky s pevnou osou rotace jsou strojní součásti používané pro akumulaci kinetické energie za rotace. Stále častěji nacházejí uplatnění jako akumulátory sloužící pro skladování energie. V porovnání s elektrickými akumulátory mají některé výhody, jako např. dlouhou životnost, prakticky neomezený počet nabíjecích a vybíjecích cyklů nebo relativně vysoký výkon.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je zpracování přehledu současného stavu poznání v oblasti konstrukce setrvačnickových akumulátorů, a to z hlediska strojního inženýrství. Jedná se zejména o konstrukci rotoru (setrvačnicku), uložení, pláště a motoru/generátoru.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- koncepce setrvačnickového akumulátoru a existující řešení,
- přehled tvarů, užitých materiálů a pevnostních výpočtů setrvačnicků,
- přehled ložisek používaných k uložení rotorů,
- přehled konstrukčních řešení plášťů akumulátoru.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

GENTA, Giancarlo. Kinetic energy storage: Theory and practice of advanced flywheel systems. London: Butterworth-Heinemann, 1985. ISBN 978-0-408-01396-3. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-00901-2>.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na konstrukci setrvačnickových akumulátorů. Cílem práce je předložit přehled současných typů konstrukcí jednotlivých součástí těchto akumulátorů. Jednotlivé kapitoly se věnují rotoru, ložiskám, motorgenerátoru a plášti tohoto systému. V práci je nastíněn základní princip jednotlivých součástí a jejich funkce v rámci systému akumulátoru, používané materiály, tvary a další faktory ovlivňující konstrukci. Práce je též zaměřena na napěťovou analýzu kovového a kompozitního rotoru, uložení pomocí magnetických ložisek, přenosu energie pomocí motorgenerátoru a na návrh pláště setrvačnickového akumulátoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Setrvačník, setrvačnickový akumulátor, ukládání energie, magnetická ložiska, motorgenerátor

ABSTRACT

This bachelor thesis focus on flywheel energy storage construction. The aim of the work is to discuss nowadays construction types of each component of these batteries. Single chapters are focused on rotor, bearings, motor generator and enclosure of the system. There is shown a basic principle of each component and its function within the battery system, used materials and shapes and other factors influencing the construction. This thesis is also focused on stress analysis of metal and composite rotor, rotor fit with help of magnetic bearings, power transfer with help of motor generator and on the enclosure design of that mechanical battery.

KEYWORDS

Flywheel, flywheel energy storage system, energy storage, magnetic bearings, motor generator

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HANÁČEK, Jiří. *Konstrukce setrvačnickových akumulátorů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132877>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Martin Hartl.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce profesoru Martinu Hartlovi za trpělivý přístup při tvorbě této práce. Velký dík patří celé mé rodině, která mně v průběhu studia vždycky podporovala. Zvláštní poděkování patří mému bratru Josefovi a mé dívce Janě.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	12
2	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	13
2.1	Analýza problému	13
2.2	Cíl práce	13
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
3.1	Princip a konstrukce	14
3.2	Rotor	15
3.2.1	Homogenní ocelový setrvačnick	18
3.2.2	Kompozitní setrvačnick s vinutým vláknem	20
3.3	Uložení	26
3.3.1	Ložiska s permanentním magnetem PMB	27
3.3.2	Ložiska s aktivním magnetem AMB	28
3.3.3	Supravodivá magnetická ložiska SMB	30
3.4	Motorgenerátor MG	32
3.4.1	Motor s permanentním magnetem	33
3.4.2	Asynchronní motor	34
3.4.3	Reluktanční motor	35
3.5	Plášť	37
3.6	Příklady využití	38
4	DISKUSE	40
5	ZÁVĚR	42
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	43
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	48
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	50
9	SEZNAM TABULEK	51

1 ÚVOD

Setrvačnickové akumulátory jsou systémy založené na principu akumulace mechanické energie pomocí rotujícího setrvačnicku. V posledních letech se stále více objevují jako vhodný způsob uchovávání energie. Důvodem je vývoj v provedení těchto systémů, které v současnosti dosahují podobně vysokých účinností jako komerční elektrické akumulátory. Oproti elektrickým akumulátorům vykazují několik výhod. Disponují téměř neomezeným počtem nabíjecích cyklů, mají dlouhou životnost, neznečišťují životní prostředí a mohou dosahovat poměrně vysokých výkonů. Setrvačnickové akumulátory většinou dovedou energii uchovat pouze na kratší dobu, takže jsou spíše vhodné pro regulaci ve výkyvech externího zdroje energie.

Za zvyšující se efektivitou těchto mechanických akumulátorů stojí především využívání nových materiálů, technologických postupů a konstrukčních řešení dílčích součástí tvořící systém. Velký důraz je v současné době kladen na maximální eliminaci třecích ztrát. V souvislosti s touto problematikou práce předkládá přehled současných konstrukčních řešení jednotlivých součástí setrvačnickových akumulátorů.

Práce má za cíl nastínit rozdílný přístup k návrhu kovového a kompozitního rotoru pomocí pevnostní analýzy. Jelikož jde o rozdílné materiály, je důležité zjistit, které faktory pro ně budou limitující. Uložení rotoru může být realizováno pomocí mechanických či magnetických ložisek. Oba typy uložení mají svoje výhody a nevýhody, o nichž tato práce pojednává. Pro přenos energie mezi setrvačnickovým akumulátorem a vnějším zdrojem energie je zapotřebí motorgenerátor. Ten existuje v mnoha provedeních a každé provedení má opět svoje pro a proti, která je zapotřebí objasnit. Bezpečný provoz a snížení třecích ztrát těchto akumulátorů zajišťuje ochranný plášť. Plášť je však potřeba správně dimenzovat vzhledem k použitému materiálu rotoru. Práce předkládá v současnosti využívaný přístup k dimenzování pláště a problémy, které společně s touto částí systému nastávají.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

Setrvačnickové akumulátory mají široké využití napříč různými průmyslovými odvětvími. Jejich konstrukční návrh je tedy podmíněn příslušnou aplikací, ve které je akumulátor provozován. Jednotlivé součásti akumulátoru existují ve více typech různých provedení. V souvislosti s problematikou odlišných provedení těchto dílčích součástí, práce předkládá přehled nejčastějších typů konstrukčních řešení, která se v současnosti v praxi využívají.

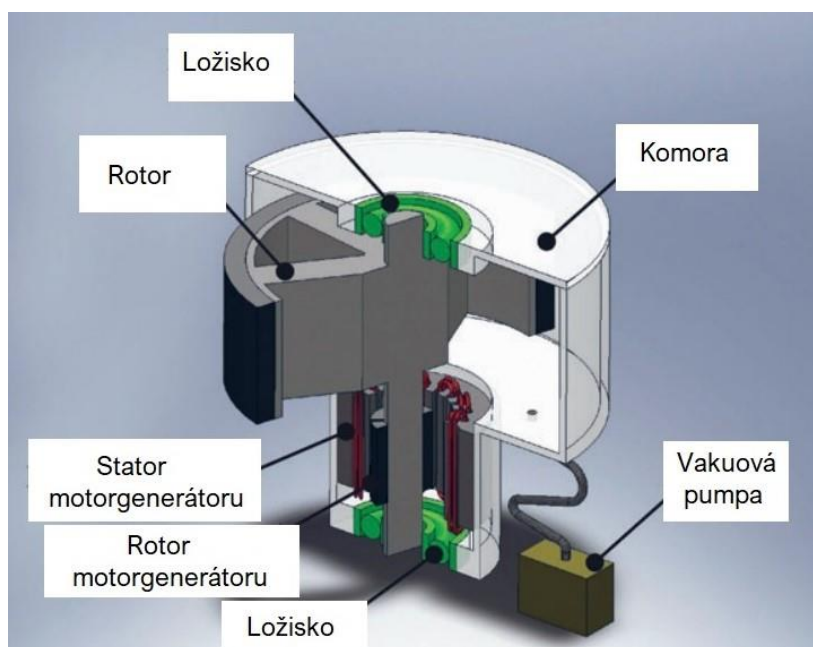
2.2 Cíl práce

Hlavním cílem bakalářské práce je předložit aktuální poznatky o způsobech konstrukčního provedení setrvačnickových akumulátorů. Pro dosažení tohoto cíle je v práci věnována pozornost jednotlivým součástem setrvačnickového akumulátoru, a to z hlediska tvarů, užitých materiálů a pevnostní analýzy. Pro celistvější náhled na jednotlivé části je vysvětlen i základní princip jejich funkce. Jedná se o rotor, uložení pomocí ložisek, motorgenerátor a plášť setrvačnicku.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Princip a konstrukce

Setrvačnickový akumulátor je zařízení, které umožňuje uchovat externě dodanou energii jako mechanickou energii pomocí rotujícího setrvačníku. Tento akumulátor je typicky součástí nadřazeného systému, kterému pomáhá vyrovnávat ztráty a přebytky energie. Nejčastěji jde o vyrovnávání přebytků a ztrát energie elektrické [1]. V případě, že vnější zdroj energie disponuje přebytkem, setrvačníku je energie dodávána, nabíjí se a zvyšují se jeho otáčky. Jestliže vnější systém má energie nedostatek, setrvačnick slouží jako zdroj a vybíjí se, přičemž se zpomaluje [2]. Aby byl tento proces technicky proveditelný, je zapotřebí několik dalších součástí, které lze vidět na níže uvedeném obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Schéma setrvačnickového akumulátoru [2]

Hlavní částí celého setrvačnickového akumulátoru je rotor, který slouží jako část systému, která energii uchovává nebo dodává. Rotor, uchycený na hřídel, musí být pro svůj provoz nějakým způsobem uložen. K tomu slouží ložiska, která jsou pro dosažení co nejmenších ztrát akumulátoru magnetická. Další částí, která pomáhá eliminovat ztráty setrvačnickového akumulátoru je komora, umožňující vytvoření vakua pomocí vakuové pumpy. Alternativou k vakuu může být plyn s nízkou hustotou. Tato komora je tvořena pláštěm, který slouží jako kryt v případě, že dojde k mechanické poruše setrvačníku za provozu. Poslední částí důležitou setrvačnickového akumulátoru je motorgenerátor, který se stará o přenos energie mezi setrvačnickem a vnějším systémem, ke kterému je akumulátor připojen [3].

3.2 Rotor

Rotor tvoří hlavní část setrvačnickového akumulátoru. Právě tato část systému energie akumuluje nebo vydává. Vyjděme proto z předpokladu, že chceme do rotoru naakumulovat energie co nejvíce. Jelikož jde o kinetickou mechanickou energii, je dána vztahem:

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1)$$


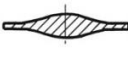
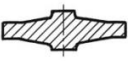
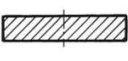
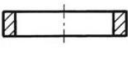
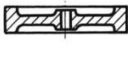
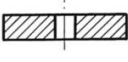
Pro akumulaci maximálního množství energie do setrvačnicku je důležité brát v potaz jeho tvar, materiál a zatěžovací podmínky, kterým je vystaven. Z hlediska tvaru se v praxi nejčastěji setkáváme se dvěma typy rotoru. Jde o plný nebo dutý válec, respektive disk. Pro plný válec nebo disk je moment setrvačnosti:

$$I = \frac{1}{2} m r^2 \quad (2)$$

pro dutý válec nebo disk:

$$I = \frac{1}{2} m (b^2 - a^2) \quad (3)$$

Rozměr b v tomto případě značí vnější rádius, rozměr a vnitřní rádius [3]. Vedle momentu setrvačnosti hraje při návrhu setrvačnicku podstatnou roli tvarový faktor K . Tvarový faktor K si lze představit jako míru využití materiálu setrvačnicku. Faktor K dává tuto míru využitelnosti do souvislosti s rozložením napětí v setrvačnicku [4]. Nejlepší využití materiálu je tím pádem dosaženo tvarem rotoru, který má rovnoměrné rozložení napětí. Tvarový součinitel K je v tomto případě roven 1 (viz Obr.3.2).

Popis	Profil	Tvarový faktor K
Disk s konstantním rozložením napětí		1.0
		0.7-0.98
Kónický disk		0.7-0.95
Disk konstantní tloušťky		0.606
Prstenec		0.5
Obručový disk s otvorem		0.4-0.5
Disk konstantní tloušťky s otvorem		0.303

Obr. 3.2 Tvarový faktor K nejčastějších typů geometrie homogenního izotropního setrvačnicku [5]

Napětí, která v rotujícím setrvačnicku vznikají, jsou převážně způsobena vlivem odstředivých sil. Jeho bezpečný provoz je limitován mezí pevnosti materiálu, ze kterého je vyroben [4]. Pro popis napětí v rotoru vyjdeme z modelu tenkého rotujícího prstence, které je dáno vztahem:

$$\sigma_{max} = \rho r^2 \omega^2 \quad (4)$$

Toto napětí může být pro další tvarové varianty popsáno složitějšími vztahy, nicméně je vždycky dominantně závislé na hustotě materiálu a na obvodové rychlosti setrvačnicku. Nejčastějším mezním stavem je tak rozlomení setrvačnicku v důsledku překročení maximálních otáček [3]. Při návrhu se často zanedbává napětí v axiálním směru a uvažuje se tak rovinná napjatost, která je dominantní.

Aby byl návrh setrvačnicku pro danou aplikaci optimální, musíme tedy najít vhodnou kombinaci tvaru a materiálu. Za tímto účelem byl zaveden koeficient měrné energie. Tento koeficient je definován jako maximální kinetická energie, která se může do setrvačnicku uložit, vztažená na jednotku hmotnosti. Analogicky lze také zavést koeficient hustoty energie, což je maximální kinetická energie vztažená na jednotku objemu:

$$e_m = \frac{E_{kmax}}{m} \text{ respektive } e_v = \frac{E_{kmax}}{V} \quad (5)$$

Matematickými úpravami se dá koeficient měrné energie e_m a koeficient hustoty energie e_v přepsat do tvaru, který zahrnuje tvarový faktor K a pevnost materiálu [3]:

$$e_m = K \frac{\sigma_{max}}{\rho} \text{ respektive } e_v = K \sigma_{max} \quad (6)$$

Příklady koeficientů některých materiálů shrnuje tabulka 3.1 (viz níže).

Tabulka 3.1 Charakteristiky různých materiálu pro setrvačnický [4]

Materiál	ρ (kg/ m³)	Rm (MPa)	e_v (MJ/m³)	e_m (kJ/kg)
Hliník	2700	500	251	93
Ocel	7800	800	399	51
Epoxid se skelným vláknem	2000	1000	500	250
Vysokomodulový grafitový epoxid	1580	750	374	237
Vysokopevnostní grafitový epoxid	1600	1500	752	470

Koeficient měrné energie je tak pro návrh setrvačníku dobrý výchozí parametr, protože vyjadřuje míru energie, kterou lze do setrvačníku akumulovat, s ohledem na tvarové a materiálové vlastnosti.

Jak ukazuje tabulka 3.1, vhodnými materiály pro výrobu rotorů setrvačnickových akumulátorů jsou kompozitní materiály. Vzhledem k jejich ceně se také hojně využívají vysokopevnostní oceli a jiné kovové materiály.

Kovové rotory se obvykle využívají pro nízko rychlostní akumulátory, které pracují do 10 000 otáček za minutu. Nízko rychlostní akumulátory jsou vhodné pro aplikace, které vyžadují akumulaci energie po delší časovou periodu [1]. Rotory z kompozitních materiálů, nejčastěji s vinutým vláknem, jsou vhodné pro vysoko rychlostní akumulátory, které točí až 100 000 otáček za minutu. Oproti kovovým rotorům se vyznačují lehčí, ale velmi pevnou konstrukcí [3]. Vysokorychlostní akumulátory jsou vhodné pro aplikace, které vyžadují dodávku velkého množství energie v kratším časovém rozmezí [1].

Důvodem, proč jsou kompozitní materiály pro setrvačnické vhodné je fakt, že mají vysokou specifickou pevnost, to jest poměr $\frac{\sigma_{max}}{\rho}$ (viz níže tabulka 3.2). Vhodných materiálových vlastností kompozitu se dá dosáhnout například pomocí vytvrzení [5].

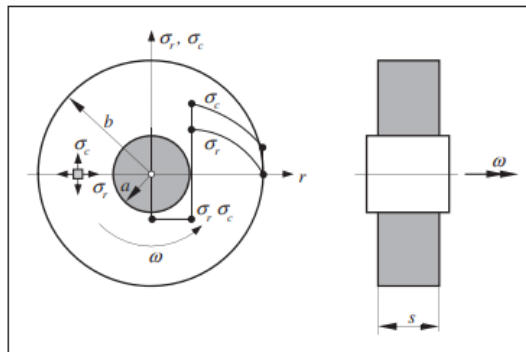
Tabulka 3.2 Poměr specifické pevnosti různých materiálů [5]

Materiál	Rm (MPa)	$\frac{\sigma_{max}}{\rho}$ (Wh/kg)
Litá ocel	150	5
Uhlíková ocel	340	12
Ocelová slitina	1000	36
Hliníková slitina	600	61
Vysokopevnostní ocel	1900	66
Pružinová ocel	3000	110
Tvrzený kompozit se skelným vláknem	1300	180
Tvrzený kompozit se uhlíkovým vláknem	1300	230
Tvrzený kompozit s kevlarovým vláknem	1200	240

V následující části této kapitoly se budu věnovat napěťové analýze dvou nejčastějších typů řešení rotoru setrvačnickového akumulátoru. Jde o homogenní ocelový a vinutý kompozitní rotor.

3.2.1 Homogenní ocelový setrvačnick

Uvažujme setrvačnick, který má tvar homogenního dutého válce a je připevněn na hřídel pomocí nalisování. Touto konfigurací se zabývali autoři technické studie [5]. V praxi je tento typ řešení jednoduchý a finančně nenáročný. Při pevnostní analýze je třeba brát na zřetel napětí, která vznikají nalisováním a rotací setrvačnicku. Na Obr. 3.3 lze vidět, že kritickým místem setrvačnicku je jeho vnitřní poloměr a , což je právě místo nalisování, protože zde má nejvyšší hodnotu jak radiální, tak tečná složka napětí. Hlavním cílem bude určit hodnotu kritické úhlové rychlosti setrvačnicku, která způsobí mezní stav lomu.



Obr. 3.3 Rozložení radiálního a tečného napětí rotujícího ocelového setrvačnicku [5]

Pro popis napětí, která v setrvačnicku vznikají vlivem vazby na hřídel a odstředivých sil, vyjdeme z Trescovy napěťové podmínky. Tato podmínka je platná pro izotropní materiál a předpokládá, že k plastické deformaci dojde při dosažení maximálního smykového napětí. Napěťová podmínka $\max \tau$ se pak dá zapsat ve tvaru:

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} (\sigma_{max} - \sigma_{min}) = \frac{Re}{2} \quad (7)$$

Napětí σ_{max} a σ_{min} jsou zde maximum a minimum z množiny hlavních napětí ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$).

Trescovo redukováné napětí pak odpovídá tvaru [6]:

$$\sigma_T = \sigma_{max} - \sigma_{min} \text{ respektive } \sigma_{red} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (8)$$

Při této montáži dochází na poloměru $r = a$ ke vzniku tlaku p_i mezi hřídelí a diskem. Tento montážní tlak vede ke vzniku Trescova redukováného napětí na poloměru $r = a$, které je dáno vztahem:

$$\sigma_{Tpi} = E \frac{p_i}{2a} \quad (9)$$

Při provozu rotoru pod kritickou úhlovou rychlostí ω_{kr} se dvojice těles chová jako předepjatý plný disk [7]. Vlivem odstředivých sil vznikají na poloměru $r = a$ přírůstky tečného napětí $\sigma_{t\omega}$ a radiálního napětí $\sigma_{r\omega}$, které jsou dány vztahy:

$$\sigma_{t\omega} = \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 b^2 - \frac{1 + 3\mu}{8} \rho \omega^2 a^2 \quad (10)$$

$$\sigma_{r\omega} = \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 b^2 - \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 a^2 \quad (11)$$

Přírůstek Trescova redukovaného napětí od účinků odstředivých sil je potom roven:

$$\Delta\sigma_{T\omega} = \sigma_{t\omega} - \sigma_{r\omega} = \frac{1 - \mu}{4} \rho \omega^2 a^2 \quad (12)$$

Výsledné Trescovo napětí σ_T , je pak rovno součtu napětí vyvolaného nalisováním setrvačnicku na hřídel a napětí od odstředivých sil, které vzniknou rotací:

$$\sigma_T = \sigma_{Tpi} + \Delta\sigma_{T\omega} = E \frac{p_i}{2a} + \frac{1 - \mu}{4} \rho \omega^2 a^2 \quad (13)$$

Rovnice (13) však platí pouze do doby, kdy se setrvačnick otáčí úhlovou rychlostí menší, než je kritická úhlová rychlost ω_{kr} . Při překročení ω_{kr} dochází k takovému radiálnímu posuvu vnitřní plochy válce, který má za následek eliminaci montážního tlaku a dochází ke ztrátě sevření mezi diskem a hřídelí. Spojením výše uvedených rovnic lze kritickou úhlovou rychlost vyjádřit v závislosti na tvarových a materiálových vlastnostech setrvačnicku a na velikosti montážního tlaku:

$$\omega_{kr} = \sqrt{\frac{2Ep_i}{(3 + \mu)\rho ab^2}} \quad (14)$$

Uvažujeme-li v rovnici (13) úhlovou rychlost ω jako kritickou úhlovou rychlost ω_{kr} , výsledné Trescovo napětí odpovídá napětí vyvolanému montáží:

$$\sigma_T = E \frac{p_i}{2a} \quad (rov10) \quad (15)$$

Chceme-li určit přípustný montážní tlak, který vznikne nalisováním válce na hřídel, zavedeme pevnostní podmínku $\sigma_T = \sigma_{DOV}$, kde σ_{DOV} reprezentuje dovolené pracovní napětí setrvačnicku. V případě zkoumání mezního stavu za tento tlak dosadíme mez kluzu materiálu. Tlak vyvolaný montáží je pak s ohledem na rovnici (15) roven:

$$p_i = 2a \frac{\sigma_{DOV}}{E} \quad (16)$$

Dosazením tohoto montážního tlaku do rovnice (14) dostáváme výsledný tvar kritické úhlové rychlosti v závislosti na dovoleném provozním napětí setrvačnicku:

$$\omega_{kr} = \sqrt{\frac{4\sigma_{DOV}}{(3 + \mu)\rho b^2}} \quad (17)$$

3.2.2 Kompozitní setrvačnick s vinutým vláknem

Kompozitní vinuté materiály se skládají ze dvou hlavních částí – matrice a vláken, čímž se zásadně liší od kovových materiálů. S tím souvisí i odlišný přístup k návrhu kompozitního setrvačnicku. U vinutého setrvačnicku může dojít k poškození především v radiálním nebo tečném směru. V drtivé většině případů dochází k poškození matrice, která je obvykle tvořena syntetickou pryskyřicí. Vláknata tvořená ze skelných nebo uhlíkových vláken mají v porovnání s matricí řádově vyšší pevnost. Matrice také většinou rychleji degraduje. Vytvrzením kompozitu lze dosáhnout vyšší pevnosti materiálu, jenže typicky významně pouze v tečném směru [8]. Při pevnostní analýze je tím pádem kladen důraz na maximální eliminaci radiální složky napětí v rotujícím setrvačnicku. Radiální napětí lze eliminovat několika způsoby. V této práci se věnuji třem následujícím:

- změnou vlákna při navíjení,
- natáčením vlákna během vinutí,
- slisováním několika předepjatých prstenců do sebe.

3.2.2.1 Změna vlákna při navíjení

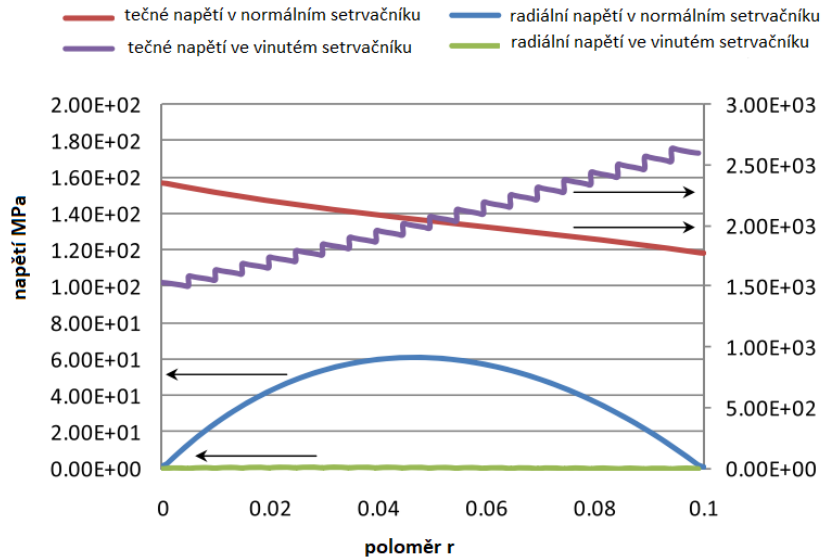
Podstatou této metody je přenesení radiální složky napětí do tečné složky napětí. Vyjděme z předpokladu, že se setrvačnick skládá z jednotlivých tenkých válců, které vždy tvoří jedna vrstva vláken navinutých kolmo k ose rotace setrvačnicku. Uvažujme-li radiální napětí $\sigma_r = 0$, radiální posuv od odstředivých účinků je dán pro každý válec vztahem:

$$u = \frac{r}{E_T} (\rho \omega^2 r^2) = \frac{\rho}{E_T} \omega^2 r^3 \quad (18)$$

Veličina E_T zde reprezentuje podélný modul pružnosti. Pokud má každý válec stejný radiální posuv, pak mezi válci nedochází k žádnému tahovému ani tlakovému napětí ($\sigma_r = 0$). Aby byla splněna uvedená podmínka pro radiální posuv, poměr $\frac{E_T}{\rho}$ musí být úměrný poloměru r ve třetí mocnině. Nesmíme však zapomenout na složku posuvu v radiálním směru, kterou způsobuje prodloužení ve směru tečném. Toto prodloužení odpovídá Poissonovu poměru v tečném směru μ . Výsledný poměr tedy odpovídá vztahu:

$$\frac{E_T}{\rho} = r^{3+\mu} \quad (19)$$

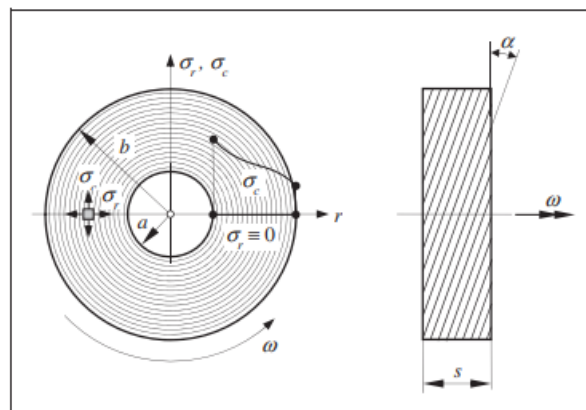
Uvedená podmínka se dá technologicky zajistit přerušovanou výměnou vlákna během vinutí. V dnešní době existuje mnoho druhů uhlíkových vláken s různými moduly pružnosti, proto je tato metoda poměrně dostupná [8]. Z rovnice pro radiální posuv vyplývá, že se s rostoucím poloměrem musí zvyšovat podélný (v rámci setrvačnicku tečný) modul pružnosti kompozitu E_T . Rozložení tečné a radiální složky napětí je znázorněno na Obr. 3.4.



Obr. 3.4 Rozložení radiálního a tečného napětí v normálním a vinutém setrvačnicku [8]

3.2.2.2 Natáčení vlákna během vinutí

Pro potlačení radiálního napětí pomocí změny úhlu navíjení vyjdeme z předpokladu, že navíjíme pouze jeden druh vlákna s jedním podélným (tečným) modulem pružnosti E_T .



Obr. 3.5 Rozložení napětí vinutého setrvačnicku s nulovým radiálním napětím [5]

V závislosti na úhlu navíjení α (viz Obr. 3.5) se může podélný (tečný) modul pružnosti E_T spojitě měnit v závislosti na poloměru r mezi limitními hodnotami $\alpha = 0^\circ$, odpovídající hodnotě tečného modulu pružnosti E_T a $\alpha = 90^\circ$, odpovídající hodnotě příčného modulu pružnosti E_P [5].

Napětí v rotujícím disku o konstantní tloušťce vyvolané odstředivými účinky lze napsat ve tvaru:

$$\sigma_t - r \frac{d\sigma_r}{dr} = \rho\omega^2 r^2 \quad (20)$$

Chceme-li opět eliminovat radiální složku napětí, dostáváme rovnici:

$$\sigma_t = \rho\omega^2 r^2 \quad (21)$$

Díky rotační symetrii lze přetvoření v radiálním a tečném směru vyjádřit jako:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{du}{dr} \\ \varepsilon_t &= \frac{u}{r} \end{aligned} \quad (22)$$

z čehož lze vyjádřit rovnici kompatibility:

$$r \frac{d\varepsilon_t}{dr} = \varepsilon_r \quad (23)$$

Jestliže uvažujeme tečný modul pružnosti E_T jako funkci závislou na poloměru r , tj. $E_T = E_T(r)$, tečné a radiální přetvoření se dá pro každou vrstvu vinutého setrvačnicku vyjádřit pomocí napěťového tvaru Hookova zákona jako následující vztahy [9]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{\sigma_t}{E_T(r)} \\ \varepsilon_r &= -\mu\varepsilon_t = -\mu \frac{\sigma_t}{E_T(r)} \end{aligned} \quad (24)$$

Kombinací rovnic (21), (23) a (24) vyjádříme přírůstek tečného modulu pružnosti na poloměru:

$$\frac{dE_T(r)}{E_T(r)} = (3 + \mu) \frac{dr}{r} \quad (25)$$

Integrací vzniká závislost určující hodnotu modulu pružnosti pro příslušný poloměr r :

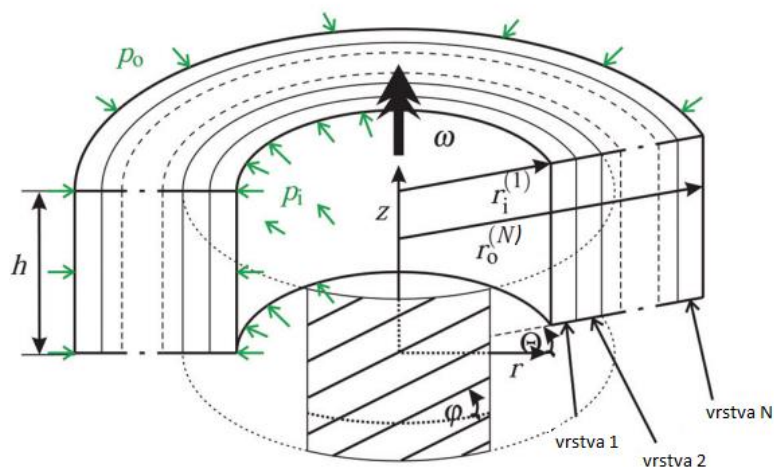
$$E_T(r) = E_{Tb} \left(\frac{r}{b}\right)^{3+\mu} \quad (26)$$

E_{Tb} je zde podélný (tečný) modul pružnosti vnějšího poloměru $r = b$ [5]. Z tohoto vztahu opět vyplývá, že se s rostoucím poloměrem musí zvyšovat tečný modul pružnosti E_T . Z hlediska optimálního využití materiálu je tím pádem vhodné orientovat vlákna na vnějším poloměru tak, aby byla namáhána v podélném směru. Úhel navíjení pro danou vrstvu je pak určen hodnotou modulu pružnosti dle rovnice (26). Jak již bylo zmíněno, modul pružnosti kompozitu lze na úhlu navíjení měnit mezi limitními hodnotami $\alpha = 0^\circ$ a $\alpha = 90^\circ$, které vzhledem k zatěžování odpovídají podélné (tečné) a příčné hodnotě modulu pružnosti. Výhodou je, že je tato změna spojitá.

3.2.2.3 Kompozitní vícevrstvý setrvačnick s předepnutím

Radiální napětí, které vzniká rotací setrvačnicku, má tahový charakter. Tím pádem může vést k delaminaci, tj. oddělení jednotlivých vrstev kompozitu od sebe. Z předchozích statí již víme, že se toto napětí dá redukovat změnou vlastností vláken a jejich natočením. Nabízí se však také úvaha snížit toto tahové napětí vyvoláním napětí tlakového. Toho lze dosáhnout nalisováním několika válců (prstenců, disků) do sebe. V předchozích případech se dalo radiální napětí snížit teoreticky na nulovou hodnotu. Výsledek metody nalisováním válců do sebe bývá po šířce rotoru nespojitý, protože se v rámci jednotlivých válců napětí od rotace generuje. V globálním pohledu se však radiální složka sníží. Typickým spojem hřídele a rotoru tohoto typu setrvačnicku je ocelový náboj [10].

Uvažujme tedy setrvačnick zhotovený z několika do sebe nalisovaných válců, které mají vůči sobě přesahy $\delta_1, \delta_2 \dots \delta_N$.



Obr. 3.6 Vícevrstvý lisovaný kompozitní setrvačnick [11]

Na hranici sousedících válců dochází vlivem přesahu ke vzniku stykového tlaku. I pro tento setrvačnick nadále platí rovnice rovinné napjatosti (20) a rovnice přetvoření (22) uvedená dříve [10] [12]. Dále je pro napěťovou analýzu nutné zavést rovnice kompatibility radiálního napětí a posuvu:

$$\sigma_{ri}^{(j+1)} = \sigma_{ro}^{(j)} \quad (27)$$

$$u_{ri}^{(j+1)} = u_{ro}^{(j)} + \delta_j \quad (28)$$

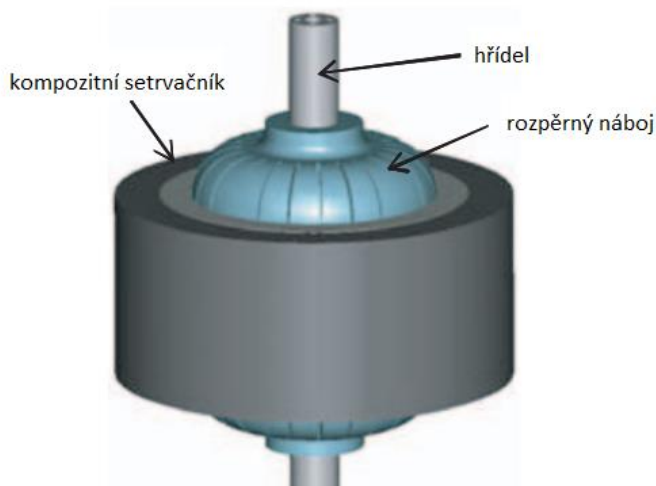
Index j nabývá hodnot $(1, 2, \dots, N)$, δ_j reprezentuje příslušný přesah mezi válci, index i odpovídá vnitřní pozici, index o odpovídá vnější pozici.

Kontaktní napětí jsou tedy na hranicích válců stejná a radiální přetvoření na hranici sousedících válců je rovno příslušnému přesahu δ . Poslední rovnice, které vedou k určení průběhu napětí σ_r jsou napěťové podmínky pro vnitřní a vnější poloměr:

$$\begin{aligned} \sigma_r(r = r_i) &= -p_i \\ \sigma_r(r = r_o) &= -p_o \end{aligned} \quad (29)$$

Tlak $-p_i$ odpovídá vnitřnímu tlaku, který způsobí nalisování rotoru na náboj, tlak $-p_o$ je tlak na vnějším poloměru, typicky roven 0 [11].

Ocelový kruhový náboj, zajišťující přenos kroutícího momentu mezi rotorem a hřídelí má většinou za rotace menší radiální posuv než kompozitní materiál rotoru. I to může vést ke vzniku tahového radiálního napětí na jejich hranici, tedy na poloměru r_i . Za účelem snížení tohoto napětí byl vyvinut rozpěrný náboj [12].

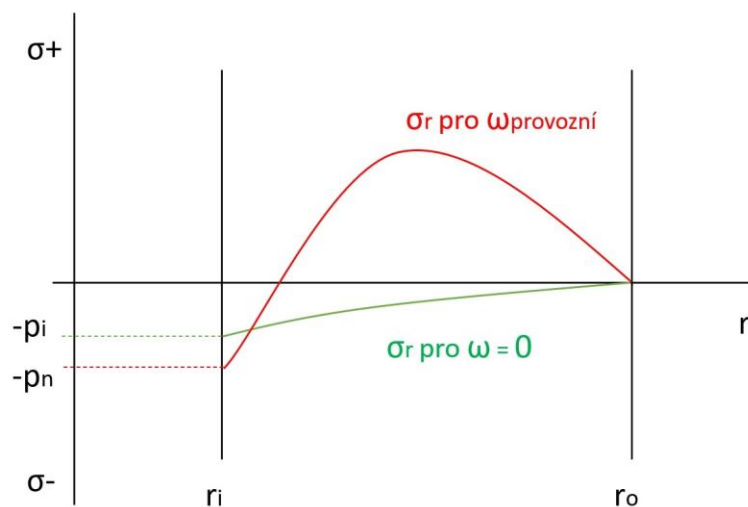


Obr. 3.7 Kompozitní vícevrstvý setrvačnick s rozpěrným nábojem [12]

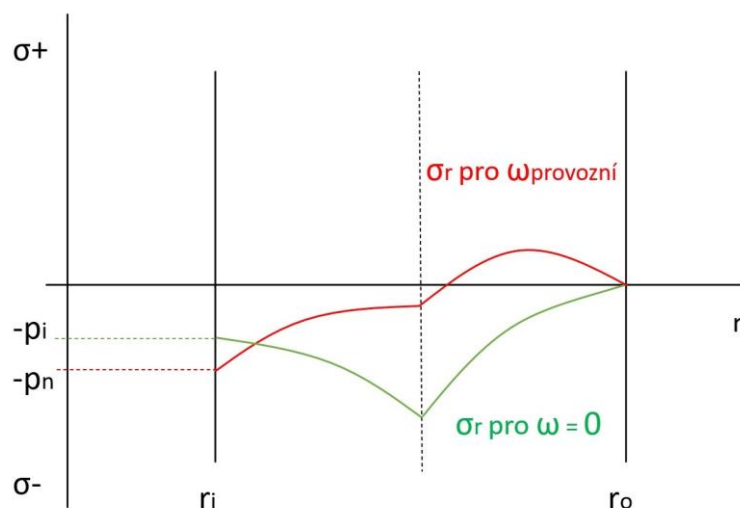
Tento náboj, skládající se z lamel, může při rotaci expandovat v radiálním směru a vyvíjet tím potřebný tlak na vnitřní stěnu rotoru. Náboj bývá pro zajištění správné funkce nalisován do rotoru s malým přesahem. Velikost tlaku od rozpěrného náboje za rotace je dle výzkumné studie zabývající se konstrukcí vysokorychlostní setrvačnickových systémů [11] dána vztahem (ρ_N značí hustotu materiálu náboje):

$$p_i = \rho_N \omega^2 \frac{r_i^3 - r_{iN}^3}{3r_i^3} \quad (30)$$

Obrázky 3.8 a 3.9 ukazují rozložení radiálního napětí jednovrstvého a dvouvrstvého kompozitního setrvačnicku. Je vidět, že konstrukce kompozitního setrvačnicku s přesahem a s rozpěrným nábojem účinně snižuje hodnotu tahového radiálního napětí.



Obr. 3.8 Rozložení radiálního napětí jednovrstvého kompozitního rotoru s rozpěrným nábojem (převzato a upraveno z [12])



Obr. 3.9 Rozložení radiálního napětí dvouvrstvého kompozitního rotoru s rozpěrným nábojem (převzato a upraveno z [12])

Návrh příslušných přesahů, zajišťujících požadované předpětí a volba náboje jsou závislé především na provozních otáčkách a mechanických vlastnostech dílčích vrstev rotoru. Velkou roli hraje také technologický postup vytvrzování vrstev, při kterém může docházet ke vzniku nezanedbatelných zbytkových pnutí způsobené tepelným zpracováním [10].

3.3 Uložení

Rotor, který se otáčí úhlovou rychlostí v řádu desítek tisíc otáček za minutu, klade vysoké požadavky na uložení. Uložení rotoru setrvačnickového akumulátoru je zajišťováno pomocí ložisek. Hlavní funkcí uložení je zajištění hladkého a bezpečného chodu s co nejmenšími vibracemi a třecími ztrátami. Ložiska mohou být pro tyto účely mechanická valivá nebo magnetická. Ztráty tvoří u mechanických ložisek 5 % u magnetických 1 % celkové akumulované anergie systému na jednu hodinu. Kluzná ložiska se zde uplatnit nedají, protože rotor pracuje za účelem minimálních ztrát ve vakuové komoře [3].

Funkce magnetických ložisek je založena na principu magnetické levitace – vnitřní a vnější kroužky ložiska od sebe udržují vzdálenost působením magnetického pole. Oba tyto členy jsou tedy magnetické [13]. Mechanická valivá ložiska vykazují v porovnání s magnetickými vysokou tuhost uložení a jsou vhodná pro nízko rychlostní akumulátory. Mají však oproti magnetickým ložiskám dvě hlavní nevýhody, které snižují jejich používání jako uložení rotoru setrvačnickových akumulátorů. Vyžadují údržbu (hlavně v podobě mazání) a mají oproti magnetickým vyšší třecí ztráty. Navíc jsou mechanická ložiska potenciálně hlučnější kvůli přímému kontaktu valivých elementů. Na druhou stranu vykazují mechanická ložiska dostatečně tuhá uložení.

Magnetické ložisko se skládá z vnějšího a vnitřního členu, jeden je pevný, druhý je otočný. Nejčastějším typem magnetických ložisek pro setrvačnickové akumulátory jsou [3]:

- ložiska s permanentním magnetem – PMB (Permanent Magnetic Bearing),
- ložiska s aktivním magnetem – AMB (Active Magnetic Bearing),
- supravodivá magnetická ložiska – SMP (Superconducting Magnetic Bearing).

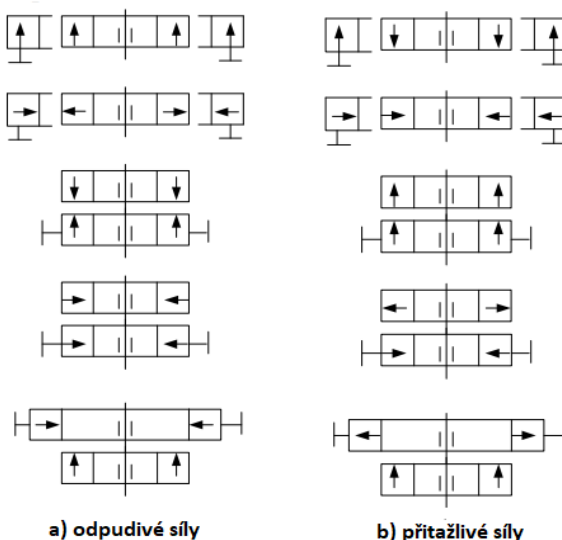
Magnetická ložiska však mají vyšší pořizovací náklady než mechanická, navíc v případě aktivního ložiska vyžadují elektrické napájení. V praxi se pro optimální uložení rotorů setrvačníků používají hybridní systémy uložení, které kombinují jednotlivé výhody zmíněných magnetických ložisek. Hybridní systémy tak umožňují bezpečný a kontrolovaný provoz setrvačnicku. Důležitou charakteristikou magnetických ložisek je tuhost, která je definována jako poměr působící síly ku vychýlení, které je touto silou způsobeno [14]:

$$K_z = - \frac{dF_z}{dz} \quad (31)$$

Z toho vyplývá, že je ložisko tím tužší, čím větší síla musí být vyvinuta pro vychýlení ložiska z jeho stabilní polohy.

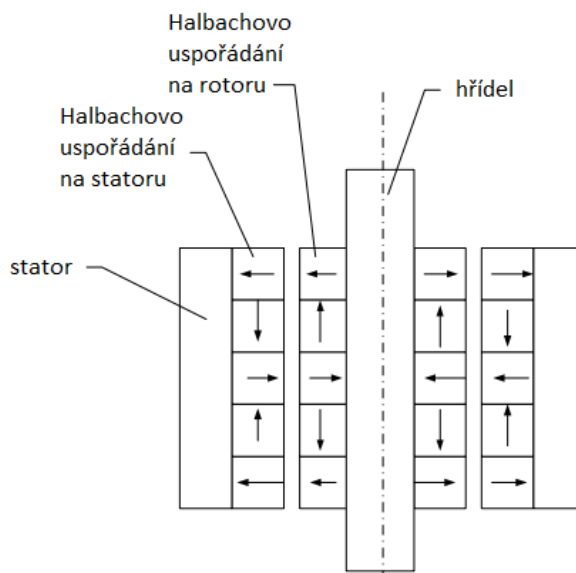
3.3.1 Ložiska s permanentním magnetem PMB

Ložiska s permanentním magnetem jsou nejjednodušším a nejlevnějším typem magnetických ložisek. Jako materiál těchto ložisek často slouží obyčejný neodýmový magnet NdFeB (složen z neodymu, železa a bóru) [15]. Krom obecných výhod magnetických ložisek, zmíněných výše, je jejich další výhodou provoz bez vnějšího přívodu energie, čímž jsou tato ložiska vysoce spolehlivá. PMB jsou však do značné míry limitována Ernshawovým teorémem. Podle tohoto teorému není možné zajistit stabilní statickou polohu levitujícího tělesa statickým magnetickým polem permanentního magnetu [16]. Z tohoto důvodu PMB často slouží jako přídatná ložiska, která pomáhají nést tíhu rotoru a zvyšují tak tuhost celého systému uložení [17]. Využívají se buď jako axiální nebo radiální ložiska. Na obrázku jsou schématicky zobrazena základní uspořádání magnetických kroužků ložiska (šipky značí směr magnetické indukce). Na základě různých vzájemných orientací kroužků dochází vlivem magnetické interakce k zamezení pohybu buď v axiálním nebo radiálním směru. Při jejich vychýlení vzniká přitažlivá či odpuzivá síla, bránící posuvu v příslušném směru (viz Obr 3.10).



Obr. 3.10 Jednoduchá uspořádání magnetického ložiska [14]

Jednoduchá uspořádání PMB, která tvoří pouze vnitřní a vnější kroužek, vykazují nízkou tuhost a nízkou stabilitu [14]. Uvažujeme-li magnetické ložisko, které má stejný objem materiálu, jako jednoduché, ale je tvořeno větším počtem kroužků, dochází k významnému nárůstu tuhosti ložiska [17]. Dalším způsobem, jak navýšit tuhost PMB ložiska je pomocí vhodného uspořádání kroužků vůči sobě. Nejvyšší tuhosti při daném objemu magnetu lze dosáhnout uspořádáním kroužků do Halbachovy struktury [14] (viz Obr. 3.11).



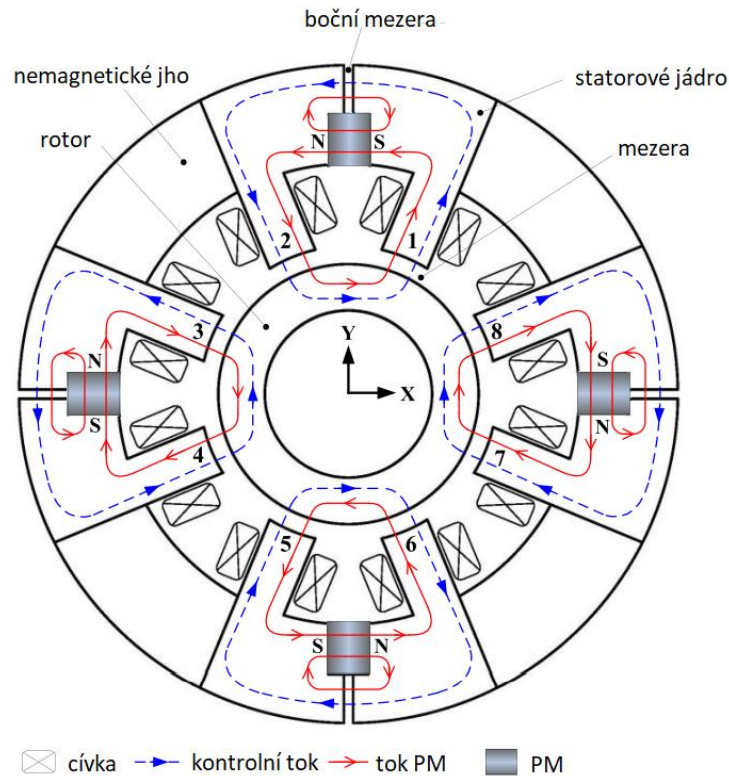
Obr. 3.11 Pasivní ložisko s Halbachovou strukturou [14]

Halbachovo uspořádání je tím dokonalejší, čím víc kroužků je pro daný pól použito. Uspořádání kroužků dle obrázku je však pro praktické účely dostačující [14]. Jelikož se setrvačnickové akumulátory provozují za velmi vysokých otáček, při kterých může mít destabilizace rotoru fatální následky, je důležité mít uložení co nejvíc pod kontrolou. Za tímto účelem je vhodné použít ložiska s aktivním magnetem.

3.3.2 Ložiska s aktivním magnetem AMB

Aktivní magnetické ložisko je tvořeno elektromagnety, čímž může vyvíjet časově proměnné magnetické pole. To vede k vyšší tuhosti uložení a k možnosti tlumení výchylek za provozu. Oproti PMB ložiskám tvoří AMB ložiska složitější systémy, což klade vyšší nároky na spolehlivost jednotlivých částí celého systému uložení. Další nevýhoda v porovnání s PMB ložisky je závislost na vnějším napájení elektrickou energií [18].

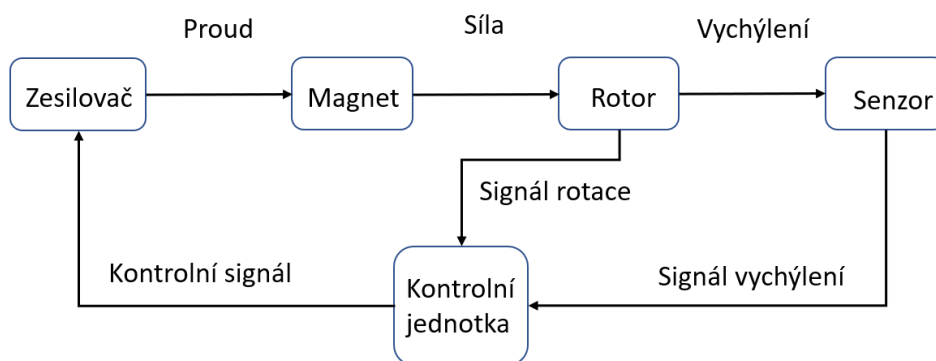
Pro vysvětlení principu funkce AMB ložiska uvažujme radiální magnetické ložisko na Obr. 3.12. Toto ložisko je heteropolární, což znamená, že má schopnost střídát polaritu magnetického pole v čase. Hřídel setrvačnicku zde zároveň plní funkci rotoru ložiska, musí tedy být magnetická. Stator ložiska tvoří čtyři permanentní magnety a osm vinutých cívek. Permanentní magnety generují stálý magnetický tok. Magnetický tok, který generují jednotlivé cívky je závislý na velikosti elektrického proudu, který do nich teče. S takto symetrickým uspořádáním permanentních magnetů a cívek lze výchylku rotoru jednoduše rozložit do směrů os x a y , přičemž pólové dvojice 12 a 56 umožňují regulaci v ose y a pólové dvojice 34 a 78 regulaci v ose x . [19]



Obr. 3.12 Aktivní radiální magnetické ložisko [19]

Jestliže je osa rotoru přímo v centru ložiska, kontrolní proud v cívkách je nulový a cívky nevytváří žádný magnetický tok. Situace se změní, pokud se rotor v rámci ložiska vychýlí. Obr. 3.12 popisuje situaci při vychýlení do třetího kvadrantu. To prakticky znamená, že se rotor k ložisku vlevo dole přiblíží a vpravo nahoře oddálí. Aby se rotor dostal do své původní polohy, je potřeba posílit výsledný magnetický tok vpravo nahoře a zeslabit vlevo dole. Má-li magnetický tok permanentního magnetu stejný směr jako magnetický tok pólových cívek, toky se sečtou a dojde k nárůstu výsledného magnetického toku. V opačném případě dochází k jeho zeslabení. Uvažované vychýlení tím pádem vyřeší přivedení kontrolních proudů do cívek, které vygenerují stejně orientovaný magnetický tok vpravo nahoře a opačně orientovaný tok vlevo dole [18].

AMB ložisko je tak schopno pružně reagovat na výchylky v čase. Pro kontrolu výchylky je však zapotřebí přídavný elektronický systém, který výchylku zaznamená, vyhodnotí a vyřeší. Tento systém tvoří vlastní ložisko, které magneticky interaguje s hřídelí, kontrolní senzory, kontrolní jednotka a zesilovač [20]. Schéma tohoto systému zachycuje Obr. 3.13.



Obr. 3.13 Schéma řídicího systému aktivního ložiska [20]

Dojde-li při provozu k vychýlení rotoru z rovnovážné polohy, polohový senzor tuto výchylku zaznamená a vyšle signál do kontrolní jednotky (polohový senzor může být například optický senzor). Kontrolní jednotka, tento signál vyhodnotí a vyšle signál do zesilovače. Zesilovač signál z kontrolní jednotky přepočítá na hodnotu proudu, která v cívkách vygeneruje potřebný magnetický tok ke stabilizaci vychýleného ložiska. Díky kontrolovanému provozu AMB ložisek lze předejít vychýlkám, které způsobuje dynamické chování rotujícího setrvačnicku, vibracím a gyroskopickému efektu. Data, která kontrolní jednotka přijímá mohou navíc posloužit k další optimalizaci uložení [20].

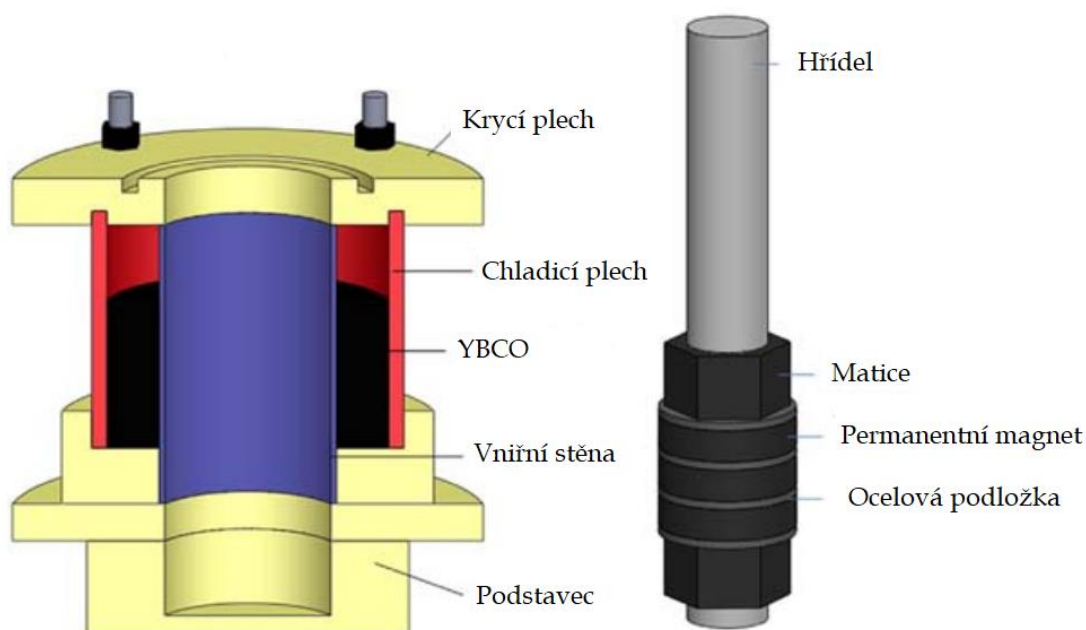
3.3.3 Supravodivá magnetická ložiska SMB

Supravodivost, na které je založen princip SMB ložisek, z nich dělá nejvhodnější a nejefektivnější způsob uložení rotoru setrvačnickových akumulátorů [3]. Supravodivé materiály vykazují silné diamagnetické vlastnosti. To znamená, že je silně odpuzuje vnější magnetické pole. Jestliže vystavíme supravodivý diamagnet magnetickému poli permanentního magnetu, vznikne konzervativní silové pole. Toto silové pole má za následek vznik rovnovážné polohy obou magnetů a zároveň se brání jakémukoli vychýlení z této polohy [21]. Čím je diamagnet silnější, tím je tato konfigurace magnetů stabilnější. SMB ložiska tak kloubí dohromady výhody a eliminují nevýhody PMB a AMB ložisek. V porovnání s AMB ložisky jsou schopna regulovat provozní výchylky, přitom ke svému stabilnímu chodu nepotřebují žádné přídavné elektronické kontrolní zařízení ani vnější elektrické napájení. SMB ložiska navíc vykazují mnohem vyšší tuhosti než ložiska PMB. Užitím SMB ložisek lze dosáhnout součinitele tření v řádu 10^{-6} [22].

Dojde-li na povrchu supravodiče k překročení kritické hodnoty magnetického pole, pak pronikne magnetické pole supravodičem a separuje se normální a supravodivá fáze materiálu. Normální a supravodivá fáze může být buď ohraničena stabilním rozhraním nebo se normální fáze rozptýlí do supravodivé ve formě vírů, obsahujících diskrétní kvanta magnetických toků [21]. V prvním případě jde o supravodivý materiál I. typu, ve druhém případě o supravodivý materiál II. typu. Supravodiče II. typu rovněž nesou označení HTS (High Temperature Superconductive), tedy vysoko teplotní supravodivé materiály. Příkladem látky pro výrobu HTS materiálů je oxid yttria, barya a mědi, označovaný jako YBCO [15]. Vysoko teplotní supravodivý materiál je lehce zavádějící označení. Aby byly navozeny požadované magnetické vlastnosti HTS materiálu, je nutné danou část ložiska chladit tekutým dusíkem [23], což je necelých $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toto označení bylo nejspíš zavedeno v rámci odlišení od supravodičů I. typu, které vyžadují chlazení tekutým heliem [23] na necelých $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$.

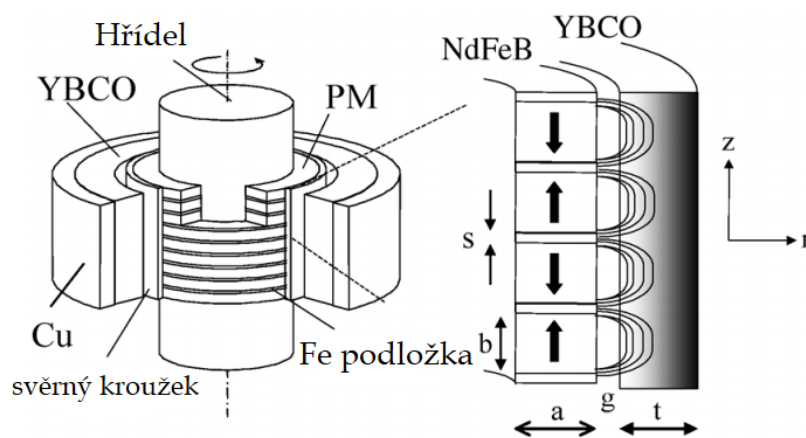
Chlazení SMB ložisek je nevýhoda, protože je energeticky náročné. Pro SMB ložiska se tak využívají supravodivé materiály II. typu, tedy HTS materiály [21], které stačí chladit tekutým dusíkem, který je v dnešní době stále dostupnější. Užitím SMB ložisek z HTS materiálu v rámci setrvačnickového akumulátoru může vést ke snížení ztrát v uložení na pouhých 0,1 % celkové hodinové akumulované energie systému [3].

Jako vzorový příklad provedení SMB ložiska nám poslouží ložisko z článku, který předkládá analýzy a testy HTS ložiska pro energetický systém setrvačnicku [24] (viz Obr. 3.14).



Obr. 3.14 Ložisko se supravodivým statorem [24]

Toto ložisko se skládá z rotoru, který je tvořen permanentním magnetem a ze statoru, který je tvořen z HTS materiálu (zde jde o YBCO). Stator v tomto případě obklopuje rotor. Za účelem co nejjednoduššího konstrukčního řešení je vhodné navrhnout část ložiska z HTS materiálu jako stator, protože tato část musí být chlazená. Stator se pak skládá z HTS materiálu, který je obklopen chladicí komorou, vnější plát komory je pro vyšší efektivitu chlazení vyroben z mědi. Přívod chladicího média v podobě tekutého dusíku bohužel není na obrázku zachycen. Rotor ložiska z permanentních magnetů je připevněn na nemagnetickou hřídel a má strukturované složení. Jednotlivé kroužky rotoru jsou orientovány stejnými póly k sobě. Navíc jsou vzájemně proloženy ocelovými podložkami. Tyto ocelové podložky zvyšují permeabilitu mezi jednotlivými póly sousedících kroužků, což vede ke zvýšení hustoty magnetického toku a k vyšší výsledné tuhosti a stabilitě uložení [24].



Obr. 3.15 Uspořádání a interakce magnetického HTS ložiska [15]

3.4 Motorgenerátor MG

Motorgenerátor (zkráceně MG) je duální soustrojí, které v rámci systému setrvačnickového akumulátoru zajišťuje dodávku a odběr energie. MG funguje jako motor, když setrvačnický zrychluje a nabíjí se nebo funguje jako generátor, pokud setrvačnický zpomaluje a vydává energii [4]. Pro přenos točivého momentu je rotor MG většinou přímo spojen s hřídelí setrvačnického. Výstupní elektrický proud generovaný zpomalujícím setrvačnickým má proměnnou frekvenci, což je pro většinu aplikací často nevýhodné [23]. Pro zajištění odběru i dodávky elektrického proudu generátoru s požadovanou frekvencí se proto používá přídatná elektronika a frekvenční měniče. Jeden frekvenční měnič pro MG, druhý pro propojení s vnější elektrickou sítí [1].

Jak již bylo mnohokrát zmíněno, setrvačnick v systému rotuje velmi vysokými rychlostmi. Z tohoto důvodu není vhodné použít generátor se sběrnými kartáči ani s vinutým rotorem, kvůli potenciálnímu mechanickému poškození [25]. Existuje mnoho různých vhodných provedení motorgenerátorů, nejčastější typy jsou dle výzkumné studie [3] tyto tři následující:

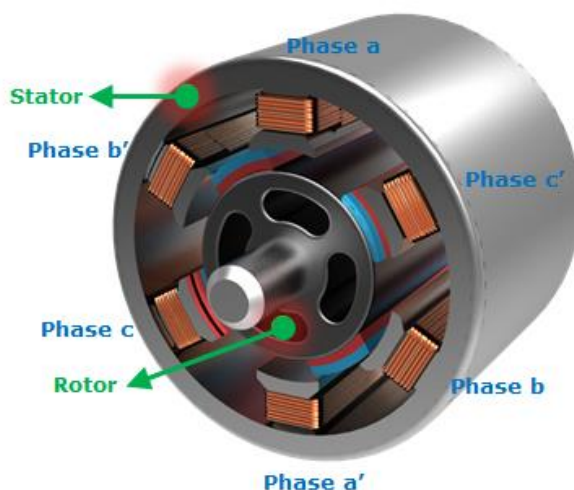
- synchronní motor s permanentním magnetem,
- asynchronní (indukční) motor,
- reluktanční motor.

Pro úplnost je dobré zmínit, že přenos energie do a ze setrvačnickového akumulátoru může být i pomocí mechanického spojení. Takový přenos energie mohou využívat například automobily s hybridním pohonem [25].

3.4.1 Motor s permanentním magnetem

Princip tohoto synchronního motoru je založen na přivedení střídavého elektrického proudu do statorového vinutí, které generuje rotující magnetické pole. Rotor z permanentního magnetu se pak synchronně otáčí s tímto polem a vyvíjí kroutící moment. Jestliže naopak vybíjejí se setrvačnick točí rotorem, zařízení funguje jako generátor [26].

Motor s permanentním magnetem je nejčastějším motorgenerátorem pro setrvačnickové akumulátory, a to hlavně z důvodu vysoké účinnosti v rámci nabíjení a vybíjení systému setrvačnicku. Tato účinnost dosahuje až 95,5 % [3]. Díky vysoké výkonnosti je motor s permanentním magnetem ideální varianta MG pro vysokorychlostní setrvačnickové akumulátory [27]. Příklad motoru s permanentním magnetem je uveden níže na Obr. 3.16.



Obr. 3.16 MG s permanentním magnetem [26]

Nevýhodou tohoto motoru je vyšší pořizovací cena v porovnání s asynchronním a reluktančním motorem, a to právě kvůli ceně permanentních magnetů [27]. Permanentní magnet, ze kterého je rotor vyroben je obvykle poměrně křehký a vykazuje nízkou pevnost v tahu. Nízká pevnost v tahu může v konečném důsledku limitovat maximální provozní otáčky celého systému akumulátoru [4]. Je-li pevnostní charakteristika permanentního magnetu nedostatečná, dá se pro rotor použít například magnetický kompozit, který dosahuje vyšších pevnostních charakteristik (to se ovšem opět odráží na ceně) [25]. Permanentní magnety jsou rovněž citlivé na vyšší teploty. V krajním případě mohou náhle ztratit svoje magnetické vlastnosti v důsledku zvýšené teploty během provozu motorgenerátoru [4], neboť Curieho teplota se u permanentních magnetů pohybuje kolem 300 °C [28]. Poslední nevýhodou tohoto motoru jsou ztráty v důsledku vířivých proudů, které vznikají ve chvíli, kdy rotor nezrychluje ani nezpomaluje [25].

3.4.2 Asynchronní motor

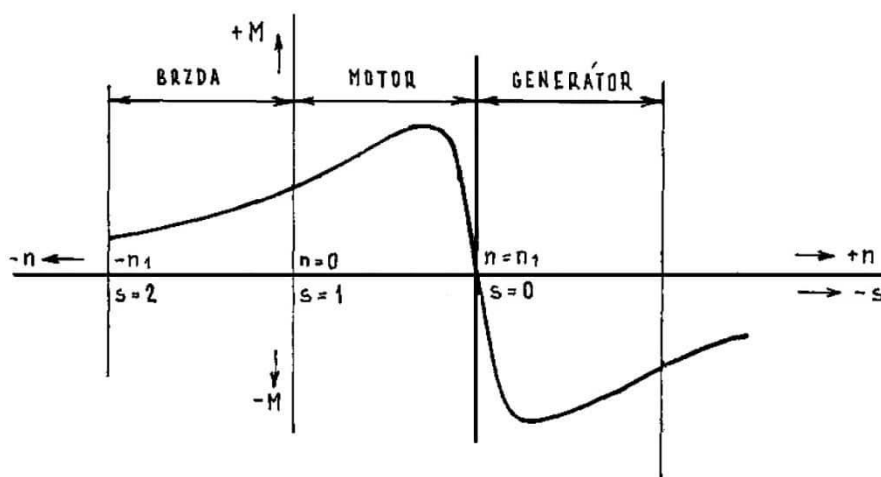
Princip asynchronního motoru je založen na indukci elektrického proudu v kleci rotoru. Proměnné magnetické pole statoru indukuje v kleci rotoru elektrický proud. Elektrický proud v rotu generuje vlastní magnetické pole. Zároveň je magnetické pole statoru za chodu motoru pootočeno vůči vzniklému magnetickému poli rotoru. Toto pootočení magnetických polí vede ke vzniku elektromagnetické síly, která vytváří kroutící moment. Provoz v módu motoru je podmíněn nižšími otáčkami rotoru, než jsou synchronní. Překročí-li rotor spřažený se setrvačником synchronní otáčky, zařízení se dostává do módu generátoru [26].

Asynchronní motor je ideální varianta motorgenerátoru pro setrvačníky s vysokým výkonem. Mezi jeho hlavní přednosti patří robustná konstrukce a přenos vysokých točivých momentů. Asynchronní motor zároveň vykazuje vysokou spolehlivost, není náročný údržbu a je poměrně levný [1].



Obr. 3.17 Asynchronní MG [29]

Ve srovnání s motorem, využívající permanentní magnet, má asynchronní motor trochu nižší účinnost, kolem 93 % [3]. Jelikož systém setrvačnicku často pracuje ve vakuové komoře, může mít asynchronní motor problém s chlazením. V prostředí vakuové komory totiž může docházet k výměně tepla s okolím pouze zářením. Je proto důležité mít motor pod kontrolou, aby nebyl nadměrně přetížen a nepřehříval se [4]. Nevýhodou asynchronního motoru jsou omezené maximální otáčky. Zatímco generátor s permanentním magnetem má otáčky limitované pevností magnetického rotoru a jeho účinnost s otáčkami stále roste, asynchronnímu generátoru roste účinnost pouze omezeně do určité hodnoty otáček (viz Obr. 3.18). Vyššího výkonu a lepšího provedení lze dosáhnout dvojitým napájením [1].



Obr. 3.18 Momentová charakteristika asynchronního MG [30]

3.4.3 Reluktanční motor

Reluktanční motor je typ synchronního motoru, takže pracuje na principu sesouhlasení pólů statoru a rotoru. Póly se sesouhlasením snaží docílit co nejmenšího vzájemného magnetického odporu – reluktance. Na rozdíl od MG s permanentním magnetem není rotor reluktančního motoru silně magnetický. Mód generátoru je stejně jako u asynchronního MG podmíněn přechodem z motorického chodu [31].

Reluktanční MG vyniká stejně jako MG s permanentním magnetem jednoduchou a robustnou konstrukcí a dovede přenášet velké točivé momenty [27]. Rotor je vyroben z magneticky měkkého materiálu, takže se k jeho konstrukci dají použít materiály, disponující vyššími pevnostními charakteristikami [4]. Díky tomu lze reluktanční MG provozovat ve velkém rozpětí pracovních otáček [25]. U rotoru reluktančního MG taky nehrozí demagnetizace, takže je motor jako celek teplotně odolný a může pracovat až do teplot kolem 400 °C [27].



Obr. 3.19 Reluktanční MG [32]

Reluktanční motor má v rámci konstrukce rotoru optimalizovaný tvar, který umožňuje maximální sesouhlasení se statorovým magnetickým polem. Tento tvar snižuje ztráty a zvyšuje celkovou účinnost motoru. Pro snadnou regulaci a řízení tohoto motoru se využívá frekvenční měnič [33]. Nevýhodou reluktančního motoru je obtížné řízení točivého momentu při nízkých otáčkách [1].

3.5 Plášť

Plášť setrvačnickového akumulátoru je nehybná část systému, která plní dvě hlavní funkce. První funkcí je zajištění vhodného prostředí s nízkým odporem pro rotaci setrvačnicku, druhou funkcí je ochranný kontejnment v případě, že dojde k destrukci rotoru za provozu [3].

Aerodynamický odpor narůstá v prostředí s atmosférickým tlakem s druhou mocninou rychlosti otáčení rotoru [3]. Pro snížení ztrát vlivem prostředí, ve kterém setrvačnick pracuje a pro zlepšení celkového provedení akumulátoru je vhodné rotor umístit do vakuové komory. Vysokorychlostní setrvačnick vyžadují často tvrdší vakuum, což je energeticky náročné. Snížení tlaku v komoře sice zajišťuje snížení odporu rotujícího setrvačnicku, nicméně znesnadňuje chlazení motoru a dalších součástí, které se provozem mohou zahřívat (například ložiska). Pro správný chod systému ve vakuu je tak nutný dostatečně účinný chladicí systém, vakuová pumpa a dostatečné těsnění komory [4]. Aerodynamický odpor je také úměrný hustotě prostředí, proto lze pro minimalizaci ztrát zvolit alternativní variantu pracovního prostředí, a to prostředí s heliem. Helium má nízkou hustotu a aspoň částečně chladí systém [34].

Navzdory mnoha aplikacím, ve kterých je kladen důraz na nízkou hmotnost akumulátoru, musí být plášť setrvačnicku pro zajištění bezpečnosti systému dostatečně robustný a pevný. Setrvačnick se totiž může za provozu náhle poškodit například překročením maximálních dovolených otáček nebo časovou únavou. Vhodným materiálem pro konstrukci komory setrvačnicku je tak vysokopevnostní ocel, hliník nebo titan. Dají se taky využít i další materiály jako například kompozity s uhlíkovým nebo skelným vláknem [25]. Setrvačnick z kompozitního materiálu se vlivem rotace rozpadá postupně na mnoho částic a pro plášť není těžké tyto jednotlivé částice zachytit, protože se o plášť zastaví třením. Když se za rotace roztrhne ocelový setrvačnick, situace je mnohem nebezpečnější. Setrvačnick se roztrhne na několik částí, které dopadají na povrch pláště přímo. Jak již bylo zmíněno dříve, vysokorychlostní setrvačnick bývají z kompozitu, nízkorychlostní setrvačnickové akumulátory bývají kovové. Z těchto důvodů se pro vysokorychlostní akumulátory volí hmotnost pláště jako polovina hmotnosti setrvačnicku. Pro nízkorychlostní akumulátory je hmotnost pláště dva a půl násobek hmotnosti setrvačnicku, pro stejné množství naakumulované energie obou systémů [4].

3.6 Příklady využití

Setrvačnickové akumulátory nacházejí uplatnění v mnoha aplikacích. V komerční sféře se však nejčastěji jedná o stabilizaci elektrické sítě, využití v rámci zdrojů nepřerušovaného napájení tzv. UPS (Uninterruptable power systems) a v dopravním průmyslu [25].

Obrázek 3.20 zobrazuje setrvačnickový akumulátor americké firmy Amber Kinetics, která se věnuje výrobě setrvačnickových akumulátorů pro vyrovnávání elektrických sítí. Rotor takového setrvačnicku váží až dvě tuny. Systém je vhodný pro stabilizaci elektrických sítí obnovitelných zdrojů energie jako je solární nebo větrná energie [35].



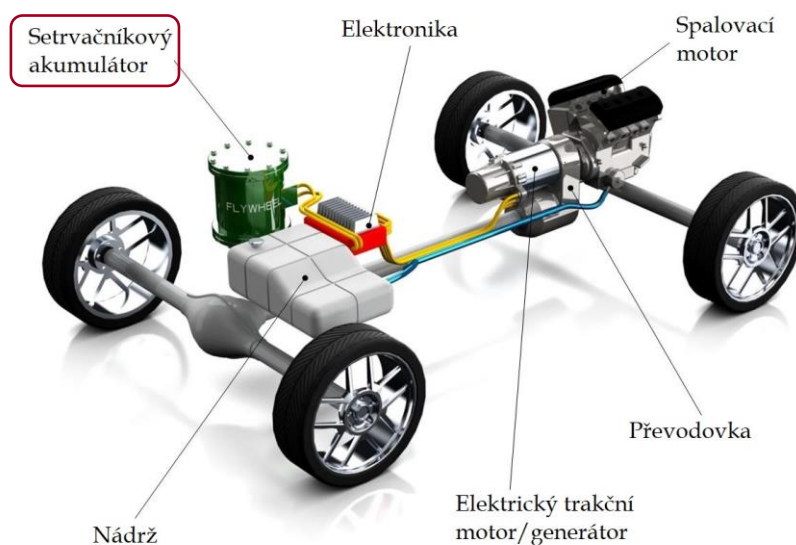
Obr. 3.20 Setrvačnickový akumulátor firmy Amber Kinetics [36]

Zdroj nepřerušovaného napájení (UPS) je zařízení, které pro svůj chod rovněž využívá setrvačnickový akumulátor. Tento systém zajišťuje souvislou dodávku elektrické energie do dalších systémů nebo spotřebičů, jejichž náhlý výpadek zdroje energie by mohl mít fatální následky. Systém je proto vhodný pro počítačová centra, nemocnice nebo letiště [11]. Na Obr. 3.21 je uvedena jednotka nepřerušovaného napájení se setrvačnickovým akumulátorem firmy Caterpillar.



Obr. 3.21 Zdroj nepřerušovaného zdroje napájení firmy Caterpillar [37]

Setrvačnickové akumulátory se běžně objevují také v dopravním průmyslu. Hrají podstatnou roli v rekuperaci energie při brždění. Využívají se v autobusech, vlacích, tramvajích nebo jako součást hybridních pohonů automobilů [25]. Hybridní pohon, využívající mechanický akumulátor lze vidět na Obr. 3.22.



Obr. 3.22 Hybridní pohon využívající mechanický akumulátor [38]

4 DISKUSE

Vzhledem k tomu, že je problematika setrvačnickových akumulátorů při reálném návrhu konstrukce složitá, tato práce rozebírá pouze hlavní části tohoto systému. Všechny setrvačnickové akumulátory sice pracují na jednom základním principu, kterým je akumulace mechanické energie, nicméně mají potenciálně velmi rozsáhlé pole využití. Velká škála možných užití těchto mechanických akumulátorů vede k vysoké variabilitě provedení jednotlivých součástí i systému jako celku. Proto jsem se v této práci snažil zaměřit na základní rysy, které mají setrvačnickové akumulátory společné.

Práce předkládá napět'ovou analýzu setrvačnicku z oceli a z kompozitního materiálu. Ocel je typicky izotropní a kompozit anizotropní materiál, což vede k rozdílnému přístupu k návrhu setrvačnicku z těchto materiálů. U kompozitního setrvačnicku je kladen důraz na eliminaci radiální tahové složky napětí. Tato složka hraje u kompozitního setrvačnicku podstatnou roli, protože v radiálním směru je namáhána matrice, která je sama o sobě slabší a časem degraduje. Ocel tuto nevýhodu nemá, nicméně, pokud se radiální složka kompozitu sníží uvedenými způsoby, kompozit dosahuje významně vyšších pevnostních charakteristik než ocel.

Ložiska pro uložení rotoru mohou být mechanická nebo magnetická. Stále více se za účelem eliminace třecích ztrát používají ložiska magnetická. Magnetická ložiska s permanentním magnetem mají problém s vlastní stabilitou. Z tohoto důvodu slouží pouze jako podpůrná ložiska, která pomáhají nést tíhu rotoru. Problém se stabilitou elegantně řeší aktivní magnetická ložiska, která se dají za provozu řídit pomocí kontrolního systému. Přídavný kontrolní systém i aktivní magnetické ložisko samo o sobě však potřebují vnější napájení, což je nevýhoda, kterou ložiska s permanentním magnetem nemusí řešit. Problém se stabilitou a s vnějším napájením se dá skvěle vyřešit použitím supravodivých magnetických ložisek. I ta však mají jednu podstatnou nevýhodu, což je nutnost chlazení kvůli dosažení supravodivých vlastností. Na základě technických studií [17] a [21] je nejvhodnější variantou uložení kombinace uvedených typů magnetických ložisek.

Pro vystižení hlavních rysů a principů funkce jednotlivých součástí jsem nevěnoval pozornost několika vlivům, které při reálném návrhu vznikají. Tyto vlivy jsou ale pro praktický návrh důležité a mohou významně ovlivnit celkové provedení setrvačnickového akumulátoru.

V části pojednávající o rotoru například není konkrétní zmínka o cyklickém namáhání setrvačnicku. Tento způsob namáhání, který při provozu vzniká v důsledku často velkého rozpětí kolísání otáček, může ovlivnit žívnostnost rotoru, a tím i celého akumulátoru. V části pojednávající o kompozitním vinutém setrvačnicku, který je zhotoven pomocí změny úhlu navíjení a změnou vlákna není bráno v potaz napětí, které vznikne připevněním setrvačnicku na hřídel. Další vliv, který je v rámci práce zanedbán, ale v realitě nastává a ovlivňuje

účinnost celého akumulátoru jsou elektrické ztráty, způsobené elektrickou vodivostí součástí tvořící systém.

K budoucímu většímu používání těchto mechanických akumulátorů může dle mého mínění přispět snižující se cena a zvyšující se dostupnost materiálů, které tyto systémy pro svůj provoz vyžadují. Příkladem může být snižující se cena kompozitních materiálů pro výrobu rotoru nebo zvyšující se dostupnost kapalného dusíku pro provoz supravodivých magnetických ložisek.

5 ZÁVĚR

Hlavním cílem bakalářské práce bylo předložit aktuální poznatky o způsobech konstrukčního provedení dílčích součástí setrvačnickových akumulátorů. Dílčím součástí byly věnovány jednotlivé kapitoly, které popisují problematiku dané součásti ve více variantách.

V úvodní části práce byl nastíněn princip a běžná konstrukce akumulátoru. Dále se práce zabývala rotorem. Nejčastějším materiálem, používaným k výrobě rotoru je buď vysokopevnostní ocel nebo kompozitní materiál s vinutým vláknem. V rámci práce byla provedena napěťová analýza rotujícího setrvačnicku z oceli a z vinutého kompozitního materiálu, protože jde o dvě nejběžnější varianty. Kompozitní setrvačnický jsou náchylné na tahové radiální napětí, proto tato práce předkládá tři způsoby, jak tuto nežádoucí složku napětí redukovat. Je zde uveden způsob pomocí změny navíjecího úhlu, pomocí změny navíjeného vlákna a použitím rozpěrného náboje.

Další částí mechanického akumulátor, kterou se tato práce zabývá je uložení rotoru. Díky nižším ztrátám jsou magnetická ložiska vhodnější než mechanická. Nejčastěji se používají ložiska s permanentním magnetem, aktivní ložiska a supravodivá ložiska. Všechny tři typy mají své výhody i nevýhody. Často se proto používají jako nejvýhodnější řešení uložení systému, které tvoří různé kombinace uvedených typů ložisek.

V kapitole, pojednávající o motorgenerátoru, byly uvedeny tři nejčastější typy těchto zařízení pro přenos elektrické energie mezi setrvačnickem a externím zdrojem. Jedná se o synchronní, asynchronní a reluktanční motorgenerátor. V rámci kapitoly byly uvedeny základní principy funkce těchto zařízení, jejich výhody a nevýhody. Nejlepší variantou motorgenerátoru je dle použité literatury synchronní motorgenerátor s permanentním magnetem, který dosahuje nejvyšší účinnosti až 95,5 %.

Část této práce, která se věnovala plášti akumulátoru uvedla jeho funkce. Plášť slouží jako ochrana okolního prostředí při nečekaném roztržení setrvačnicku za provozu a jako vakuová komora pro snížení odporu rotujícího setrvačnicku. Plášť je nejčastěji vyroben z vysokopevnostní oceli. V závislosti na tom, jestli je setrvačnick akumulátoru kompozitní nebo kovový se volí hmotnost pláště jako polovina nebo dva a půl násobek hmotnosti rotoru.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DAOUD, M., A. ABDEL-KHALIK, A. MASSOUD, S. AHMED a N. ABBASY. On the development of flywheel storage systems for power system applications: A survey. *2012 XXth International Conference on Electrical Machines* [online]. IEEE, 2012, , 2119-2125 [cit. 2021-05-15]. ISBN 978-1-4673-0142-8. Dostupné z: doi:10.1109/ICEIMach.2012.6350175
- [2] DE OLIVEIRA, J. G. *Power Control Systems in a Flywheel based All-Electric Driveline* [online]. Uppsala, 2011 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <http://uu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A434755&dswid=3531>. Disertační práce. Uppsala University.
- [3] AMIRYAR, M. a K. PULLEN. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Applied Sciences* [online]. 2017, **7**(3), 1-21 [cit. 2021-05-14]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app7030286
- [4] PENA-ALZOLA, R., R. SEBASTIAN, J. QUESADA a A. COLMENAR. Review of flywheel based energy storage systems. *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives* [online]. IEEE, 2011, , 1-6 [cit. 2021-05-14]. ISBN 978-1-4244-9845-1. Dostupné z: doi:10.1109/PowerEng.2011.6036455
- [5] DRAGONI, E. Mechanical design of flywheels for energy storage: A review with state-of-the-art developments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* [online]. 2019, **233**(5), 995-1004 [cit. 2021-05-14]. ISSN 1464-4207. Dostupné z: doi:10.1177/1464420717729415
- [6] HORNÍKOVÁ, J., P. ŠANDERA, J. BURŠA a P. JANÍČEK. *Pružnost a pevnost* [online]. První. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003 [cit. 2021-05-18]. ISBN 80-7204-268-8. Dostupné z: <http://beta.fme.vutbr.cz/cpp/>
- [7] HA, S., H. HAN a Y. HAN. Design and Manufacture of a Composite Flywheel Press-Fit Multi-Rim Rotor. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [online]. 2008, **27**(9), 953-965 [cit. 2021-05-14]. ISSN 0731-6844. Dostupné z: doi:10.1177/0731684407086625

- [8] KOYANAGI, Jun. Durability of filament-wound composite flywheel rotors. *Mechanics of Time-Dependent Materials* [online]. 2012, **16**(1), 71-83 [cit. 2021-05-14]. ISSN 1385-2000. Dostupné z: doi:10.1007/s11043-011-9150-0
- [9] JAIN, R., K. RAMACHANDRA a K.R.Y. SIMHA. Rotating anisotropic disc of uniform strength. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 1999, **41**(6), 639-648 [cit. 2021-05-14]. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/S0020-7403(98)00041-1
- [10] HA, S., S. KIM, S. NASIR a S. HAN. Design optimization and fabrication of a hybrid composite flywheel rotor. *Composite Structures* [online]. 2012, **94**(11), 3290-3299 [cit. 2021-05-14]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2012.04.015
- [11] KRACK, M., M. SECANELL a P. MERTINY. Rotor Design for High-Speed Flywheel Energy Storage Systems. *Energy Storage in the Emerging Era of Smart Grids* [online]. InTech, 2011 [cit. 2021-05-14]. ISBN 978-953-307-269-2. Dostupné z: doi:10.5772/18359
- [12] HA, S., M. KIM, S. HAN a T.-H. SUNG. Design and Spin Test of a Hybrid Composite Flywheel Rotor with a Split Type Hub. *Journal of Composite Materials* [online]. 2006, **40**(23), 2113-2130 [cit. 2021-05-14]. ISSN 0021-9983. Dostupné z: doi:10.1177/0021998306061324
- [13] YONNET, J.-P. Permanent magnet bearings and couplings. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 1981, **17**(1), 1169-1173 [cit. 2021-05-14]. ISSN 0018-9464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.1981.1061166
- [14] FEIPENG, X., L. TIECAI a L. YAJING. *International Conference on Electrical Machines and Systems: A study on passive magnetic bearing with Halbach magnetized array* [online]. China, 2008 [cit. 2021-05-15]. ISBN 978-1-4244-3826-6. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4770731>
- [15] WERFEL, F., U. FLOEGEL-DELOR, T. RIEDEL, R. ROTHFELD, D. WIPPICH a B. GOEBEL. HTS Magnetic Bearings in Prototype Application. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [online]. 2010, **20**(3), 874-879 [cit. 2021-05-14]. ISSN 1051-8223. Dostupné z: doi:10.1109/TASC.2010.2040261
- [16] PADEN, B., N. GROOM aj. ANTAKI. Design Formulas for Permanent-Magnet Bearings. *Journal of Mechanical Design* [online]. 2003, **125**(4), 734-738 [cit. 2021-05-14]. ISSN 1050-0472. Dostupné z: doi:10.1115/1.1625402

- [17] SOTELO, G.G., R. DE ANDRADE a A.C. FERREIRA. Magnetic Bearing Sets for a Flywheel System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [online]. 2007, **17**(2), 2150-2153 [cit. 2021-05-14]. ISSN 1051-8223. Dostupné z: doi:10.1109/TASC.2007.899268
- [18] HABERMANN, H. a G. LIARD. An active magnetic bearing system. *Tribology International* [online]. 1980, **13**(2) [cit. 2021-05-18]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/0301-679X(80)90021-3
- [19] XU, S., J., SUN. Decoupling Structure for Heteropolar Permanent Magnet Biased Radial Magnetic Bearing With Subsidiary Air-Gap. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2014, **50**(8), 1-8 [cit. 2021-05-14]. ISSN 0018-9464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2014.2312396
- [20] BAI, J.G., X.Z. ZHANG a L.M. WANG. A Flywheel Energy Storage System with Active Magnetic Bearings. *Energy Procedia* [online]. 2012, **16**, 1124-1128 [cit. 2021-05-15]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2012.01.179
- [21] ABRAHAMSSON, J. a H. BERNHOFF. Magnetic bearings in kinetic energy storage systems for vehicular applications. *Journal of Electrical Systems* [online]. 2011, **7**(2), 225-236 [cit. 2021-05-15]. ISSN 1112-5209. Dostupné z: http://www.journal.esrgroups.org/jes/papers/jes7_2_7.pdf
- [22] KOHARI, Z. a I. VAJDA. Losses of flywheel energy storages and joint operation with solar cells. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2005, **161**(1-2), 62-65 [cit. 2021-05-15]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.07.057
- [23] BOLUND, B., H., BERNHOFF a M., LEIJON. Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2007, **11**(2), 235-258 [cit. 2021-05-15]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2005.01.004
- [24] YU, Z., G. ZHANG, Q., QIU, L., HU, B., ZHUANG a M., QIU. Analyses and Tests of HTS Bearing For Flywheel Energy System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [online]. 2014, **24**(3), 1-5 [cit. 2021-05-15]. ISSN 1051-8223. Dostupné z: doi:10.1109/TASC.2013.2279915

- [25] HEDLUND, M., J., LUNDIN, J., DE SANTIAGO, J., ABRAHAMSSON a H., BERNHOFF. Flywheel Energy Storage for Automotive Applications. *Energies* [online]. 2015, **8**(10), 10636-10663 [cit. 2021-05-15]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en81010636
- [26] Asynchronous machines. *Danish Wind Industry Association* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/async.htm>
- [27] MOUSAVI G, S.M., F., FARAJI, A., MAJAZI a K., AL-HADDAD. A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **67**, 477-490 [cit. 2021-05-15]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.09.060
- [28] HADJIPANAYIS, G., K. LAWLESS a R. DICKERSON. Magnetic hardening in iron-neodymium-boron permanent magnets. *Journal of Applied Physics* [online]. 1985, **57**(8), 4097-4099 [cit. 2021-05-15]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.334630
- [29] *How Does An Induction Motor Work* [online]. In: . 2019 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://cute766.info/how-does-an-induction-motor-work/>
- [30] ČERMÁK, J. Asynchronní stroje - konstrukce, princip funkce a řízení. *Oenergetice.cz* [online]. 2017 [cit. 2021-05-15].
- [31] Switched reluctance motor generator technology. *KASKOD-MTRONIX* [online]. Estonia, 2021 [cit. 2021-05-15].
- [32] Synchronous reluctance motors (SynRM). *ABB* [online]. 2020 [cit. 2021-05-15].
- [33] DA SILVA, P., D., DOS SANTOS MATOS, A., NIED, M., CAVALCA a J., DE OLIVEIRA. Reduction of synchronous reluctance motor currents with minimization of direct and cross saturation magnetic model. *ISA Transactions* [online]. 2021, **111**, 223-230 [cit. 2021-05-15]. ISSN 00190578. Dostupné z: doi:10.1016/j.isatra.2020.11.011

- [34] OGATA, M, H MATSUE, T YAMASHITA et al. Test equipment for a flywheel energy storage system using a magnetic bearing composed of superconducting coils and superconducting bulks. *Superconductor Science and Technology* [online]. 2016, **29**(5) [cit. 2021-05-18]. ISSN 0953-2048. Dostupné z: doi:10.1088/0953-2048/29/5/054002
- [35] Amber Kinetics. *Amber Kinetics* [online]. California USA, 2020 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://amberkinetics.com>
- [36] TISHEVA, P. *Renewables now* [online]. USA, 2017 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://renewablesnow.com/news/enel-to-assess-amber-kinetics-flywheel-energy-storage-technology-575164/>
- [37] Power continuity. *Power continuity* [online]. United Kingdom, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://powercontinuity.co.uk/knowledge-base/in-what-circumstances-is-a-rotary-ups-better-than-a-static-battery-ups/>
- [38] Mechanic Energy Storage and High Speed Machines. *TU Graz* [online]. Graz [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.tugraz.at/en/institutes/emt/research/energy-storage-systems/mechanic-energy-storage-and-high-speed-machines/>

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

E_k	kinetická energie
I	moment setrvačnosti
r	poloměr
m	hmotnost
V	objem
ρ	hustota
$\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$	maximální, minimální napětí
σ_{red}	redukované napětí
σ_{dov}	dovolené napětí
e_m	koeficient měrné energie
e_v	koeficient hustoty energie
K	tvarový faktor
τ	smykové napětí
Re	mez kluzu
Rm	mez pevnosti
p	tlak
σ_t, σ_r	tečné, radiální napětí
μ	Poissonův poměr
ω	úhlová rychlost
u	radiální posuv
E_T, E_P	podélný, příčný modul pružnosti
$\varepsilon_t, \varepsilon_r$	složky deformace v tečném a radiálním směru
δ	přesah

<i>K_Z</i>	tuhost ložiska
<i>PMB</i>	ložisko s permanentním magnetem
<i>AMB</i>	Aktivní magnetické ložisko
<i>SMB</i>	Supravodivé magnetické ložisko
<i>HTS</i>	Vysokoteplotní supravodič
<i>MG</i>	Motorgenerátor
<i>UPS</i>	Zdroj nepřerušovaného napájení

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 3.1 Schéma setrvačnickového akumulátoru	14
Obr. 3.2 Tvarový faktor K nejčastějších typů geometrie homogenního izotropního setrvačnicku	15
Obr. 3.3 Rozložení radiálního a tečného napětí rotujícího ocelového setrvačnicku	18
Obr. 3.4 Rozložení radiálního a tečného napětí v normálním a vinutém setrvačnicku	21
Obr. 3.5 Rozložení napětí vinutého setrvačnicku s nulovým radiálním napětím	21
Obr. 3.6 Vícevrstvý lisovaný kompozitní setrvačnick	23
Obr. 3.7 Kompozitní vícevrstvý setrvačnick s rozpěrným nábojem	24
Obr. 3.8 Rozložení radiálního napětí jednovrstvého kompozitního rotoru s rozpěrným nábojem	25
Obr. 3.9 Rozložení radiálního napětí dvouvrstvého kompozitního rotoru s rozpěrným nábojem	25
Obr. 3.10 Jednoduchá uspořádání magnetického ložiska.....	27
Obr. 3.11 Pasivní ložisko s Halbachovou strukturou	28
Obr. 3.12 Aktivní radiální magnetické ložisko.....	29
Obr. 3.13 Schéma řídicího systému aktivního ložiska.....	30
Obr. 3.14 Ložisko se supravodivým státorem	31
Obr. 3.15 Uspořádání a interakce magnetického HTS ložiska	32
Obr. 3.16 MG s permanentním magnetem.....	33
Obr. 3.17 Asynchronní MG.....	34
Obr. 3.18 Momentová charakteristika asynchronního MG	35
Obr. 3.19 Reluktanční MG	36
Obr. 3.20 Setrvačnickový akumulátor firmy Amber Kinetics.....	38
Obr. 3.21 Zdroj nepřerušovaného zdroje napájení firmy Caterpillar	38
Obr. 3.22 Hybridní pohon využívající mechanický akumulátor	39

9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.1 Charakteristiky různých materiálu pro setrvačníky	16
Tabulka 3.2 Poměr specifické pevnosti různých materiálů	17