

Studentská vědecká a odborná činnost 2015

Strojírenství

3. červen 2015

**Technická univerzita v Liberci
Univerzitní náměstí 1410/1
budova G,
461 17 Liberec**



Recenzent: Maroš Tunák

Editor: Veronika Šafářová

© Technická univerzita v Liberci – 2015

ISBN 978-80-7494-209-9

Obsah

STROJÍRENSTVÍ – navazující a doktorský studijní program

Martin BORŮVKA		
	Extrakce nano-krystalů celulózy a jejich potenciální využití v pokročilých kompozitních systémech	6
Josef BŘOUŠEK		
	Převodovka elektromobilu	11
Jakub EICHLER		
	Dvě základní metody pro určení váhové funkce Preisachova modulu pro feromagnetické látky	18
Marek JELÍNEK		
	Analýza a programování buňky svařovacího robota	28
Ondřej KOHL		
	Vzduchové tlumení pružícího podstavce sedadla řidiče	37
Radovan KOVÁŘ		
	Linka pro zvýšení produkce specifické nanovláknenné vrstvy	47
Ondřej MATUŠEK		
	Ověření přesnosti polohování MEMS upínek za pomoci průmyslové kamery	55
Martin MAZAČ		
	Zařízení pro měření teplot v blízkosti boků zubů ozubených kol – konstrukční řešení a stavba zařízení	64
Ondřej ŘIDKÝ		
	Vliv vyššího obsahu křemíku na vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem	74
David SVOBODA		
	Analýza odezvy rotoru na kinematické buzení základu	82
Jan VÁCHA		
	Elektrické vlastnosti vstříkované termoplastické polymerní matrice	93
David VANĚK		
	Nedestruktivní topografie stěn dutých lopatek plynových turbín	99

STROJÍRENSTVÍ

navazující a doktorský studijní program

EXTRAKCE NANO-KRYSTALŮ CELULÓZY A JEJICH POTENCIÁLNÍ VYUŽITÍ V POKROČILÝCH KOMPOZITNÍCH SYSTÉMECH

Ing. Martin Borůvka

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 2. ročník

Doktorský studijní program – STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE

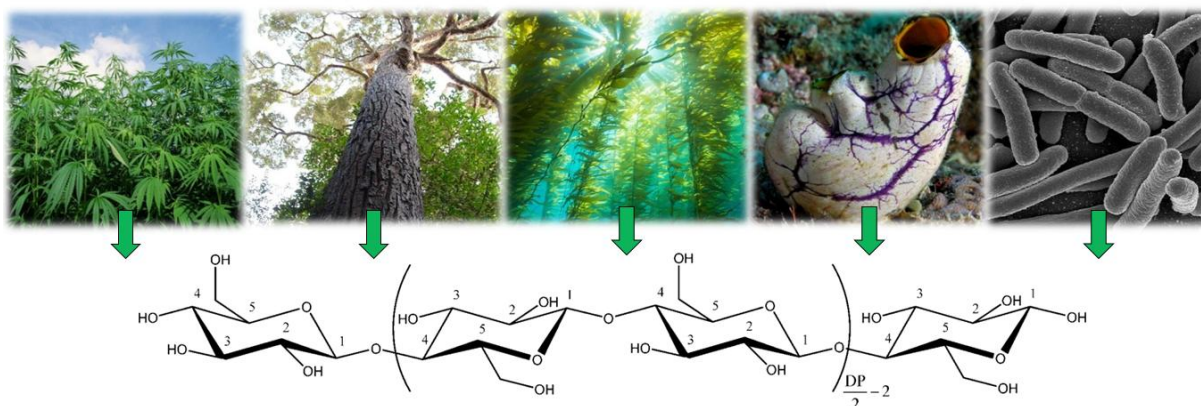
Abstrakt: Příroda je mimořádným zdrojem inspirace při navrhování funkčních materiálů. Základní vyztužující prvkem, který syntetizuje a využívá pro zesílení všech podpůrných struktur stromů, rostlin a řas jsou nano-krystaly celulózy. Ačkoli se jedná výhradně o rostlinný materiál, dokáží ho syntetizovat i někteří mořští živočichové a produkují ho dokonce i některé druhy bakterií. Tyto nano-částice ve tvaru vláken/tyčinek jsou relativně novou třídou materiálů, které mohou najít široké uplatnění v různých technických oblastech, biotechnologii i medicíně. Potenciální využití v nano kompozitním výzkumu je nicméně limitováno homogenní disperzí v polymerní matici. Nicméně i toto omezení lze překonat vhodnou funkcionalizací povrchu nanočástic. K dekonstrukci až na nano rozměry jsou používány rozličné procesy. Nicméně nejznámější, nejednodušší a široce používané jsou metody extrakce pomocí koncentrovaných kyselin. V experimentu byla použita metoda extrakce kyselinou sírovou (H_2SO_4).

Klíčová slova: nano krystaly celulózy, kompozity, biopolymery, extrakce

1 Úvod

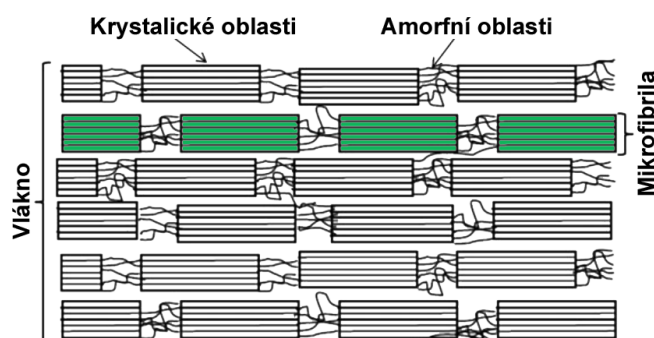
Neustále se zvyšují požadavky moderní společnost na produkty vyrobené z obnovitelných a udržitelných zdrojů, které jsou biologicky odbouratelné, nejsou založené na ropných produktech, mají nízkou nebo téměř žádnou uhlíkovou stopu, jsou zdraví neškodné a ekologicky nezávadné. Celulóza je nejhojnější formou biomasy (Obr. 1) vyskytující se na zemském povrchu, naplňuje výše uvedené požadavky a nalézá aplikace v mnoha sférách moderního průmyslu. Lidstvo využívá přírodní, na celulóze založené materiály (dřevo, konopí, bavlnu, len, atd.) už po tisíce let a jejich použití v různých sférách průmyslu pokračuje i dnes (dřevařský průmysl, papír, textilie, atd.) [1]. Tyto po miliony a miliony let přírodou vyvíjené materiály, byly vytvořeny pro určitý cíl, určité namáhání a požadovanou funkci s důmyslně vytvořenou hierarchickou strukturou. V podstatě celá rostlinná i živočišná říše je výhradně založena na kompozitním principu. S čistě homogenními látkami se v přírodě setkáváme velice zřídka [2]. Nicméně vlastnosti, funkčnost, odolnost a uniformita, které jsou vyžadovány po nové generaci na celulóze založených materiálech a jejich inženýrských aplikacích, nemůže být dosaženo použitím těchto tradičních materiálů. S výhledem na udržitelný rozvoj lidské společnosti je tak nutná evoluce jak v oblasti vědy, tak i technologie [1].

Celulóza je polysacharid s jedinečnou a přitom jednoduchou strukturou. Je to polydisperzní, lineární a syndiotaktický bio-polymer, který vytváří tenké a tuhé mikrofibrily. Tyto mikrofibrily jsou semikrystalické, mají tedy jak amorfni, tak krystalické oblasti.



Obr. 1 Reprezentativní vzorek různých přírodních organismů syntetizujících celulózu a její chemická struktura

Krystalické oblasti však značně převládají a nazývají se nano-krystaly celulózy (Obr. 2). Tyto krystaly jsou základní vyztužující prvek, který příroda syntetizuje a využívá pro zesílení všech podpůrných struktur stromů, rostlin a řas. Ačkoli se jedná výhradně o rostlinný materiál, dokáží ho syntetizovat i někteří mořští živočichové (Pláštenci) a produkují ho dokonce i některé druhy bakterií (*Acetobacter xylinum*) [3]. Extrakcí přírodních materiálů až do nano rozměrů se tak dá eliminovat hlavní příčina defektů spojených s hierarchickou strukturou a vzniká tak nový vyztužující prvek, který otevírá pomyslné dveře budoucí generaci “zelených” nanokompozitů [1].

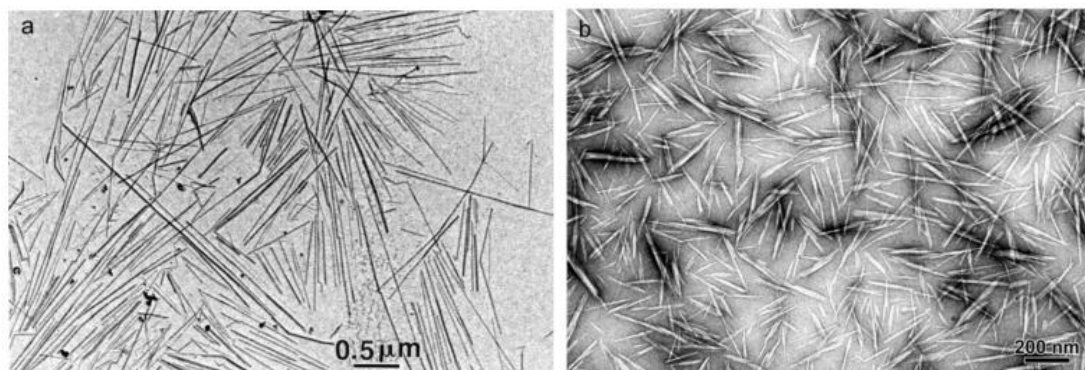


Obr. 2 Schématické uspořádání struktury mikro fibril celulózy v rostlinném vlákně [3]

2 Metody extrakce nano-krystalů celulózy

Většina makroskopických rostlinných vláken je složena z celulózy, hemicelulózy, ligninu, vosků a různých vodou rozpustných sloučenin, které dohromady vytváří důmyslnou hierarchickou strukturu. Progresivní eliminací amorfních složek, které tvoří slabá místa mikro fibril, získáme nano-krystaly celulózy (Obr. 3) s vyšším stupněm krystalinity [4].

Byla popsána a publikována řada metod a studií pro přípravu nano-krystalů celulózy z rozličných zdrojů. Mezi nejzajímavější patří využití odpadní biomasy z jiné produkce (cukrová řepka, cukrova třtina, kukuřice, rýžové slupky, ananas, atd.) [3]. Technické konopí je velice zajímavá multifukční plodina vhodná k pro produkci nanocelulózy. V porovnání s ostatními vláknitými plodinami, je lehké dosáhnout organické produkce bez použití velkého množství pesticidů, herbicidů a fungicidů. Produkce konopí je tak nejen ekologická, ale také mnohem efektivnější. Pro srovnání, jeden akr konopí produkuje tolik celulsove biomasy jako čtyři akry stromům osazených na stejné ploše. Další nespornou výhodou oproti stromům je fakt, že se jedná o jednoletou rostlinu a nemusí se čekat roky než vyroste do požadované velikosti [5].



Obr. 3 TEM snímky rozředěné suspenze nano-krystalů extrahovaných z pláštěnce (a) a ramie (b) [10]

Nejpoužívanější metodou extrakce je hydrolýza pomocí koncentrovaných kyselin (chlorovodíkové, sírové, bromné, fosforečné, atd.) nebo alkálií (NaOH) při současném mechanickém namáhání a působení tepla [4]. Další metoda využívá selektivní oxidace vstupního materiálu pomocí 2,2,6,6 tetramethyl-1-piperidinyloxy (TEMPO) radikálů a následnou mechanickou úpravu mixováním [2]. Šetrnějšího a ekologičtějšího procesu extrakce lze dosáhnout použitím ionických kapalin (koncentrovaných solí v kapalném stavu) [6]. Zdaleka nejnovatější, nejzelenější a nejekonomičtější postup je výzkum extrakce za použití různých enzymů. Janardhan [7] a Kubicek [8] zkoumali selektivní působení enzymů parazitických hub. Další zkoumali enzymatické působení malých mořských těžařů z řádu izopodů (*Limnoria quadripunctata*) nebo suchozemských termitů (*Isoptera*) [9].

3 Vlastnosti, limity a využití v kompozitních systémech

Rozdílné teoretické i experimentální metody byly použity pro stanovení axiálního modulu pružnosti nano-krystalů celulózy. Naměřena byla široká škála hodnot. Průměrná hodnota Youngova modulu pružnosti se pak pohybuje v rozmezí 100-160 GPa. Nano-krystaly celulózy tak převyšují i materiály jako je Kevlar (60–125 Gpa) [10]. Ve srovnání s ostatními konstrukčními materiály (Tab. 1), navíc pokud se vezme v úvahu nízká hustota ($1,5 \text{ g cm}^3$) celulózy je hodnota specifického modulu pružnosti (Youngův modul / hustota) značně vysoká.

Základním předpokladem dobrého vyztužujícího účinku kompozitních systémů je vysoký aspektivní poměr (L/d) vlákně výztuže. Naměřeny byly hodnoty aspektivního poměru v rozmezí 15-85, s ohledem na původ originálního materiálu a způsob extrakce nanočástic. Povrch krystalů je složen z reaktivních hydroxylových skupin, které umožňují dosáhnout různých povrchových vlastností. Funkcionalizace povrchu umožňuje na míru měnit povrchovou chemii nanočástic a usnadnit tak sebe uspořádání, dosáhnout vhodné disperze v široké škále polymerních matic a kontroly nad vazbami jednak mezi jednotlivými nano částicemi, tak na rozhraní matrice/nanočástice [2].

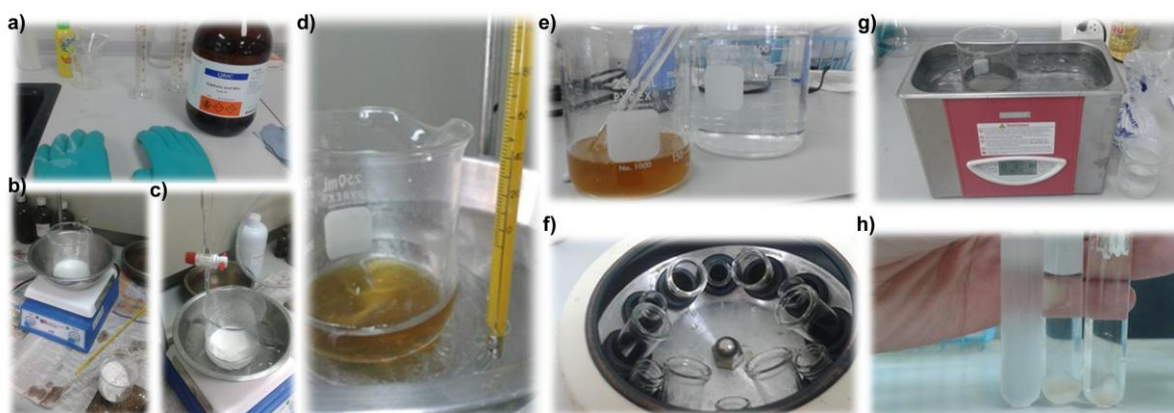
Tab. 1 Porovnání vybraných vlastností běžných konstrukčních materiálů a celulózy [2]

	Modul pružnosti v tahu (GPa)	Hustota (Mg m^{-3})	Specifický modul pružnosti ($\text{GPa Mg}^{-1} \text{ m}^3$)
Hliník	69	2.7	26
Ocel	200	7.8	26
Sklo	69	2.5	28
Nano-krystalická celulóza	138	1.5	92

Je třeba zdůraznit, že celulóza má oproti ostatním konstrukčním materiálům zřejmou nevýhodu a tou je její přírodní podstata a z toho vyplývající hydrofilní charakter. Absorbuje vlhkost, bobtná a podléhá enzymatické hydrolýze [2]. Hlavním příčinou neúspěchu při zpracování kompozitu pak je nehomogenní disperze a distribuce nanočástic v polymerní matici. Díky přítomnosti hydroxylových skupin na povrchu nano-celulózy mají krystaly snahu se seskupovat a vytvářet shluky a provázané sítě. Tato vlastnost, která je základem pevnosti papíru je požadována v aplikacích, kde výztuž formuje provázanou architekturu, která přenáší zatížení v polymerní matici. Na druhou stranu tyto interakce mezi výztuží způsobují agregaci při zpracování a limitují možnosti mechanického vyztužení. Tento fenomén se násobí se snižující se velikostí výztuže [10].

4 Experiment

Postup extrakce je znázorněn na Obr. 4. Jako základní materiál pro extrakci nano-krystalů byla použita mikrokrytalická celulóza (ZIBO ZIMAO TRADE CO., LTD, China) připravená z bavlny. Mikrokrytalická celulóza byla v laboratorním skle smíchána s požadovaným množstvím deionizované vody. Pak byla pomalu dávkována koncentrovaná kyselina sýrová tak, aby finální koncentrace kyseliny byla mezi 50-67 % a poměr kyselina/celulóza byl mezi 8-10. Laboratorní sklo s roztokem byl pak umístěno do vodní lázně o teplotě 45-55°C a po dobu 40-60 minut za stálého míchání udržováno na požadované teplotě. Hydrolytická reakce byla následně ukončena přelitím roztoku do desetinásobku deionizované vody. Sediment pevné fáze byl separován od kapaliny sérií 4-6 odstředování v laboratorní centrifuzě při 3200g po dobu 10 minut.



Obr. 4 Postup extrakce nano-krystalů celulózy (abecedně a-h)

Po každé sérii následovala výměna roztoku a jeho nahrazení deionizovanou vodou dokud nebylo dosaženo pH 6. Roztok byl poté umístěn do ledem chlazené ultrazvukové lázně při výkonu 80% po dobu 10 minut. Výsledkem je homogenní suspenze nano-krystalů celulózy v deionizované vodě. Rozměry nano-krystalů byly následně analyzovány metodou dynamického rozptylu světla (DLS) s průměrnými hodnotami zobrazenými v Tab. 2.

Tab. 2 Rozsah naměřených hodnot z DLS

	hodnota
délka [nm]	160-220
šířka [nm]	8-16
aspektivní poměr [L/W]	10-28

5 Závěr

Extrakce pomocí kyseliny sírové zapříčinila nahrazení části hydroxylových skupin na povrch nano-krystalů celulózy negativně nabitými sulfátovými skupinami. Výsledkem hydrolytické reakce je stabilní heterogenní směs jemně rozptýlené pevné fáze v deionizované kapalině. Nanočástice neflokulují (nevločkují) díky odpuzujícím silám a nesedimentují v nádobě v dlouhodobém časovém intervalu. Tvar vláken/tyčinek, jejich biodegradabilita, obnovitelnost a nano-rozměry s velkým povrchem je v kombinaci s vynikajícími mechanickými vlastnostmi předurčují k potenciálnímu využití v nových zelených kompozitních systémech. Uplatnění mohou najít nejen v různých technických oblastech, ale i v biotechnologii a medicíně. Světový výzkum do této oblasti zahrnuje jejich využití v zajímavých systémech, jako jsou nano-kompozity s tvarovou pamětí, mechanicky adaptabilní kompozity, transparentní a flexibilní optické displeje, lehčené pěny pro selektivní odstraňování oleje z vody (porosita 99%), inteligentní membrány, léčba popálenin a náhrada tkání po úrazech, umělé žíly a nespočet dalších využití.

Pro udržitelný rozvoj lidské společnosti je nano-krystalická celulóza rozhodně zajímavým a multifunkčním materiálem a to nejen s ohledem na její nezávislost na ropných produktech, ale i její ekonomické a ekologické výhody.

Poděkování

Tento článek vznikl za podpory výzkumného projektu SGS 21005.

Literatura

- [1] MOON, Robert J., Ashlie MARTINI, John NAIRN, John SIMONSEN a Jeff YOUNGBLOOD. *Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites*. Chemical Society Reviews. 2011, vol. 40, issue 7
- [2] EICHHORN, S. J., A. DUFRESNE, M. ARANGUREN, N. E. MARCOVICH, J. R. CAPADONA, S. J. ROWAN, C. WEDER, W. THIELEMANS, M. ROMAN, S. RENNECKAR, W. GINDL, S. VEIGEL, J. KECKES, H. YANO, K. ABE, M. NOGI, A. N. NAKAGAITO, A. MANGALAM, J. SIMONSEN, A. S. BENIGHT, A. BISMARCK, L. A. BERGLUND a T. PEIJS. *Review: current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites*. Journal of Materials Science. 2009, vol. 45, issue 1, p. 1-33
- [3] SUSHEEL KALIA, B., KAITH, B. S., KAUR, I. *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites Green Chemistry and Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [4] Mohanty, A K, Misra, M, Drzal, L T, 2005, Natural fibers, biopolymers, and biocomposites. Taylor & Francis, Boca Raton, p 896
- [5] Roulac J 1997 *Hemp horizons: the comeback of the world's most promising plant*. Chelsea Green Publishing, White River Junction, p 211
- [6] MAN, Zakaria, Nawshad MUHAMMAD, Ariyanti SARWONO, Mohamad Azmi BUSTAM, M. Vignesh KUMAR a Sikander RAFIQ. *Preparation of Cellulose Nanocrystals Using an Ionic Liquid*. Journal of Polymers and the Environment. 2011, vol. 19, issue 3, s. 726-731
- [7] JANARDHANAN, Sree Kumar a Mohini SAIN. 2011. *Isolation of Cellulose Nanofibers: Effect of Biotreatment on Hydrogen Bonding Network in Wood Fibers*. International Journal of Polymer Science. 2011: p. 1-6.
- [8] KUBICEK, C. *Fungi and lignocellulosic biomass*. Ames, Iowa: Wiley-Blackwell, Biomass and biofuels series. 2013, 290 p.
- [9] SANDERSON, Katharine. *Lignocellulose: A chewy problem*. Nature. 2011, vol. 474, issue 7352, p. 12-14
- [10] DUFRESNE, Alain. *Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial*. Materials Today. 2013, vol. 16, issue 6, p. 220-227

PŘEVODOVKA ELEKTROMOBILU

Břoušek Josef

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 1. ročník
Doktorský studijní program – STROJE A ZAŘÍZENÍ

Abstrakt: Tato práce se zabývá návrhem převodovky pro vozidlo s elektrickým pohonem kategorie Battery Electric Vehicle (BEV). Převodovka je určena pro zástavbu v uspořádání pohonného ústrojí nazývaného Dual Motor Drive System (DMDS), ve kterém jsou pro pohon vozidla použity dva elektromotory s jednou jednostupňovou převodovkou. V práci je popsán konstrukční návrh této převodovky. Součástí práce je také pevnostní analýza navržené skříně převodovky metodou konečných prvků.

Klíčová slova: elektromobil, elektrický pohon, konstrukce, převodovka

1 Úvod

Vývoj automobilových převodovek je ovlivňován především vývojem motorů používaných v automobilech. Problematika převodovek u vozů se spalovacími motory je v současné době řešena a popsána na velmi vysoké úrovni a různá konstrukční řešení jsou již uživateli ověřovány přímo v provozu po dobu mnoha let. Pro koncové uživatele je v nabídce rozsáhlá paleta nabízených typů převodovek.

Oproti vozům se spalovacími motory se automobily používající pro pohon elektrickou energii dostávají do sériových výrob velkých automobilek až v posledních několika málo letech. Počty prodaných elektromobilů v některých státech narůstají a elektromobily se začínají dostávat mezi více běžných uživatelů. Díky tomuto trendu se otevírá další prostor pro vývoj převodovek určených přímo pro vozidla s elektrickým pohonem. Většina dnešních výrobců vozidel s elektrickým pohonem používá ve většině případů jednostupňové převodovky se stálým převodem, který je tvořen dvěma ozubenými soukolími, přičemž druhý převod tvoří soukolí rozvodovky s mechanickým diferencíalem. Vozy s pohonným ústrojím vybaveným těmito převodovkami dosahují podobných jízdních parametrů v reálném provozu na pozemních komunikacích jako běžné vozy se spalovacími motory. Jistým omezením je menší dojezd na jedno nabití oproti dojezdu vozu se spalovacím motorem na jednu nádrž a následné nutné nabití akumulátorů trvá delší dobu než natankování jedné nádrže paliva pro spalovací motory. S neustálým vývojem nových akumulátorů se ale dojezd elektrovozidel neustále zvyšuje a již nyní většinou plně postačuje pro denní příměstský provoz a například u vozu Tesla Model S lze podle uváděných zkušeností z jízdy dosáhnout dojezdu až 400 km na jedno nabití a absolvovat tak i delší cesty. [2]

Výše zmíněné informace otevírají prostor pro vývoj celého pohonného ústrojí s elektrickým pohonem, který by umožnil těmto vozům dále posunout parametry dojezdu na jedno nabití a zároveň by vozu dodával dostatečnou dynamiku umožňující bezproblémovou jízdu v dnešním provozu na pozemních komunikacích. Na Technické univerzitě v Liberci se této oblasti vývoje věnuje katedra vozidel a motorů společně s Ústavem mechatroniky a technické informatiky. Po prvních zkušenostech s pohonem vozu TUL eŠus se nyní spolupráce soustředí na návrh a výrobu prototypu pohonného ústrojí elektromobilu, které se skládá ze dvou

elektromotorů a jedné jednostupňové převodovky - DMDS (Dual Motor Drive System). Toto řešení nabízí možnosti efektivního řízení elektromotorů s cílem dosažení vysoké účinnosti pohonu během provozu automobilu. Právě návrh této převodovky je předmětem této práce.

2 Návrh převodovky

Cílem návrhu převodovky bylo vytvoření prototypu jednostupňové převodovky určené pro pohonné ústrojí s uspořádáním DMDS pro pohon vozidla kategorie BEV (Battery Electric Vehicle). Hlavními důvody použití jednostupňové převodovky byly vlastnosti používaných elektromotorů, jednoduchost konstrukce převodovky a dosahovaná nižší hmotnost jednostupňových převodovek oproti jiným konstrukčním řešením.

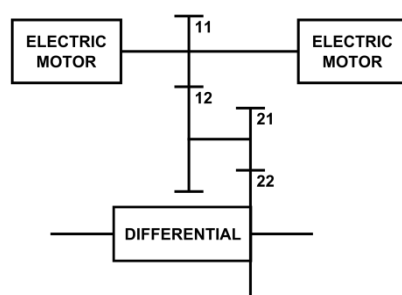
Kromě obecného požadavku na konstrukci s dosažením nízké hmotnosti všech komponent vyvíjených pro tuto kategorii vozidel, bylo nutné v návrhu zohlednit především možnosti výroby. Návrh bylo proto potřeba vytvářet s ohledem na skutečnou budoucí výrobu tohoto prototypu. U součástí, které bylo potřeba vyrábět v podstatě na zakázku, bylo nutné brát ohled na cenu a dostupnost výrobních technologií.

Pro snížení celkových výrobních nákladů byly během návrhu prototypu posouzeny a vybrány dostupné komponenty z automobilových převodovek používaných ve vozech se spalovacím motorem, které by vyhovovaly požadavkům navrhované převodovky. Součásti navrhované do výroby byly použity v případech, kdy nebylo nalezeno řešení s využitím dostupných dílů, nebo v případech kdy nově vyrobený díl přinesl výrazně lepší vlastnosti než díl dostupný ze současných převodovek.

1.1 Uspořádání převodovky

Při určování celkového převodového poměru převodovky byly zohledněny parametry uvažovaných elektromotorů pro zástavbu a současně požadavky pro provoz vozidla na běžných pozemních komunikacích tak, aby bylo vozidlo s tímto pohonným ústrojím schopno dosahovat dostatečných rychlostí umožňujících pohodlné cestování i na dálnicích.

Pro snížení výrobních nákladů převodovky byly posouzeny parametry komponentů v sériově vyráběných převodovkách, které jsou používány v osobních automobilech společnosti Škoda Auto a.s. a shoda s potřebnými parametry byla nalezena v převodovce Škoda MQ200 02T. Tato převodovka je montována například do automobilu Škoda Fabia a umožňuje přenášet vstupní točivý moment až do velikosti 200 Nm. Pro účely převodovky elektromobilu byl z této převodovky vybrán čtvrtý rychlostní stupeň, který společně s převodem rozvodovky dosahuje celkového převodového poměru 4,027.



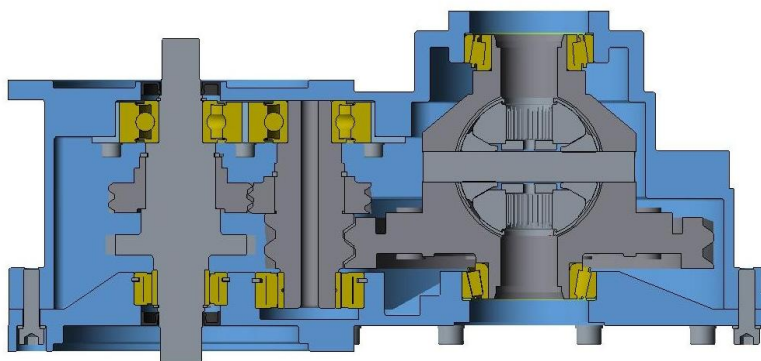
Obrázek 1: Návrh uspořádání převodovky pro pohonné ústrojí DMDS.

V navrženém uspořádání převodovky je každý z motorů umístěn na jedné straně převodovky a točivý moment z obou motorů je přiváděn na hnací hřídel převodovky. První soukolí je tvořeno použitým čtvrtým rychlostním stupněm z převodovky Škoda MQ200 02T a rozvodovka s diferencíalem pochází také z této převodovky. Diferenciál je použitý včetně přírubových hřídelů. Toto řešení umožňuje připojení příčných hnacích hřídelů z vozidel Škoda. Motory jsou vůči vozu uloženy napříč za přední nápravou.

1.2 Popis konstrukce převodovky

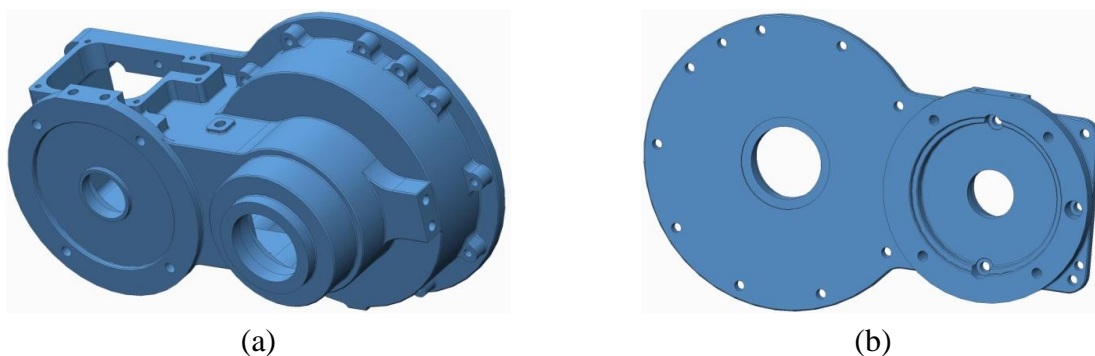
Kromě ozubených soukolí jsou v konstrukci převodovky dále použita také ložiska, konkrétně celý modul dvou kuličkových ložisek uložených v plechovém pouzdru, dále dvě válečková ložiska a na rozvodovce ložiska kuželíková. Díky původnímu umístění soukolí čtvrtého rychlostního stupně těsně vedle soukolí rozvodovky bylo možné použít i hnaný hřídel převodovky. Součástí tohoto hřídele je i hnací kolo rozvodovky. Původní hnaný hřídel byl ještě před tepelným zpracováním zkrácen a je na něm obrobena uložení pro ložisko.

Vzhledem ke zvolenému uspořádání převodovky se dvěma vstupy na hnacím hřídeli nebylo možné použít původní hnací hřídel a bylo nutné navrhnout hřídel nový. Součástí hřídele je kolo parkovací západky umístěné napravo od ozubeného kola 11. Ozubené kolo 11 je v převodovce MQ200 uloženo volně na jehličkovém ložisku. Pro potřeby prototypu je toto kolo na hřídeli nalisováno. Pro připojení elektromotorů jsou na obou stranách hřídele navrženy spoje těsnými pery.



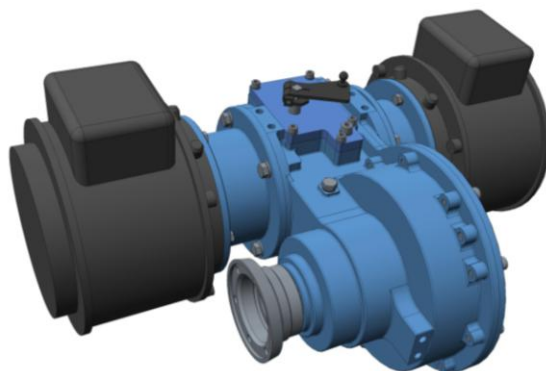
Obrázek 2: Řez konstrukcí převodovky.

Vnitřní komponenty převodovky jsou zastavěny do skříně z hliníkové slitiny. Tvary skříně převodovky jsou uzpůsobeny pro technologii výroby třískovým obráběním na CNC frézce. Materiál pro výrobu skříně byl po konzultaci s pracovníky výroby zvolen EN AW 7021 [AlZn5,5Mg1,5]. Hlavními důvody bylo jeho extrémně nízké vnitřní pnutí, velmi dobrá tvarová stálost, vysoká pevnost a velmi dobrá obrobitelnost. Skříň převodovky byla konstruována s ohledem na nízkou hmotnost a dostatečnou tuhost konstrukce. Minimální tloušťka stěny je 5 mm a v místech spojení víka se skříní převodovky má okraj tloušťku 8 mm. Ve více namáhaných místech, například v okolí uložení ložisek a v místech pro připevnění přírub motorů, je tloušťka stěny zesílena.



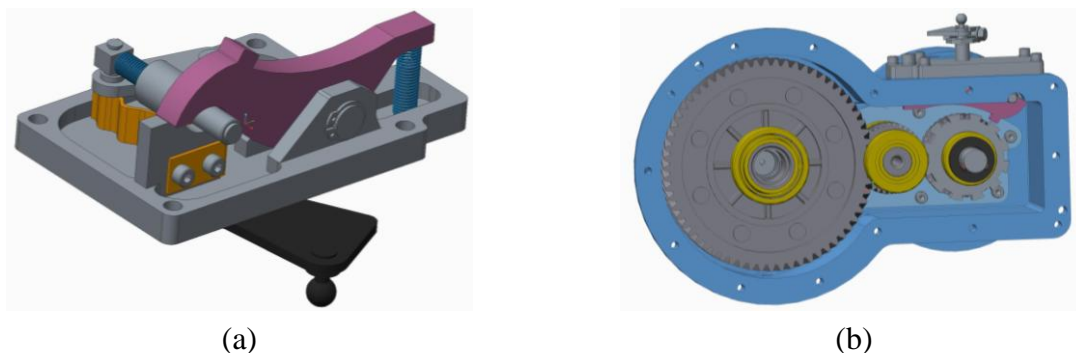
Obrázek 3: (a) Skříň převodovky, (b) víko skříně převodovky.

Elektromotory jsou ke skříni převodovky upevněny pomocí navržených válcových přírub, které umožňují připojení elektromotorů se standardizovanou přírubou NEMA C-face. Toto řešení umožňuje zástavbu např. PMSM motorů Motenergy nebo ACIM motorů od společnosti HPEVS či jejich kombinaci. V případě potřeby upevnění motoru s jinou přírubou je možné modifikovat pouze příruby převodovky a použít stávající celou skříň převodovky i pro jiné motory.



Obrázek 4: Celková sestava pohonného ústrojí elektromobilu.

Používané elektromotory nevyvozuji žádný brzdny účinek při nečinnosti jako běžné spalovací motory používané v automobilech. Proto je nezbytné, aby převodovka obsahovala mechanismus umožňující zablokování některé své části tak, aby bylo vozidlo zajištěno proti pohybu při zastavení v případech, kdy není zatažena ruční brzda. V převodovce je použitý částečně modifikovaný mechanismus parkovací západky z dvouspojkové automatické převodovky DSG používané v některých automobilech Škoda.



Obrázek 5: (a) Mechanismus parkovací západky, (b) západka ve skříni převodovky.

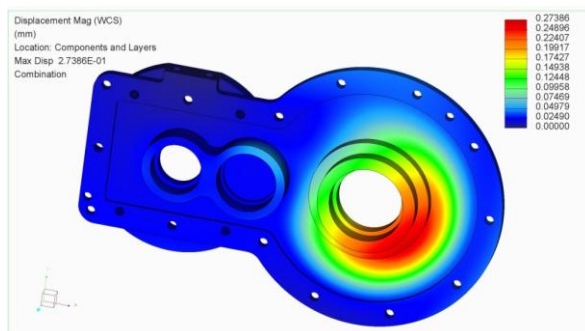
3 Analýza skříň převodovky metodou konečných prvků

Navrhovaná skříň převodovky byla podrobena analýze metodou konečných prvků, která ověřila bezpečnost a tuhost konstrukce skříňe. Metodou konečných prvků byla analyzována skříň převodovky spolu s přírubami elektromotorů. Statická deformačně-napjatostní analýza byla provedena v prostředí PTC Creo Simulate integrovaném do softwaru PTC Creo 2.0. Analyzovány byly situace jízdy vpřed a vzad s plným zatížením 200 Nm.

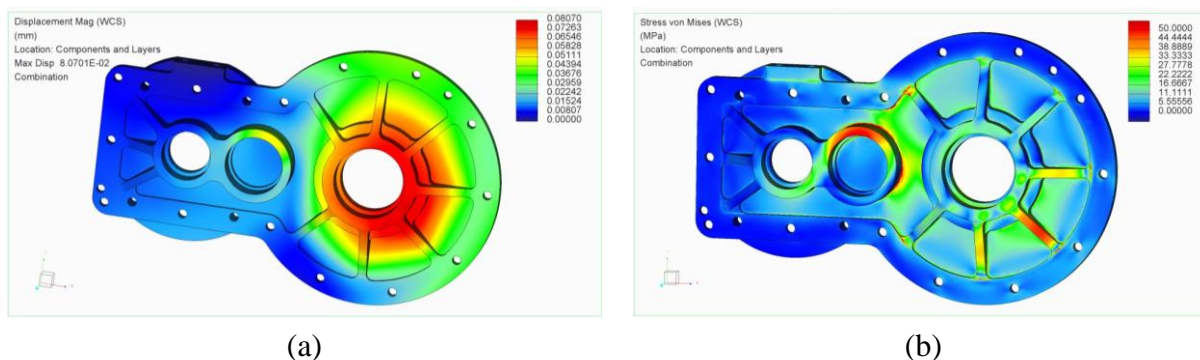
Zatížení skříňe bylo v analýze zavedeno do uložení ložisek. Hodnoty byly určeny z reakcí v uložení jednotlivých hřídelů. Model byl dále zatížen tíhovým zatížením. Zatížení od upevnění elektromotorů přes příruby bylo zavedeno přes náhradní ohybový moment. Na obě příruby byl zaveden reakční točivý moment o hodnotě 100 Nm. Okrajové podmínky byly zavedeny na plochy určené pro uložení skříňe. V těchto místech byl zabráněn posuv ve všech třech osách.

Pro potřeby analýzy byly použity 3D objemové prvky typu tetra s maximální délkou hrany prvku 10 mm. Celkový počet prvků na modelu byl 79 781. Jednotlivým součástí skříňe byl pro výpočet nastaven materiál AL 6061 z knihovny materiálů softwaru PTC Creo. Tento materiál se vyznačuje mezí kluzu 290 MPa a pevností v tahu 320 MPa.

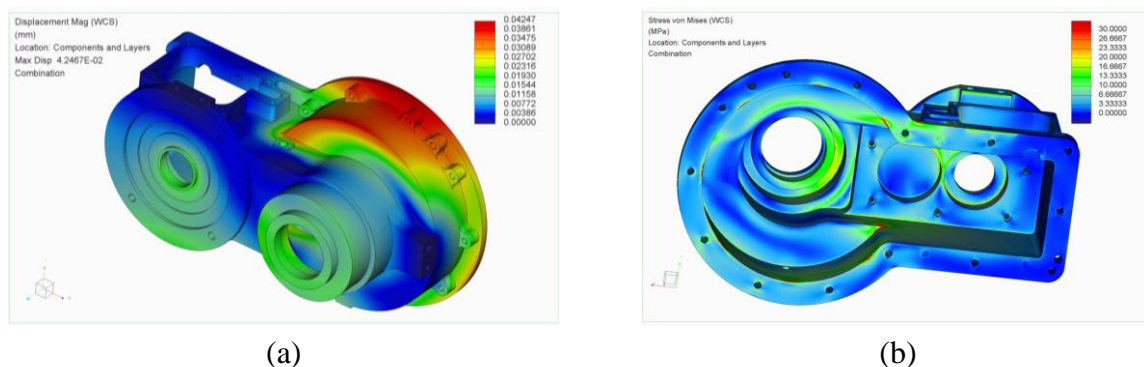
Při analýze prvního návrhu převodovky byla v analýze zjištěna nedostatečná tuhost víka skříňe vyobrazená na obrázku Obrázek 6. Následnou úpravou konstrukce víka doplněním žebor v oblasti uložení ložiska rozvodovky a v místech uložení vstupního hřídele bylo dosaženo výrazné zvýšení tuhosti víka bez nadměrného nárůstu napětí viditelné na obrázku Obrázek 7(a).



Obrázek 6: Výsledné posunutí na víku skříňe bez žebor.



Obrázek 7: (a) Výsledné posunutí na víku skříňe s žebry, (b) Výsledné redukované napětí podle hypotézy HMM na víku skříňe s žebry.



Obrázek 8: (a) Výsledné posunutí na skříně, (b) Výsledné redukované napětí podle hypotézy HMH na skříně.

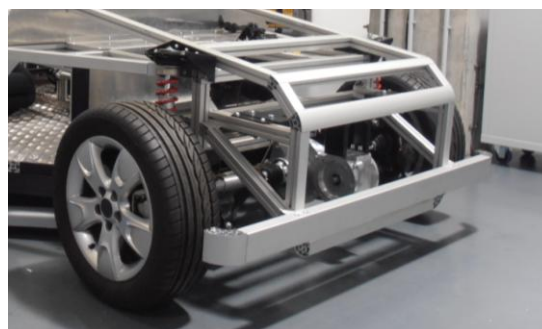
Výsledné hodnoty redukovaného napětí jsou na všech částech skříně převodovky oproti mezi kluzu materiálu poměrně nízké a je tak zaručena vysoká bezpečnost konstrukce. Pro zachování dostatečné tuhosti konstrukce, vyplývající z výsledných hodnot posunutí na modelu, nebylo provedeno následné odebrání materiálu pro odlehčení konstrukce.

4 Závěr

Výsledkem návrhu je konstrukce jednostupňové převodovky umožňující připojení dvou libovolných motorů se standardizovanou přírubou NEMA C-face s omezením maximálního vstupního točivého momentu o velikosti 200 Nm a maximálními vstupními otáčkami 7000 ot./min.



a)



(b)

Obrázek 9: (a) Zhotovený prototyp převodovky, (b) Převodovka zastavěná do zkušebního vozidla TUL eŠus.

V současné době je na katedře vozidel a motorů jedna tato převodovka vyrobena a sestavena. V blízké době bude převodovka použita k ověřování vlastností pohonného ústrojí v uspořádání DMDS se dvěma elektromotory na zkušební powertrain a v delší budoucnosti ji bude možné použít k pohonu dalšího prototypu elektromobilu.

Literatura

- [1] BŘOUŠEK, J. Převodovka elektromobilu. Diplomová práce DP-664, Katedra vozidel a motorů, Fakulta strojní, Technická univerzita v Liberci, 2014.
- [2] ŠVIDRNOCH, R. Vyzkoušeli jsme nejlepší elektromobil světa, Teslu Model S. In: www.auto.idnes.cz [online]. [vid. 2.5.2014]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/tesla-model-s-0cl-/auto_testy.aspx?c=A140429_133300_auto_testy_fdv.

- [3] TESLA MOTORS, Inc. Dual motor drive and constrol system for an electric vehicle [online]. Inventor: Yifan Tang. US 2010022953 (A1). Appl. no. 12/782,413. [vid. 19.5.2014]. Dostupné na: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US8453770.pdf>.

Dvě základní metody pro určení váhové funkce Preisachova modelu pro feromagnetické látky

Jakub Eichler

Sekce – STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, 2. ročník
Navazující magisterský studijní program – Automatické řízení a inženýrská informatika.

Abstrakt: Cílem této práce bylo nalézt vhodný postup pro získání váhové funkce Preisachova modelu. V principu automatizované přímé určení ze sady experimentálních dat není úspěšné v důsledku požadavku dvou parciálních derivací. Daleko lepšího souhlasu s experimentem lze dosáhnout kombinací metody odhadu a optimální aproximace experimentu statistickými funkcemi.

Klíčová slova: Preisachův model, feromagnetikum, váhová funkce Preisachova modelu, proudové harmonické buzení

Úvod

V technické praxi je nutné komplexní studium přechodných dějů transformátorů: zapínacího proudu, ferorezonance a podobně, při kterých magnetické obvody pracují v silně nelineární části materiálové charakteristiky. Např. u přechodných jevů lineární model udává, že proud při zapnutí může být maximálně dvakrát vyšší než v ustáleném stavu. U reálného obvodu však naměříme i desetkrát vyšší zapínací proud.

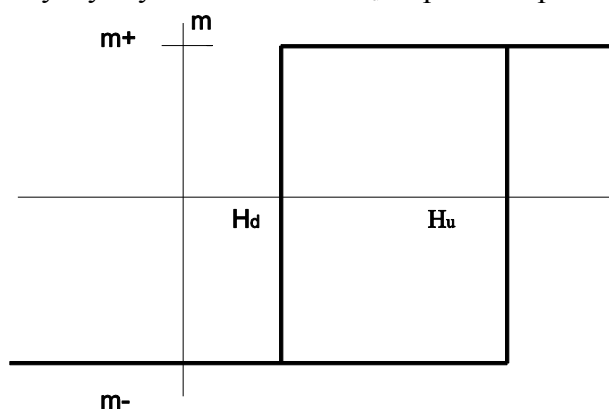
Z toho plyne, že pro kvantitativní studium těchto jevů je důležitý kvalitní počítačový model hysterese feromagnetických materiálů. Běžně užívaný lineární či linearizovaný model nepřichází v úvahu. Aplikovatelný model musí především respektovat hysterese vlastní vlastnosti zejména moderních feromagnetických materiálů. Po zvážení možností jednotlivých typů modelů jsme dospěli k závěru, že nejvhodnější je Preisachův model [1].

Jeho klíčovým parametrem je váhová funkce, která se určuje z experimentu. Cílem této práce je realizovat takový model a najít metody nalezení váhové funkce tak, aby byla co nejlepší shoda s provedenými experimenty. Ukazuje se, že existují dvě základní metody: nahodilý a systematický postup. Práce se zabývá oběma metodami. Poněvadž problematika není běžně známa, nejprve popíšeme stručně Preisachův model a nový experiment realizovaný na základě závěrů tohoto modelu.

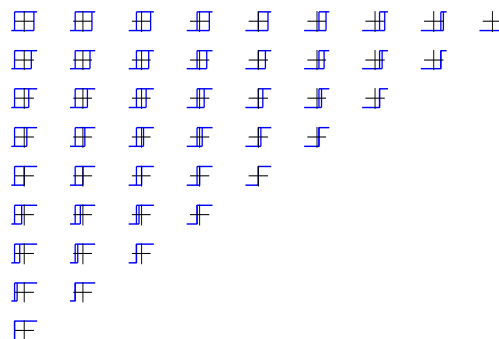
1 Teorie

Základem Preisachova modelu pro feromagnetismus jsou hypotetické částice, hysteryony, které mají pravouhlou hysterese smyčku podle obrázku 1. Přibližně modelují reálné magnetické domény. V této práci je budeme považovat za ideální dipóly se dvěma polarizacemi: „nahoru“ a „dolů“. Překročí-li vnější magnetické pole H hranici H_u na

obrázku 1, je dipól polarizován nahoru s magnetickým momentem $m+$, klesne-li pod H_d , dipól se překlápí dolů a má magnetický moment $m- = -m+$, obrázek 1. V Preisachově modelu se hystereony liší hodnotami H_u a H_d . Jejich systematické uspořádání je na obrázku 2. Na hlavní diagonále není hystereze, na vedlejší jsou symetrické smyčky. Jinak jsou smyčky asymetrické. Pole H_d se posouvá po řádcích, pole H_u po sloupcích.

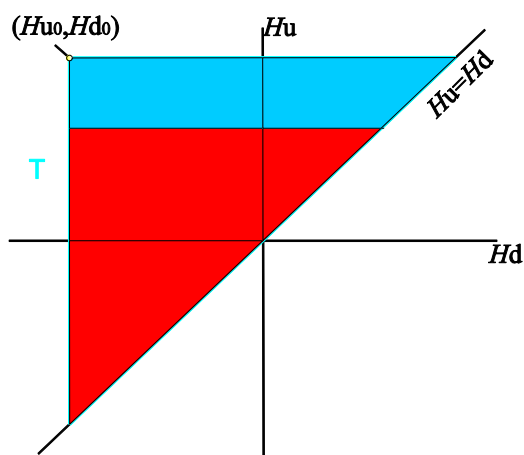


Obrázek 1 Ideální elementární hysterezní smyčka.

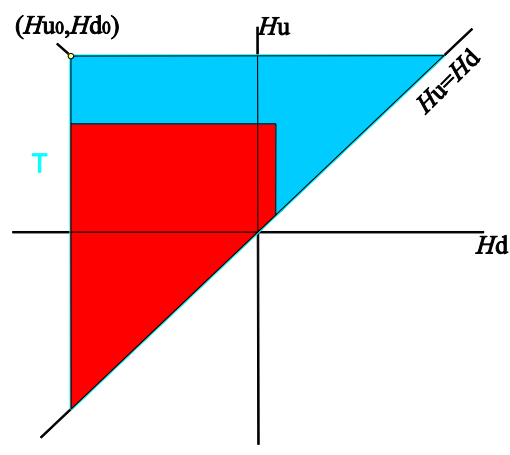


Obrázek 2 Elementární dipóly v Preisachově modelu.

Mechanismus Preisachova modelu plyne z obrázku 3. Červeně jsou označeny dipóly polarizované kladně (nahoru), modře záporně (dolů). Při růstu vnějšího magnetického pole od minima se vodorovná hranice překlápění pohybuje zezdola nahoru. Dipóly pod touto hranicí jsou polarizovány nahoru, ostatní dolů. Obrázek 4 se týká poklesu tohoto pole. Pak se posouvá svislá hranice zprava doleva. Dipóly za touto hranicí se polarizují dolů. Výsledný magnetický moment je pak součtem elementárních magnetických momentů a vykazuje hysterezi, poněvadž při poklesu buzení se převrací jiné dipóly než při nárůstu.



Obrázek 3 polarizace při monotónním růstu



Obrázek 4 pokles buzení

Matematicky lze Preisachův model popsat tímto vztahem pro magnetizaci $M(t)$

$$M(t) = \iint_{H_u \geq H_d} \varphi(H_u, H_d) \hat{m}(H_u, H_d) H(t) dH_u dH_d, \quad (1)$$

kde \hat{m} je operátor aplikovaný na budící pole $H(t)$, který převrací elementární dipóly nahoru nebo dolů. Klíčovým parametrem modelu je váhová funkce $\varphi(H_u, H_d)$, jež je jediným prvkem, který ovlivňuje výsledný tvar modelované hysterezní smyčky. Lze ji určit v principu

buď systematicky ze sady speciálně naměřených dílčích smyček, nebo odhadem ze smyčky při maximálním buzení [2].

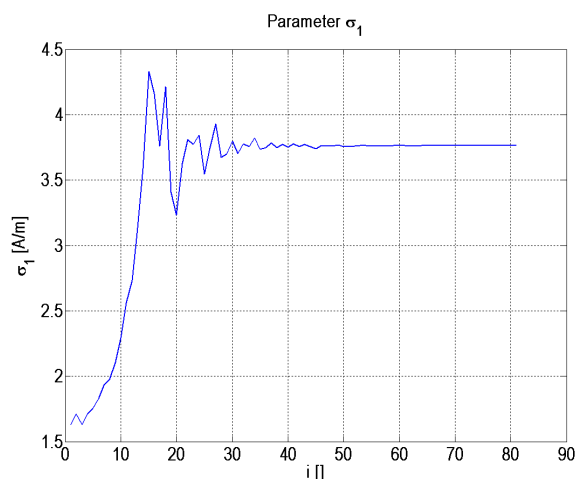
2 Odhad váhové funkce

Pro odhad váhové funkce vycházíme z fyzikálního rozboru, který vede k závěru, že váhová funkce, která je funkcí dvou proměnných H_u a H_d , nabývá poměrně ostrého maxima. Navíc se v teorii dokazuje, že musí být symetrická vůči vedlejší diagonále ($H_u = -H_d$). Fyzikální důvod je to, aby byl demagnetizovaný stav (pro Preisachův model špatně definovatelný) v ideálním případě opravdu demagnetizovaný. Maximum váhové funkce tedy musí ležet na vedlejší diagonále.

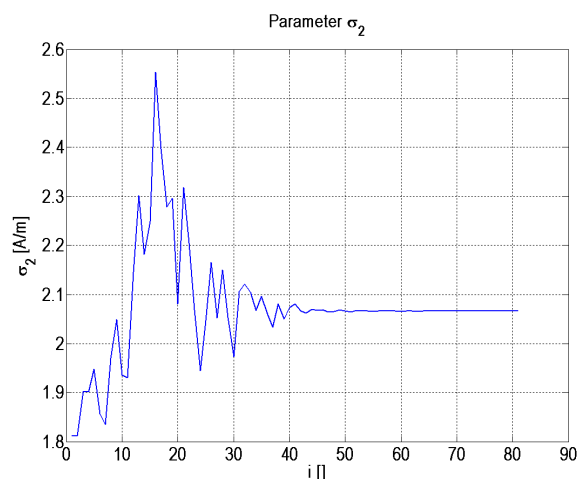
Musíme proto použít funkci, která je symetrická vůči vedlejší diagonále. Polohu maxima určuje šířka hysterezní smyčky na vodorovné ose, tj. vzdálenost mezi koerktivními intenzitami magnetického pole. Při průchodu po vedlejší diagonále není vůči maximu kladen žádný požadavek na symetrii, může zde tedy být libovolný průběh funkce.

Na základě mnoha pokusů jsme se rozhodli použít součin dvou funkcí pro hustotu pravděpodobnosti, kde u jednoho je měřena vzdálenost od hlavní diagonály a u druhého od vedlejší. Střed rozdělení určíme podle koerktivní intenzity. Jednotlivé směrodatné odchylky optimalizujeme tak, aby byly výsledné modelované smyčky co nejvíce podobné experimentálním. Obdobný postup byl použit v práci [3].

Optimalizace se provádí v MATLABu pomocí funkce *fminsearch*. Kritérium je suma absolutních hodnot rozdílů mezi modelem a experimentem. Poněvadž hysterezní smyčka není funkcí, použili jsme průběh magnetické indukce v čase. Budící funkcí byla měřená intenzita magnetického pole. Příklad postupu procedury při hledání optimálních směrodatných odchylek jsou na obrázcích 5 a 6. Na vodorovné ose je počet iterací.

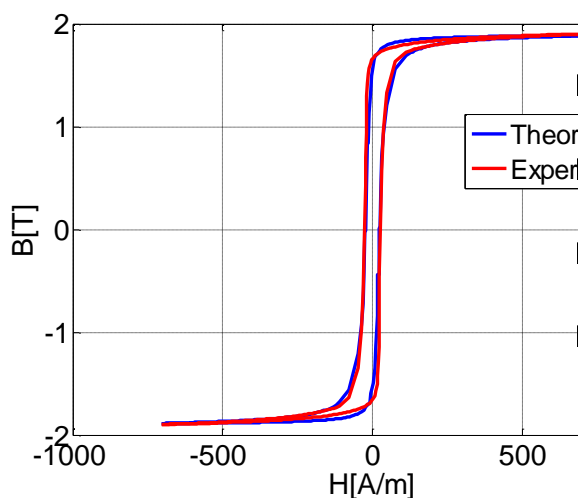


Obrázek 5 Postup při hledání σ_1

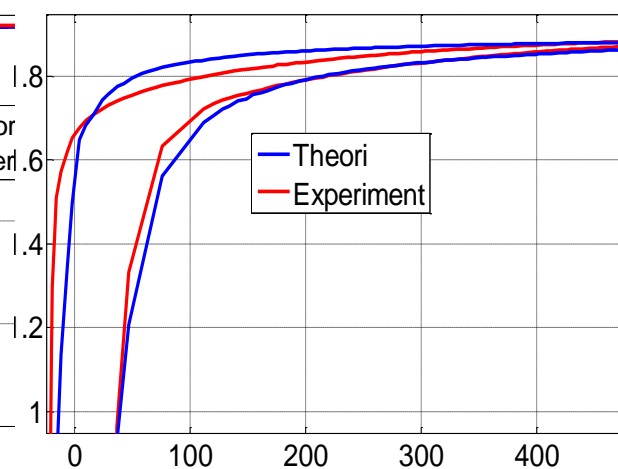


Obrázek 6 Průběh hledání σ_2

Z obrázků 5 a 6 je vidět, že obě proměnné dospěly k optimální hodnotě. To je zdůvodněno konstantní hodnotou v závěrečné fázi. Procedura však najde pravděpodobně více lokálních minim, neboť při více pokusech z náhodných počátečních podmínek se pokaždé dostane do nějakého minima, avšak ne vždy do stejného. To dokazují rozdílné ustálené hodnoty, ale rozdíl mezi modelovanými smyčkami je minimální a téměř není vidět. Na obrázku 7 je porovnání modelované a experimentální hysterezní smyčky. Je vidět dobrou shodu. Detail na obrázku 8 ukazuje odchylky, které jsou však v technické praxi přijatelné.



Obrázek 7 Porovnání modelu a experimentu

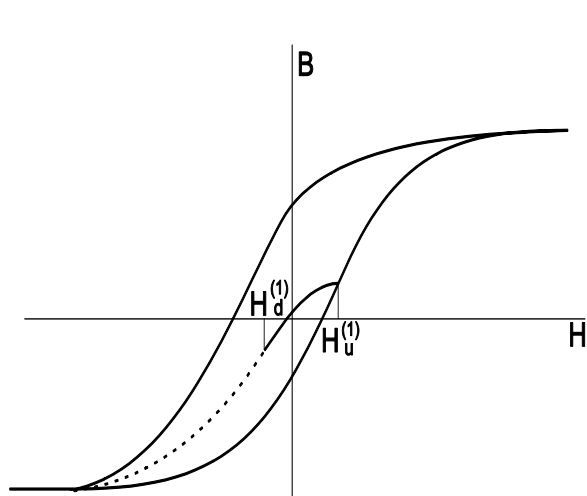


Obrázek 8 Detail kolene hysteretní smyčky

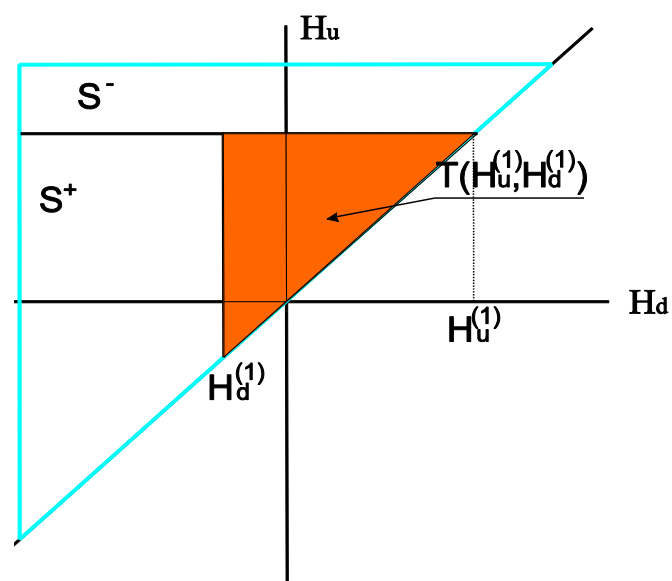
I když není tento přístup systematický, je jej možné použít pro určení váhové funkce. Navíc je výhodou tohoto postupu to, že stačí naměřit jedinou hysteretní smyčku, a to pro maximální buzení. Pro jiná buzení může být shoda horší, avšak model může být stále použitelný pro námi zkoumané jevy.

3 Systematický přístup

V našem případě je výchozí stav Preisachova modelu záporná saturace. Tomu musíme přizpůsobit identifikační měření. Ve výchozím stavu je tedy budící intenzita pod minimální hodnotou H_{\min} . Poté intenzita začne monotónně růst až do bodu $H_u^{(1)}$, obrázek 9. V následujícím kroku se hodnota intenzity začne monotónně snižovat. Tento krok vytvoří přechodovou sestupnou křivku prvního řádu (prvního řádu proto, že následuje bezprostředně po růstu z minima). Obrázek 9 znázorňuje tento postup v Preisachově modelu.



Obrázek 9 Dílčí hysteretní smyčka



Obrázek 10 Preisachův diagram pro obrázek 8

Z obrázku 10 je vidět, že kladně saturovaná oblast S^+ se zmenšila o trojúhelník $T(H_u^{(1)}, H_d^{(1)})$, kdežto oblast S^- se právě o to samé zvětšila. Tento rozdíl nám dává vztah

$$M(H_u^{(1)}, H_d^{(1)}) - M(H_u^{(1)}) = -2 \iint_{T(H_u^{(1)}, H_d^{(1)})} \varphi(H_u, H_d) \hat{m}(H_u, H_d) dH_u dH_d. \quad (2)$$

Zde označíme levou stranu rovnice $\Delta M(H_u^{(1)}, H_d^{(1)})$ a nazveme modifikovaná magnetizace. Integrální tvar rovnice (2) převedeme na diferenciální takto [1]

$$\varphi(H_u^{(1)}, H_d^{(1)}) = \frac{\partial^2 \Delta M(H_u^{(1)}, H_d^{(1)})}{\partial H_u^{(1)} \partial H_d^{(1)}}. \quad (3)$$

Tento vztah přepíšeme pomocí vztahu (2) z modifikované magnetizace na magnetizaci

$$\varphi(H_u, H_d) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 M(H_u, H_d)}{\partial H_u \partial H_d}. \quad (4)$$

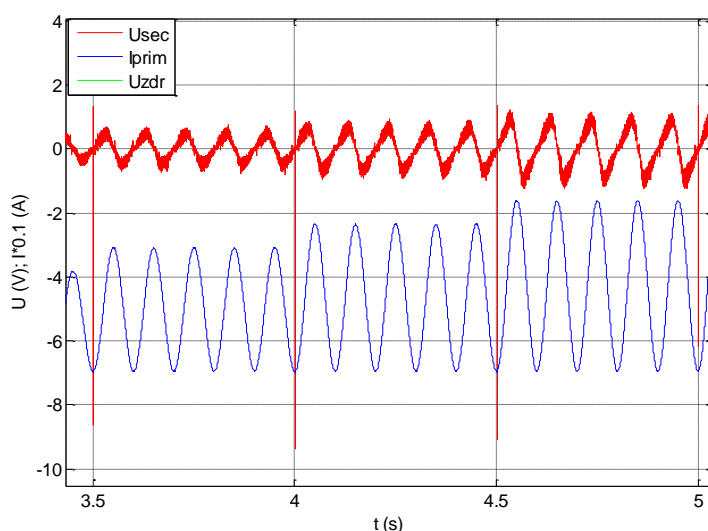
Zde již máme obecný vztah pro váhovou funkci. Nevýhodou je to, že je nutné numericky derivovat, což s sebou přináší nemalé, prakticky neřešitelné, problémy. Derivace experimentální chyby zesiluje, takže numerický výsledek může být nepoužitelný.

Vycházeli jsme ze záporné saturace, ale lze vycházet i z kladné saturace. Postup odvození je analogický, jen dojdeme k poznatku, že váhová funkce musí být symetrické podle vedlejší diagonály. To jsme v předchozí části již využili.

4 Experiment

Pro experiment byly k dispozici dva vzorky transformátorů vyrobené firmou JKeltra. Jeden měl jádro vyžiháné a druhý bez vyžihání, tudíž by měl vykazovat vyšší ztráty.

Při měření jsme museli oproti standardu měřit ze saturovaného stavu, v našem případě záporné saturace. Měření probíhalo tak, že nejprve se zavedlo záporné napětí, které definovalo výchozí stav. Pak se po skocích měnila amplituda a ofset, a to tak, aby se průběh vracel vždy do stejného bodu, viz obrázek 11. Vznikne tím sada hysterezních smyček, jež na rostoucí části bude vždy stejná až na přírůstek, sestupné přechodové křivky prvního řádu budou jiné. Ty se pak použijí k samotnému určení váhové funkce.

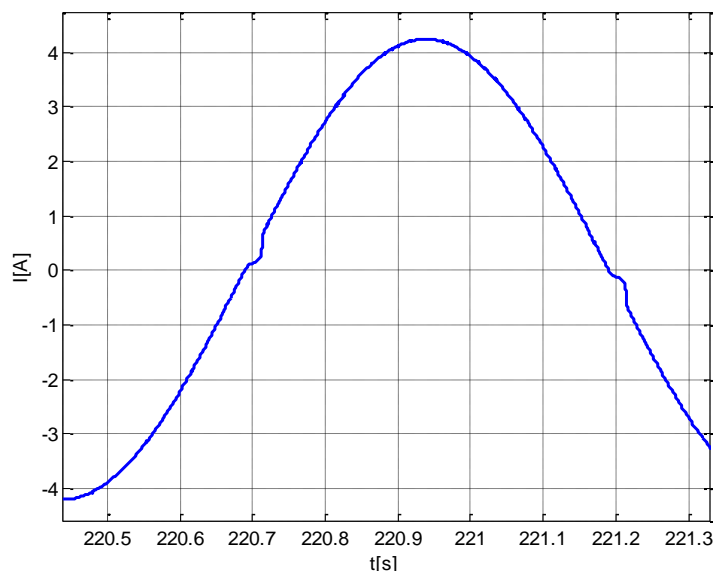


Obrázek 11 Budící proud a sekundární napětí

Protože měření je číslicové, je vhodné, aby proud protékající primárním vinutím transformátoru měl harmonický průběh, jinak vzniká úsek s velmi rychlou změnou a je

problém s tím, že je zde málo naměřených vzorků. Jinými slovy, požadujeme proudové buzení harmonickým proudem, který se mění plynule.

Harmonický proud jsme realizovali nejjednodušším způsobem, pomocí zdroje napětí a předřadného odporu. Plně harmonický proud se bohužel nepodařilo dosáhnout. Pro silnější buzení byl průběh deformovaný v okolí průchodu nulou. Tento jev je vidět na obrázku 12.



Obrázek 12 Průběh primárního proudu

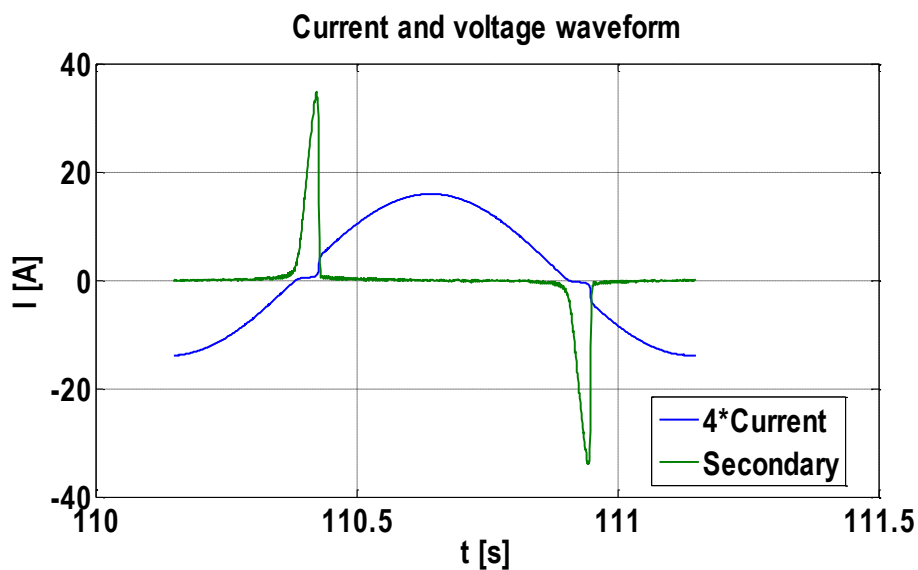
K vysvětlení tohoto jevu slouží obrázek 13, kde je budící primární proud a indukované sekundární napětí, které má dva významné impulsy během periody. Nárůst indukovaného napětí (v absolutní hodnotě) působí proti změně proudu, proto se proud téměř nemění. Naopak, pokles indukovaného napětí podporuje změnu proudu, takže téměř vodorovnou část následuje skok.

Sledovali jsme též, jak se realizovaný průběh blíží harmonickému a to kvantitativně pomocí standardní definice koeficientu zkreslení. Výsledky pro vybraná buzení jsou v tabulce 1. Při buzení do 50 % maxima se neprojevuje deformace budícího proudu a koeficient zkreslení je velmi malý, proud je tedy velmi blízký harmonickému. Při vyšším buzení se objeví deformace a koeficient zkreslení se zvětší asi dvakrát, maximum je 2,2 %. Nicméně i toto zkreslení se v technické praxi považuje za přijatelné

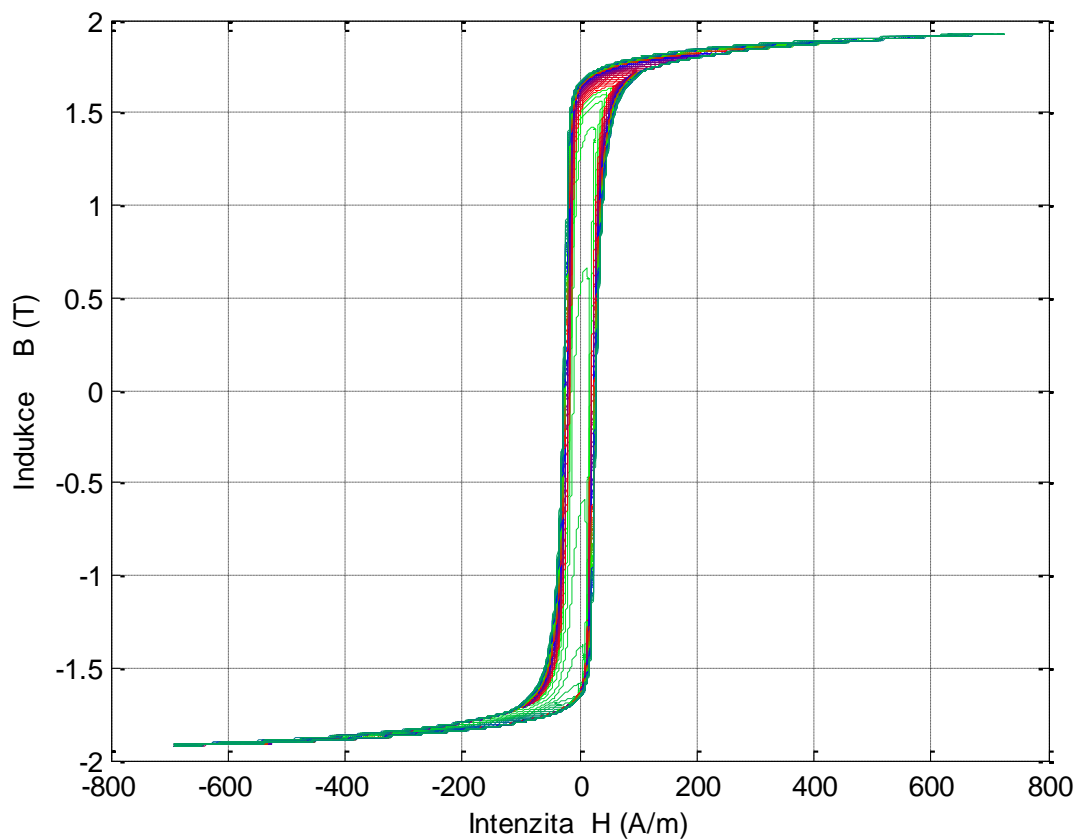
Tabulka 1 Zkreslení buzení

Relativní buzení [%]	50	52	54	56	57	59	67	83	100
Zkreslení [%]	0,84	1,99	2,13	2,19	2,21	2,21	2,13	1,90	1,69

Na obrázku 14 jsou výsledné naměřené dílčí hysterezní smyčky, které budou použity k určení váhové funkce. I když nejsou vidět detaily, je dobré si povšimnout smyček s maximy v blízkosti nuly, které neodpovídají klasickým smyčkám.



Obrázek 13 Průběh napětí a proudu na transformátoru



Obrázek 14 Dílčí hysterezní smyčky ke zpracování

5 Zpracování dat pro systematický přístup

Jelikož váhová funkce (4) je dána dvojitou parciální derivací magnetizace měřené speciálním způsobem, je problém s jejím přímým určením, neboť derivace zesiluje experimentální chyby. Skutečně numerická derivace měření nevedla k přijatelným výsledkům.

Tento problém jsme se rozhodli vyřešit pomocí aproximace měřených dat analytickou funkcí, u níž odpadá problém přesné derivace. Z průběhů na obrázku 15, se jeví jak optimální aproximace zobecněnou funkcí arctg tomto tvaru

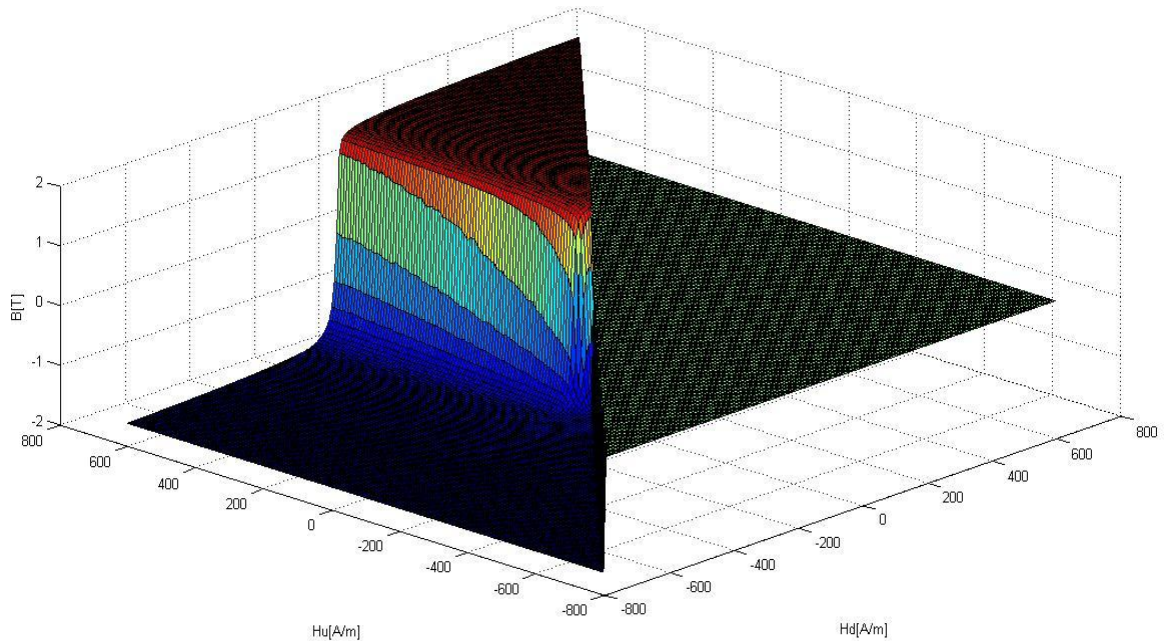
$$M(H_u, H_d) = A \cdot \text{arctg}(k_a(H_d - H_0)) + k_1 H_d \quad (5)$$

Zde konstanty A , k_a , H_0 a k_1 jsou funkcí pole H_u .

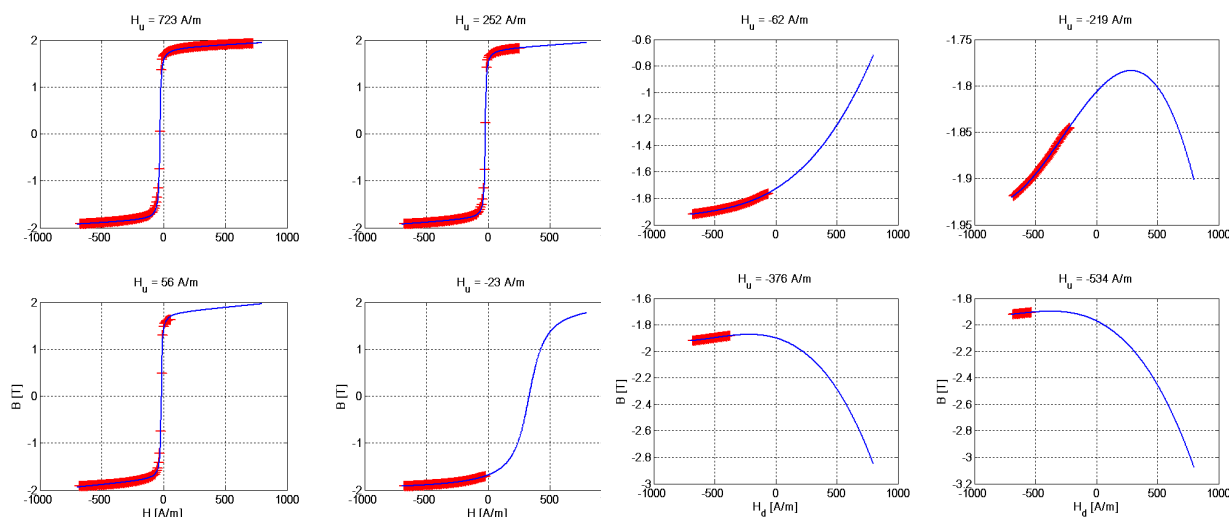
Tímto postupem se podařilo aproximovat magnetizaci pro velká převážně kladná buzení, pod nulové buzení se aproximace nedařila. Proto jsme se pokusili v této oblasti aproximovat průběh pomocí polynomů dvou proměnných

$$M(H_u, H_d) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M C_{ij} H_d^{M-i} H_u^{N-i} \quad (6)$$

Tento způsob dával dobré výsledky, bohužel jen pro malá buzení ale ne již pro buzení v okolí nuly.



Obrázek 15 Naměřená magnetizace



Obrázek 16 Příklady aproximace pomocí funkce arctg pro silná budící pole

Obrázek 17 Příklady aproximace polynommickou regresí pro slabá budící pole

Na obrázku 16 a 17 jsou aproximace pro silná a slabá buzení. Aproximační funkce jsou ve větším rozsahu než data. Tím chceme ukázat, že průběh aproximující funkce mimo oblast dat je nepředvídatelný. Souhlas s experimentem je dobrý ve všech uvedených případech. Bohužel se nedaří aproximace v okolí nulového pole, kde je nejdůležitější, protože váhová funkce zde obsahuje nejvíce informací a nabývá ostrého maxima.

Závěr

Podarilo se nalézt váhovou funkci Preisachova modelu, i když ne systematickým přístupem. Přesto dává model poměrně slušnou shodu s experimentálními daty. Výhodou tohoto postupu je to, že se použije jen maximální hysterezní smyčka, tedy odpadá řada měření. Nevýhoda je v tom, že tento postup nemusí být plně úspěšný ve všech případech. To potvrzuje skutečnost, že naše první pokusy nalézt tímto způsobem váhovou funkci pro nežíhané jádro nebyly tak úspěšné. Také shoda aplikace Preisachova modelu s touto váhovou funkcí na jiné průběhy buzení nemusí být v tak dobré shodě s experimentem. Není totiž jisté, zda hysterezní smyčka pro maximální buzení obsahuje všechny informace o materiálu.

Jako perspektivní se tedy jeví systematická metoda. V principu by mohla být plně automatizována. Sestupné větve prvního řádu se již nyní měří automaticky. Software pro přebírání naměřených dat již nyní umožní redukovat mnohé experimentální chyby, mj. vliv offsetu. Proceduru aproximace lze také v principu automatizovat, takže výsledkem by měly být numerické hodnoty parametrů, které se dosadí do analytického výrazu pro váhovou funkci. Poněvadž se jedná o podrobné měření, získají se všechny informace o materiálu.

Realita je zatím poněkud jiná. Přímé určení váhové funkce ze vzorce (4) aplikované na experimentální výsledky nevedlo k žádnému řešení. Objevila se řada maxim v okolí nulového pole. Proto jsme se jím více nezabývali.

Místo toho jsme se pokusili použít již zmíněný přístup – aproximaci naměřených dat analytickou funkcí. Ten jsme nikde v literatuře, kterou jsme měli k dispozici, nenašli. Volili jsme dvouúrovňovou aproximaci. Bohužel jsme nezískali kompletní váhovou funkci, ale jen její dílčí části.

Již z toho, že pravděpodobně o této metodě není zmínka v literatuře, se ukazuje, že to není jednoduchý problém. Nicméně, stojí za to se pokoušet o jeho řešení. Postupů při aproximaci může být více. Měl by se najít jednoduchý výraz, který by obsahovat obě proměnné a tím by postačovat jen jeden aproximační krok.

Pro úplnost připomeňme, že v základní literatuře [1] se doporučuje použít metody interpolace. Ta však předpokládá velmi přesný experiment. V současném experimentu se hysterezní smyčky při silných buzeních někdy překrývají. Zde je ale již Preisachův model při zpracování dat využit málo. Největší využití je naopak při náhodné metodě.

I dosažené výsledky jsou však prakticky využitelné. Nejbližší práce by měly pomocí Preisachova modelu se získanou váhovou funkcí modelovat odezvu na různá buzení a porovnat je s experimentem. Tak lze odhadnout oblast použitelnosti zatím dosažených výsledků.

Poděkování

Tato práce byla podpořena z projektu Studentské grantové soutěže (SGS) na Technické univerzitě v Liberci v roce 2015.

Literatura

[1] BERTOTTI, G., MAYERGOYZ, I. The science of hysteresis. Vol. 1, 2 and 3. Elsevier, 2006. ISBN 978-0--2-369431-7

[2] Pruksanubal P., Binner A. and Gonschorek K. H, Determination of distribution functions and parameters for the Preisach hysteresis model. Electromagnetic Compatibility Division Dresden University of Technology, Mommsen Str.13, 01069 Dresden, GERMANY, pp. 1 – 4.

[3] Füsü J. Analytical Aproximation of Preisach distribution Functions IEEE Trans. on Magnetics, VOL. 39, NO. 3, MAY 2003, pp. 1 – 4.

ANALÝZA A PROGRAMOVÁNÍ BUŇKY SVAŘOVACÍHO ROBOTA

Bc. Marek Jelínek

Sekce - Mechatronika,
Fakulta Mechatroniky, 2. ročník
Navazující studijní program – Mechatronika

Abstrakt: V této práci je nejdříve představen stav robotiky u ŠKODA AUTO a.s. a v krátkosti též stav průmyslové robotiky celkově. Představení CAD produktů, výrobců robotů a třetích poskytovatelů je vedeno s ohledem na téma této práce, která se omezuje na nejrozšířenější kategorii průmyslových robotů.

Vzhledem k zadání a technickým možnostem padla volba na produkty firmy FANUC, jejichž produkty jsou pro tuto práci k dispozici.

Modelovat se bude reálná robotová instalace, kterou v tomto případě bude představovat školící cela s roboty FANUC v robotické laboratoři ŠKODA ACADEMY. Postup bude odpovídat tzv. integraci, kdy se již existující robotické pracoviště digitalizuje.

Takto vzniklý model se zkalibruje s reálným pracovištěm. Kalibrovat se bude hlavně pracovní plocha na oplocence, a ostatních detailech linky v našem případě až tak nezáleží. To vše bude sloužit k tomu, aby bylo možné v OFF-LINE prostředí ROBOGUIDE vytvořit výrobní program a tento následně bez problému přenést do skutečného robota výše zmiňovaného pracoviště.

Výrobní program se bude tvořit importem obrobku z CADu. Zde budou probrány možné formáty importovaných dat. Práce na obrobku se nejdříve odsimuluje z hlediska dosažitelnosti robotem v programu ROBOGUIDE. Proveďte se též odhad trvání pracovního cyklu tak, jak se tomu děje při návrhu reálné výrobní linky nejen pro automobilky.

Následně se se takto vzniklý program přenesou jedním z možných způsobů do instalovaného robota a odzkouší.

Výsledky této práce se použijí pro demonstrační účely, výuku, a další studium laboratoře robotiky ŠKODA ACADEMY.

Klíčová slova: Průmyslový robot, OLP, ROBOGUIDE, CAD

1. ANALÝZA A PROGRAMOVÁNÍ BUŇKY ROBOTA

Velké výrobní závody a automobilový průmysl zvláště, plánují výrobu na mnoho let dopředu s požadavky na co nejvyšší efektivitu. Při očekávaném zásahu do výroby, jako je zavedení produkce nového výrobku, změně výrobní technologie, rekonstrukce výrobních prostor, rozšiřování či přesouvání výroby se nová produkční linka plánuje v souladu s nasazovanou technologií dlouho před samotným zásahem do stávající výroby.

Výsledkem takového plánování jsou dnes simulační modely budoucích linek, které slouží k určování taktovacích časů, výrobní kapacity, množství a typu technologie, kterou bude třeba nasadit, energetické náročnosti a proveditelnosti vůbec. Výhody takového postupu jsou zřejmé. Je možné bez zásahu do linky samotné provádět neomezeně cyklů pokus/oprava. V případě robotů lze takovýchto simulačních prostředí využít též k tzv. OFF-LINE programování (OLP), kdy samotné testovací procesy zpracovávají virtuálními roboty, jsou ve finále exportovány a použitelné jako výchozí programy pro reálné roboty ve výrobních linkách. Jinak by bylo možné tvořit takové programy s nemalým časovým nákladem až v lince samotné. Lze tedy říci, že nepostižená produkce staré a tvorba linky nové jsou z části paralelní procesy, ačkoliv se jedná většinou o zástavbu do stejného prostoru. Výpadek produkce se tedy omezí pouze na nezbytně krátkou dobu nutnou k instalaci nových výrobních prostředků, zasíťování a ověření importovaných programů. Že se čas poskytování k přestavbě linky neustále zkracuje, není nutné připomínat. Simulace a OLP se tedy stává nutnými podmínkami při a pro návrh linky, na jejichž přesnosti se do budoucna budou klást stále větší nároky.

Zde je třeba též zmínit, že výstup ze simulací a OFF-LINE programy pro import do robotů v lince jsou použitelné jen do té míry, do které model, na kterém byly prováděny, odpovídá realitě. Zvláště se toto projevuje v případě tzv. integrací do linek, kdy to stávající výroby se technologie přidává. Např. pokud se pouze rozšiřuje sortiment výrobků. Zde se musí postupovat zvláště obezřetně, neboť jsme omezeni již stávajícím vybavením a cyklem linky. Získání přesných dat o topologii linky je tedy esenciální.

Obor robotiky se neustále rozvíjí a simulace se stávají detailnějšími a náročnějšími. Vývojových prostředí je dost, jejich možnosti se ale liší, z části v závislosti na podpoře od výrobců technologií. Výrobci robotů nabízejí téměř vždy vlastní simulační prostředí, které poskytuje věrnější chování vlastních robotů. S rozšířenějšími simulačními produkty třetích stran si tak vlastně konkurují.

I z těchto důvodů je nutné mít dané problematice dostatečně hluboké znalosti a dovednosti, aby bylo možné výsledky interpretovat a popřípadě korigovat.

1.1. Obsahem této práce je

Popsání aktuálního stavu robotizace v automobilce ŠKODA AUTO a.s. A to včetně prostředí CAD používaných pro OFF-LINE programování a přípravu robotů.

Následně jsem se z celé škály omezil na roboty firmy FANUC, které jsou počtu 500 ks aktuálně používané na projektech OCTAVIA, RAPID, FABIA.

K robotům ve výrobě samotné byly instalovány i tréninkové roboty v prostorách ŠKODA ACADEMY, které se využívají ke školení personálu výroby údržby a projektantů linek. K těmto robotům mi byl udělen přístup a budou použity k vývoji a testování v rámci této práce.

Tyto roboty doplňuje i SW výrobcem poskytované vybavení ROBOGUIDE. Jedná se o OFF-LINE programovací prostředí s virtuálním robotem (roboty). V tomto prostředí se bude vytvářet model robotického pracoviště podle reálné předlohy a následně se použije pro vytváření a testování výrobních programů.

Důvodem pro volbu právě těchto produktů byla jejich dostupnost a nabízené možnosti, o kterých se v této práci zmíním.

Demonstrovat se budou v zásadě věci dvě. Modelování pracoviště a jeho kalibraci s reálným pracovištěm. Následně pak proces CAD model – OFF-LINE prostředí – program pro robota – výroba na skutečném robotu.

1.2. Obsahem práce není

Kompletní popis a implementace řešení na všech produktech aktuálně používaných v průmyslu, což je samo o sobě nad rámec této práce.

Tato práce se rovněž nezabývá simulací na jiné technologii než na samotném robotu. Modely jiných technologií jako jsou lepičky, MIG/MAG svářečky atd. zde zapracovány nebudou.

Rovněž se zde nerozebírá import veškerých formátů a verzí, které produkty deklarují ovládat.

1.3. Realizace Off-line programování

Tato práce bude realizována za pomoci softwaru ROBOGUIDE a FREECAD. Tyto softwary mají poměrně širokou možnost využití. Prostedí ROBOGUIDE je možné využít pro OFF-LINE programování a simulaci robotů FANUC. Je zde možné vymodelovat celé pracoviště včetně všech objektů a reálně odsimulovat správnou funkčnost modelu. Následně je možné nahrát program z tohoto modelu do reálného robota. Simulační model nám prozradí mnoho potřebných informací jako je např. ověření dosahu jednotlivých poloh, zjišťování kolizních stavů v pracovním prostředí, správná funkčnost senzorů atd. Velkou výhodou je, že pokud máme přesné informace o reálném pracovišti tak je adjustace modelu velice přesná, rychlá, přehledná a pohodlná. Navíc OFF-LINE programování umožňuje práci vykonávat mimo pracoviště, tím pádem je možné programovat třeba i z pohodlí domova. Jelikož jak již bylo řečeno, veškerá simulace se provádí na PC v softwaru ROBOGUIDE.

V softwaru FREECAD je možné veškeré chybějící objekty vytvořit. Velice užitečnou vlastností těchto softwarů je to, že je možné tyto objekty poměrně snadno naimportovat do prostředí ROBOGUIDE. Tím pádem mohou být tyto objekty plnohodnotně využívány v prostředí ROBOGUIDE, jelikož tento software podporuje většinu CAD dat.

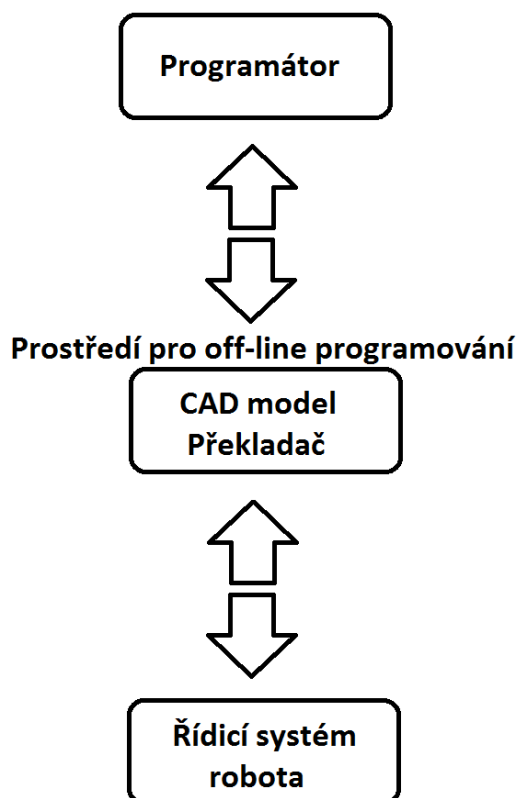
V této práci bude vytvořen základní program, který dokáže na reálném pracovišti svázanost těchto dvou softwarů. V softwaru FREECAD založíme nový projekt, ve kterém vytvoříme námi potřebné objekty, se kterými budeme dále pracovat. Těmto objektům můžeme v prostředí ROBOGUIDE přidělit určité vlastnosti a parametry. Tyto naimportované objekty je

možné používat v prostředí ROBOGUIDE jako např. Fixtures, Obstacles, Parts. V softwaru ROBOGUIDE je možné vygenerování jednotlivých dílů, překážek a drah pro robota.

Jelikož nám prostředí ROBOGUIDE umožňuje některé základní objekty přímo vytvořit, tak v prostředí FREECAD budeme tvořit pouze objekty, které se v prostředí ROBOGUIDE využijí jako objekty typu Parts, tzn. jejich hrana bude sloužit jako dráha robota.

V námi vytvořeném simulačním modelu využijeme nakloněnou plexisklovou desku, která je v robotických laboratořích reálně obsažena. Tuto desku využijeme ke generování dílů, tzn. v softwaru ROBOGUIDE bude nadefinována jako objekt typu Fixtures což znamená, že se na této desce mohou generovat jednotlivé díly pro robota.

Pokud bude naším cílem např. nakreslení libovolného obrázku či textu na nakloněné plošině, využijeme software FREECAD kde jsou možnosti modelování téměř neomezené. Je zde možné zhotovit téměř libovolný technický výkres, který se dá do softwaru ROBOGUIDE naimportovat. Hrana tohoto objektu bude sloužit jako dráha pro koncový bod robota. Tímto jednoduchým krokem a vhodnou adjustací můžeme poměrně rychle a přesně zhotovit i zdánlivě složité dráhy pro robota, které by byli v ručním ON-LINE režimu takřka neproveditelné.



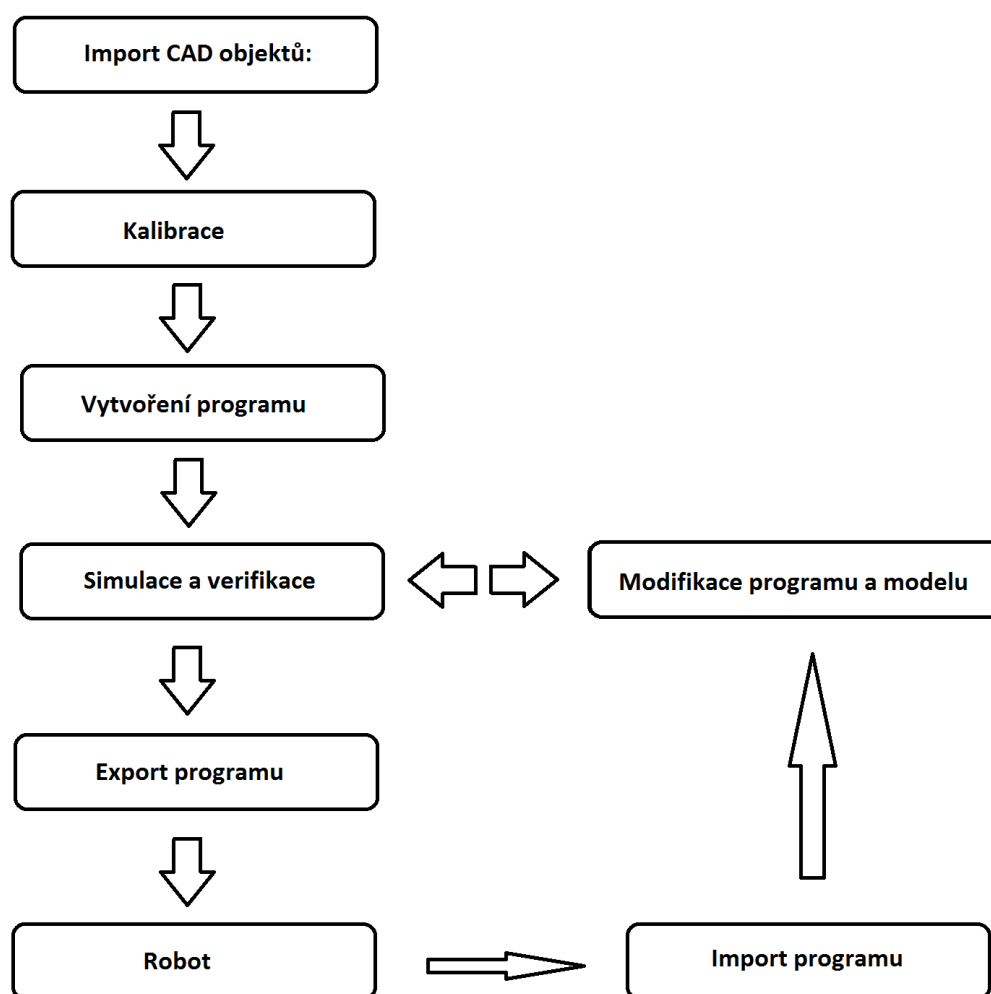
obr.1: OFF-LINE programování

Jak již bylo řečeno OFF-LINE programování robotů je rozdílné od ON-LINE programování tím, že se programování uskutečňuje za pomoci 3D modelu, který je v našem případě vytvořen v prostředí ROBOGUIDE. Tento software potřebuje ke správné funkci překladač,

díky kterému je možné veškerá data přetransformovat do podoby, která umožňuje naimportování těchto zdrojových kódů pro konkrétního reálného robota.

Prostředí ROBOGUIDE pracuje s CAD/CAM modelem kde si jednotlivé informace vyměňuje za pomoci knihoven objektů, které jsou do simulačního modelu naimportovány. Nejčastěji jsou v těchto knihovnách jednotlivé modely robotů, kontrolérů, výrobní díly, typy nejběžnějších překážek atd.

Průběh celé simulace lze simulovat v reálném čase, a je tedy možné upravit a optimalizovat pracovní cyklus. Celý model musí být maximálně věrný realitě, aby byla oprava případných nepřesností a chyb pokud možno co nejmenší.



obr.2: Průběh OFF-LINE programování

1.4. Vygenerování dráhy podle CAD objektu

Prostředí ROBOGUIDE nabízí možnost generovat trajektorie robota z předlohy. Tou předlohou musí být objekty typu obrobek (part). Na takovémto obrobku lze body pro dráhu určovat několika způsoby. Mohou to být v podstatě libovolné body na povrchu, ke kterým ROBOGUIDE naorientuje v žádaném předdefinovaném směru TCP robota. Podstatně jednodušeji se dráha generuje na hranách a rozích obrobku. K tomu aby ROBOGUIDE

rozpoznal hrany, se osvědčil formát IGES pro import CAD modelů obrobků. S formáty STEP a STL jsme měli problémy.

Pro uložení obrobku do robotické cely slouží tzv. přípravky (Fixtures), na kterých se obrobky mohou „vyskytovat“.

Výsledná trajektorie pohybu robota obsahuje i „příletové“ a „odletové“ body od obrobku, všechny body na obrobku mají jasně definovanou orientaci, rychlosti a druh pohybu.

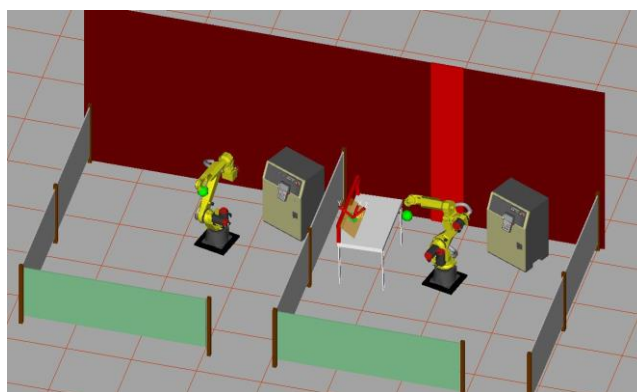
Takovouto trajektorii je potom možné uložit do programu a ten přenést do skutečného robota.

1.5. Model reálného pracoviště

Na obrázku je možné spatřit reálný model pracoviště, který je možný porovnat s realitou. Cílem bylo vytvořit objekty, které se budou pokud možno co nejvíce blížit realitě. Na obrázku je možné vidět dvě vymodelované cely s robotem typu FANUC M-20iA, které jsou paralelně vedle sebe. Objekty jsou namodelovány s mm odchylkami, jejich přesná adjustace je rovněž součástí této práce [10].



obr.3: Robotická cely ŠKODA ACADEMY [23]



obr.4: Model robotické cely

1.6. Praktický výstup práce

Praktickým výstupem této práce bylo zdigitalizování reálné robotické laboratoře ve firmě ŠKODA AUTO (obr.4:), která se nachází v Mladé Boleslavi na ŠKODA AUTO ACADEMY. V první řadě bylo zapotřebí tuto robotickou buňku přesně zanalyzovat a následně změřit. Tyto parametry byly posléze využity jako vstupní data pro digitalizaci této buňky v prostředí ROBOGUIDE.

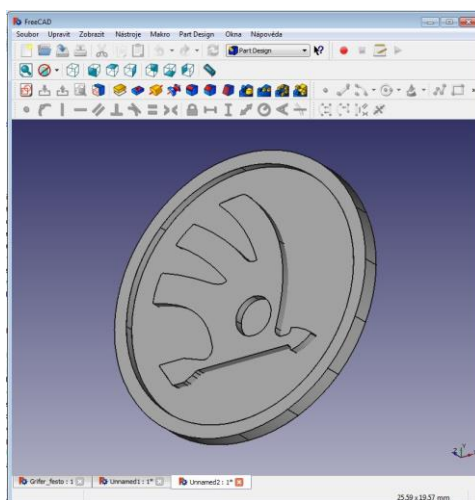
Na základě tohoto „věrného“ modelu pracoviště bylo zapotřebí vytvořit v tomto OFF-LINE prostředí program, který by splňoval funkčnost jednak v prostředí ROBOGUIDE, ale také i na reálném robotu.

Prostředí ROBOGUIDE umožňuje na základě vstupních dat vygenerovat jednotlivé trajektorie. Jelikož u tohoto robota FANUC M-20iA je fyzicky použit jako pracovní nástroj lihový FIX, jevila se nám jako nejrozumnější možnost ta, která by realizovala nakreslení např. konkrétního obrázku, nápisu či loga. Tato varianta vyžaduje ke své demonstraci vysokou přesnost a funkčnost programu.

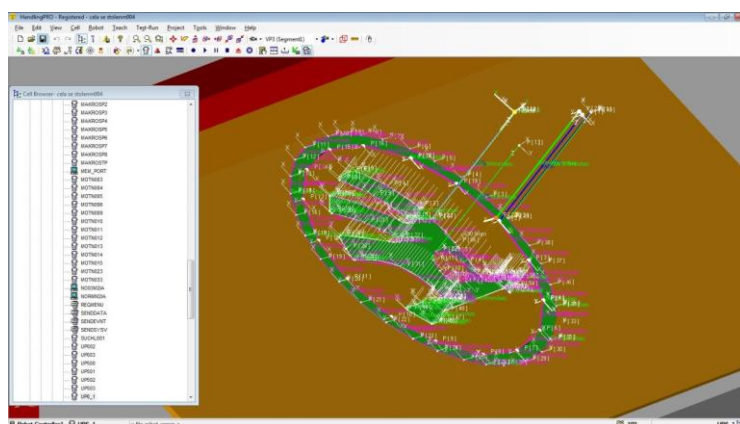
Jak již bylo řečeno, byly zde poměrně vysoké nároky na přesnost, tím pádem bylo i nutné následné korekce programu, jelikož software ROBOGUIDE neuvažuje při simulaci pozice jednotlivých přívodních kabelů, hadiček se vzduchem atd. Což by znamenalo za normálních okolností jejich poškození. Na základě tohoto faktu bylo třeba vytvořit „přiletové“ a „odletové“ body, ze kterých robot začíná práci na obrobku a ve kterých robot na obrobku končí, aniž by se zbytečně přetáčel.

Postup byl takový, že byl použit CAD software zvaný FREECAD, ve kterém bylo z poskytnuté 2D předlohy navrženo logo jako 3D objekt ve formátu IGES (obr.5:). Tento objekt byl naimportován do prostředí ROBOGUIDE (obr.6:) a následně umístěn na výrobní desku. Na základě možnosti generování trajektorie pomocí hran objektu bylo vytvořeno několik bodů, které se uložily jako nositelé souřadnic do programu. Na základě těchto jednotlivých bodů software vygeneroval po potvrzení program, který splňoval základní pohybové přejezdy mezi těmito body. Tento program bylo nutné modifikovat, aby nedošlo ke kolizním stavům.

Na základě přesného odladění a adjustace, bylo možné ověřit toto chování i na reálném robotu. Jediné co bylo zapotřebí, bylo přenesení, nahrání a spuštění vytvořeného programu, který se choval stejně jako v prostředí ROBOGUIDE.



obr.5: Návrh loga v softwaru FreeCad



obr.6: Naimportované ŠKODA logo v prostředí ROBOGUIDE

Tato práce má veliký přínos pro většinu větších firem, kde se výroba často různě modifikuje a mění. Díky OFF-LINE programování máme vše velice přehledně pod kontrolou a jsme schopni poměrně efektivně ladit technologii. Nejdůležitějším faktem zůstává, že jsme schopni velice pružně a rychle změnit výrobní trajektorii, což u ON-LINE programování znamená velice pracné vytvoření celého programu znovu, tím pádem velkou časovou náročnost na vytvoření, na základě velkého množství nepřesností, kterou s sebou ON-LINE programování nese. U OFF-LINE programování pouze nahrajeme do vytvořeného modelu pracovní cely v ROBOGUIDE příslušný CAD soubor obrobku ve formátu IGES a vygenerujeme základní trajektorie.

2. Závěr

Díky poskytnuté podpoře firmy ŠKODA AUTO ve formě skutečného robota firmy FANUC a vývojového prostředí ROBOGUIDE téže firmy, jsem měl možnost osvojit si základy programování a obsluhy průmyslového robota výše zmíněného výrobce.

Díky tomu se podařilo digitalizovat robotickou laboratoř s reálnými roboty v profesionálním prostředí ROBOGUIDE, jehož obsluhu jsem si v rámci této diplomové práce též osvojil.

Výsledky této digitalizace budou použity nejen pro tuto diplomovou práci, ale i pro výuku a prezentaci robotických laboratoří zde ve firmě ŠKODA AUTO. Plánuje se též využití těchto výsledků pro budoucí projekty v rámci těchto laboratoří.

Při realizaci bylo třeba zohlednit několik zásadních faktů, které se na první pohled zdály být triviální. V první řadě se jednalo o formát importovaného CAD výkresu do prostředí ROBOGUIDE. Po konečných úpravách CAD výkresu se jevil jako jediný kompatibilní formát IGES. Ostatní formáty bylo sice možné naimportovat, ovšem nebylo možné s těmito formáty plnohodnotně pracovat.

Dalším úskalím v cestě bylo určení směru nástroje. Škodoväcký STANDARD MQB uvažuje jiný defaultní směr TCP než prostředí ROBOGUIDE. Na základě správného ověření bylo nutné zajistit správný směr nástroje, aby adjustáž byla provedena bez jakýchkoliv komplikací.

Při adjustaci modelu bylo nutné dbát zvýšené ostražitosti při ladění programu na reálném robotu. Prostředí ROBOGUIDE v simulaci nezohledňuje hraniční pozice přívodních kabelů,

tlakových hadiček se vzduchem atd., což by při zanedbání za normálních okolností vedlo k jejich zničení. Robot je v základním režimu vyzván „pouze“ k tomu, aby vykonal vytvořený program, ovšem některé přechody mezi jednotlivými pozicemi automaticky přepočítává, tím pádem se zde objevuje nežádoucí přetáčení těchto jednotlivých os.

Řešení této situace bylo takové, že se „kreslený“ objekt rozdělil do více dílčích částí, které jsou volány pomocí jednotlivých podprogramů. U každého podprogramu bylo třeba nadefinovat základní výchozí bod, aby nedocházelo k automatickému přepočítávání jednotlivých souřadnic.

Zadání této práce se podařilo naplnit a rozhodně skýtá potenciál pro další rozvoj a studium.

Literatura

- [1] *Oficiální stránky výrobce FANUC*[ON-LINE].[cit. 2015-01-28]. Dostupné z: http://www.FANUCrobotics.cz/cs/products/a_industrial-robots/M-20iA/
- [2] *Oficiální stránky výrobce FANUC*[ON-LINE].[cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.FANUC.com/>
- [3] *MAINTENANCE MANUAL, FANUC - M-20iA*, 2010. 131 s.
- [4] *FANUC - ROBOGUIDE*, 2008. 48 s.
- [5] *Oficiální web výrobce robotů FANUC*[ON-LINE].[cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://www.FANUCrobotics.cz/cs/products/software/simulation%20and%20development/ROBOGUIDE/>
- [6] SCHMID, D. a kol. *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku. 1. vyd.* Praha, 1998. 420 s. ISBN 80-86706-10-9.
- [7] PIRES, J. N. *Industrial Robots Programming: Building Applications for the Factories of the Future.* Springer, 2007. 282 s. ISBN 978-0-387-23325-3.
- [8] Kelemen, M.: *Komponenty a moduly mechatronických systémů*, Košice, 2004. 119 s. ISBN 80-8073-212-4.
- [9] V. Špicar, *Řídicí systém FANUC - R-30iA (MQB) - PROGRAMOVÁNÍ*, 2013. ZA - ŠKODA Akademie Mladá Boleslav. 65 s.
- [10] Jelínek, M.: *Digitalizace školícího robotického pracoviště Škoda Auto*, 2015, TUL Liberec, 32 s.
- [11] MALÝ, M.: *3D VIZUALIZACE VYBRANÉHO ZASTAVĚNÉHO AREÁLU*, 2009, Brno, 65 s.

VZDUCHOVÉ TLUMENÍ PRUŽÍČÍHO PODSTAVCE SEDADLA ŘIDIČE

Kohl Ondřej

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 4. ročník

Doktorský studijní program – KONSTRUKCE STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

Abstrakt: Projekt, kterým se zabývám, představuje podstavec sedadla řidiče s pneumatickým tlumením. Tento systém zcela nahrazuje viskózní tlumič přídavným objemem vzduchu, úpravou konstrukce nůžkového mechanismu a vhodným zapojením pneumatického obvodu. Výsledkem je koncept pneumaticko-mechanické soustavy, kterou lze v průběhu provozu pneumatickými prvky naladit do několika režimů. Variabilita nastavení může být velmi široká. V současnosti se z hlediska jednoduchosti a ekonomičnosti uvažuje manuální přepínání režimů vibroizolace podstavce řidičem (obsluhou zařízení). Výhledově lze podstavec dovybavit elektronikou (zejména snímači výchylky a zrychlení), která by podstavec naladila na správnou hodnotu automaticky. Přednostně se od systému očekává minimální nutnost změny nastavení parametrů tuhosti a tlumení.

Klíčová slova: vzduch, tlumení, tuhost, sedadlo

1 Úvod

Nároky na vývoj a konstrukční řešení sedadla řidiče stavebního stroje, autobusu, nákladního vozidla apod. jsou tak specifické, že se jeho vývojem zabývají specializované firmy a většina výrobců uvedených strojů a vozidel je nakupuje. V tomto okamžiku nastává problém. Každý stroj nebo vozidlo má odlišně nastavený podvozek z čehož vyplývá, že sedadlo, které se v jednom zařízení osvědčilo, nemusí v druhém splňovat správnou funkci vibroizolace. Velmi často se vyskytují takové případy, kdy stroj během pracovní doby změní povrch vozovky, nebo podkladu, po kterém se pohybuje na takovou dobu, po kterou je nastavení sedadla řidiče nevhodné. Nastavení parametrů tuhosti a tlumení pro sedadlo nákladního vozidla, které se pohybuje až na výjimky na dálnicích nebo silnicích první třídy a vozidla, které se pohybuje po staveništi, by mělo být rozdílné. V současné době není nic neobvyklého zahlédnout na dálnici nákladní vozidlo převážející stavební suť, nebo zeminu. Bylo by vhodné mít adaptivní podstavec. Cena elektronicky řízeného adaptivního podstavce sedadla je značná.

2 Současný stav odpružení a tlumení sedadla řidiče

V současné době jsou sedadla řidiče odpružena pneumatickou pružinou a hydraulický teleskopický tlumič plní funkci tlumení (viz obr. 1).

Tento způsob je tradiční metodou tlumení výchylky. Hodnota tlumení lze obvykle v určitém rozmezí nastavit. Pro širší použití bez záměny tlumiče za tužší nebo měkčí jsou používány aktivní tlumiče fungující na různých fyzikálních principech své funkce. Aby fungoval aktivní tlumič správně, je jeho nastavení ovládáno řídicí jednotkou. Ta potřebuje pro správné nastavení nejméně jednu informaci o poloze vrchní části podstavce, tu zajistí snímač polohy. Byla vyjmenována řada zařízení, která zajišťují „automatickou“ funkci, ale zároveň zesložitují a prodražují podstavec sedadla řidiče.



lineární viskózní tlumič

Obrázek 1: Současné provedení odpružení a tlumení u moderních podstavců sedadel (John Deere Active Seat)

3 Návrh konstrukčního uspořádání

Vzduchové tlumení vykazuje pneumatický pružící systém tehdy, pokud stlačený vzduch prochází potrubím, které způsobuje tlakovou ztrátu mezi dvěma uzavřenými prostory se stlačeným vzduchem. Jeden z nich může představovat pneumatická pružina a druhý nádoba s konstantním objemem nebo pneumatická pružina s proměnným objemem.

3.1 Nahrazení konvenčního tlumiče vzduchovým tlumením

Řadou úspěšných aplikací je prokázáno, že použití pneumatických pružin k izolaci zdroje vibrací od okolí je dosud nejlepší možný způsob. V závislosti na budící frekvenci a vlastní frekvenci vibroizolace není v některých případech nutné použít tlumiče kmitů. Záleží také na tom, zda pohyb odizolovaného stroje nezpůsobuje komplikace například v návaznosti na výrobní řetězec. V případech, kdy je to nutné, se ve většině případů používají viskózní tlumiče kmitů.

Současné aplikace tlumení využívající principu přepouštění plynu:

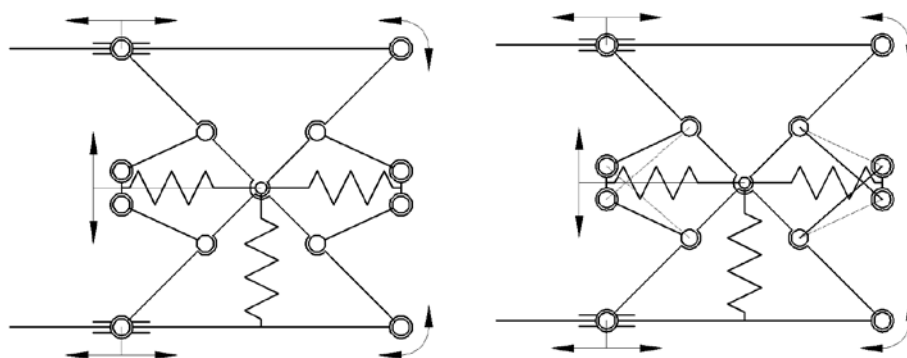
- Vzduchové tlumení koncových poloh pneumatických lineárních motorů
- Tlumiče nárazů nábytkového kování
- Plynové tlumiče podvozků vozidel

Vzhledem k tomu, že již je podstavec sedadla vybaven zdrojem stlačeného vzduchu, kterým je zajištěno nastavení jeho požadované statické výšky, je splněna základní podmínka úspěchu tohoto konceptu. Oproti viskóznímu tlumiči je v celém systému pouze stlačený vzduch. Toto médium s sebou do systému vnáší vlastnost, která, jak by se mohlo zdát, bude přinášet komplikace. Jde o stlačitelnost. Aby bylo možné využít stlačeného vzduchu k tlumení vibrací, musí být splněno:

- Proměnlivý přídavný objem musí být do mechanismu připojen tak, aby po celou pracovní výšku podstavce působila jeho výsledná síla proti síle nosné pružiny
- zároveň musí být výsledná síla proměnlivého přídavného objemu řádově nižší než síla nosné pružiny
- nosná pružina a tlumící pružiny musí být propojeny pneumatickým obvodem, ve kterém bude umístěn škrťací prvek

3.2 Vodící mechanismus

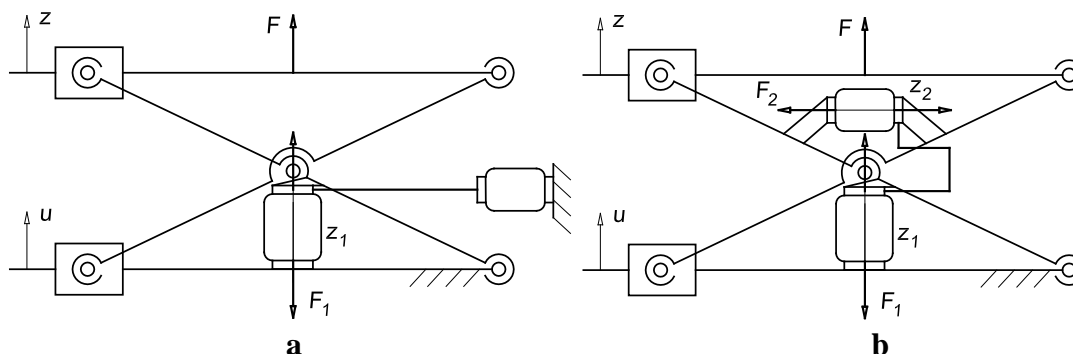
Uchycení tlumících pružin je zajištěno vodícím mechanismem, který v závislosti na zdvihu nosné pružiny mění objem tlumících pružin. Tento vodící mechanismus je v podstavci umístěn dvakrát pro každou tlumící pružinu. Mechanismy jsou symetricky umístěné oproti nosné pružině (viz obr. 2). Uchycení mechanismu do současného vodícího mechanismu podstavce sedadla je provedeno tak, že je zajištěn pohyb zaručující změnu objemu tlumících pružin, ale výsledná síla těchto pružin působí co nejméně proti síle nosné pružiny.



Obrázek 2: Zakomponování vodícího mechanismu proměnlivého přídavného objemu do současného vodícího mechanismu podstavce sedadla (vlevo funkční schéma, vpravo skutečné schéma)

Na obr. 2 vlevo je zobrazen funkční mechanismus a vpravo skutečný mechanismus, kde je jeden pár ramen vodícího mechanismu překřížen. Tato úprava zajišťuje kvazilineární vedení tlumících pružin. Naklápění opěrné desky pružiny je vzhledem k funkci pružiny zanedbatelné.

Pneumatické pružiny jsou obecně popsány pomocí geometrických charakteristik, které jsou efektivní plocha a objem v závislosti na zdvihu pružiny. Na základě zatížení a převodu vodícího mechanismu sedadla řidiče, počátečního tlaku vzduchu ve vzduchové pružině a připojeného přídavného objemu (viz Obr. 3a) nebo pneumatické pružiny (viz Obr. 3b) lze určit závislost síly $F_1(z_1)$ a případně $F_2(z_2)$ [1, 2].



Obrázek 3: Konstrukční konfigurace systému vzduchového tlumení:
a – konstantní přídavný objem; **b** – proměnlivý přídavný objem

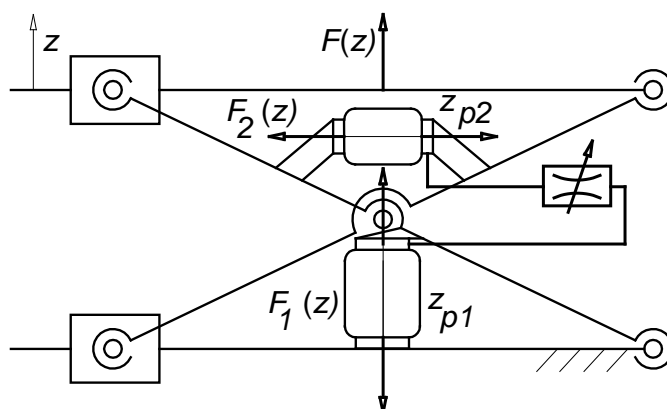
Z těchto závislostí vyplývají vlastnosti podstavce sedadla. Jedná se tuhost a tlumení podstavce. Princip pneumatického tlumení je tedy ovlivněn velikostmi sil na nosné a přídavné pružině.

4 Mechanický model pružícího podstavce se vzduchovým tlumením

Systém je tvořen složeným vodícím mechanismem, který je tvořen nůžkovým vodícím mechanismem sedadla a dvěma totožnými vodícími mechanismy, které zajišťují pohyb tlumících pružin. Nosná pneumatická pružina je propojena soustavou pneumatických prvků a potrubí s dvěma tlumícími pružinami, které jsou upevněny v uvedených vodících mechanismech.

4.1 Pohybová rovnice

Hodnota optimální světlosti škrtkové dýzy v pneumatickém obvodu vychází ze stavových rovnic pneumaticko-mechanické soustavy.



Obrázek 4: Schéma pneumaticko – mechanického systému

Zadanými parametry jsou geometrické charakteristiky obou pneumatických pružin (nosné a tlumící, pár tlumících pružin představují dvě totožné pružiny). Jedná se o polynomické funkce efektivních ploch $S_1(z_{p1})$ a $S_2(z_{p2})$ a objemů $V_1(z_{p1})$ a $V_2(z_{p2})$.

Pomocí těchto parametrů lze vyjádřit síly pružin

$$F_1(z_{p1}, p_{p1}) = S_1(z_{p1}) \cdot p_{p1}, \quad F_2(z_{p2}, p_{p2}) = S_2(z_{p2}) \cdot p_{p2}. \quad (1)$$

Pohybová rovnice mechanismu podstavce s redukovanou hmotností (obsahuje část mechanismu, sedačky a pasažéra) je

$$m \frac{d^2}{dt^2}(z(t) + u(t)) + b \frac{d}{dt}(z(t) - u(t)) = -mg + F, \quad (2)$$

[3, 4]

kde $z(t)$ je absolutní posunutí podstavce, $u(t)$ je posunutí základny vlivem kinematického buzení, b je konstrukční (celkové) tlumení mechanismu, jehož hodnotu lze získat experimentálním měřením, mg je statické zatížení mechanismu. Funkce F je výsledná síla pružin

$$F = i_{p1}(z) \cdot F_1(z_{p1}, p_{p1}) + i_{p2}(z) \cdot F_2(z_{p2}, p_{p2}), \quad (3)$$

získaná z převodových funkcí $i_{p1}(z)$ a $i_{p2}(z)$

$$i_{p1}(z) = \frac{z_{p1}(z)}{z}, \quad i_{p2}(z) = \frac{z_{p2}(z)}{z}. \quad (4)$$

[5]

Tlak vzduchu uvnitř pneumatických pružin se řídí podle stavové rovnice ideálního plynu

$$p_{p1} = \frac{m_{a1} r T}{V_1(z_{p1})}, \quad p_{p2} = \frac{m_{a2} r T}{V_2(z_{p2})}, \quad (5)$$

kde m_{a1} a m_{a2} jsou hmotnosti vzduchu uzavřeného uvnitř pružin. r je specifická plynová konstanta a T teplota vzduchu.

Výměna vzduchu mezi pružinami je popsána isoentropickým prouděním vzduchu škrťicím ventilem. V následujících dvou rovnicích závisí rychlost výměny vzduchu na tlacích p_A a p_B , kde tlak p_A představuje vyšší z tlaků p_{p1} a p_{p2} v daném čase, p_B je ten druhý. Podle toho, který ze dvou tlaků je větší, je určen směr průtoku. Rychlost průtoku je pak dána

$$\frac{dm_{a1(a2)}}{dt} = A_v c p_A \sqrt{\frac{2}{rT} \frac{\kappa}{\kappa-1} \left(\left(\frac{p_B}{p_A} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_B}{p_A} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right)}, \quad (6)$$

pro podkritické podmínky proudění, kdy $p_B / p_A \geq \beta^*$ nebo

$$\frac{dm_{a1(a2)}}{dt} = A_v c p_A \sqrt{\frac{2}{rT} \frac{\kappa}{\kappa+1} \left(\frac{p_B}{p_A} \right)^{\frac{2}{\kappa-1}}}, \quad (7)$$

opačně. Poměr kritického tlaku β^* je

$$\beta^* = \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{2}{\kappa-1}}. \quad (8)$$

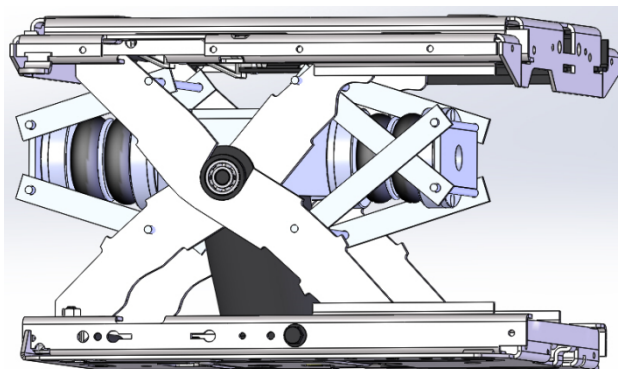
Diferenciální rovnice (6) doplněná o diferenciální rovnici množství hmoty vzduchu uvnitř pružin zcela popisuje představovaný pneumaticko-mechanický systém. Předpokládáme uzavřený pneumatický systém, hmotnostní průtoky vzduchu jsou tedy vázány podmínkou

$$m_{a1} + m_{a2} = m_a. \quad (9)$$

[1, 2]

5 Návrh řešení vzduchového tlumení sedadla a konstrukční uspořádání

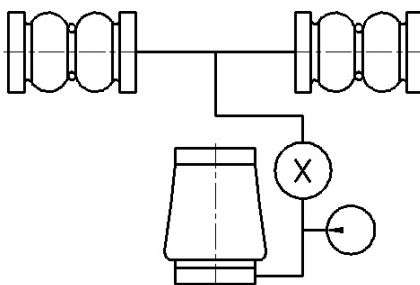
Jak je uvedeno výše, do sériově vyráběného podstavce sedadla řidiče je zakomponován mechanismus, který zajišťuje změnu kapacity přidavného objemu.



Obrázek 5: Sériově vyráběný podstavec pneumaticky odpruženého sedadla řidiče firmy Grammer AG, doplněný o systém vzduchového tlumení TUL

V prototypu, který byl zhotoven na půdě TUL (viz Obr. 5), jsou umístěny dvě pneumatické pružiny, které představují proměnlivý přidavný objem (dále nazývané tlumící pružiny). Nastavení pružících a tlumících parametrů lze pneumatickým obvodem bez přítomnosti tlumiče kmitů nastavit změnou průtoku stlačeného vzduchu mezi nosnou pružinou a tlumícími pružinami. Konstrukcí mechanismu a zapojením pneumatického obvodu (viz Obr. 6) se jedná o nucený průtok vzduchu. Úpravou průtoku mezi dvěma prostory dochází ke vzniku tlakové ztráty. Tlakové ztráty lze rozdělit do dvou skupin podle vzniku:

- Ztráty třením
- Ztráty místními odpory



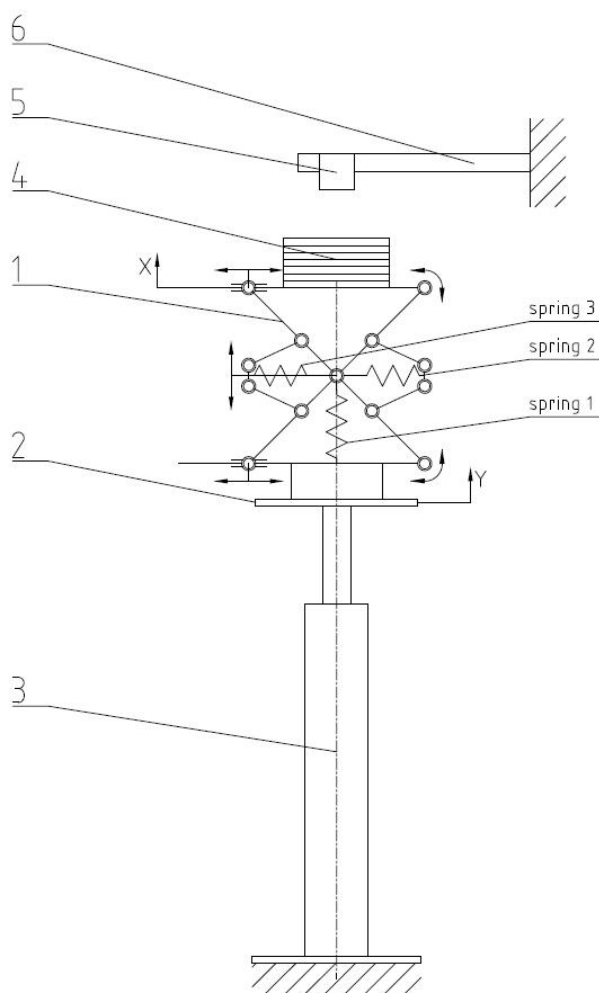
Obrázek 6: Pneumatický obvod propojení nosné pružiny a tlumících pružin, je znázorněn přívod stlačeného vzduchu, místem „X“ je označen prvek, který ovlivňuje průtok mezi nosnou pružinou a tlumícími pružinami

Dosud běžně vyráběné podstavce jsou nastavené na určité frekvenční spektrum, ve kterém plní správnou vibroizolační funkci. Pokud se podstavec během provozu dostane mimo oblast, pro kterou je naladěný, může se ocitnout v oblasti rezonance. V tomto režimu je význam podstavce negativní.

Kvalifikace nastavení pružících a tlumících parametrů se provádí pomocí amplitudové frekvenční charakteristiky. Vzhledem ke konstrukci mechanismu a umístění pružin není jednoduché jednoznačně určit tuhost k [Nm⁻¹] a součinitel tlumení b [Nm⁻¹s].

6 Identifikace pružících a tlumících vlastností na prototypu sedadla

Měření bylo zajištěno v laboratoři aplikované mechaniky na půdě Technické univerzity v Liberci. Prototyp sedačky viz obr. 7 je pomocí kotvící desky připojen k řízenému lineárnímu hydraulickému motoru s integrovaným snímačem polohy. Na podstavci je připevněno závaží, které nahrazuje hmotnost sedačky a řidiče. Výchylka podstavce je snímána laserovým snímačem.



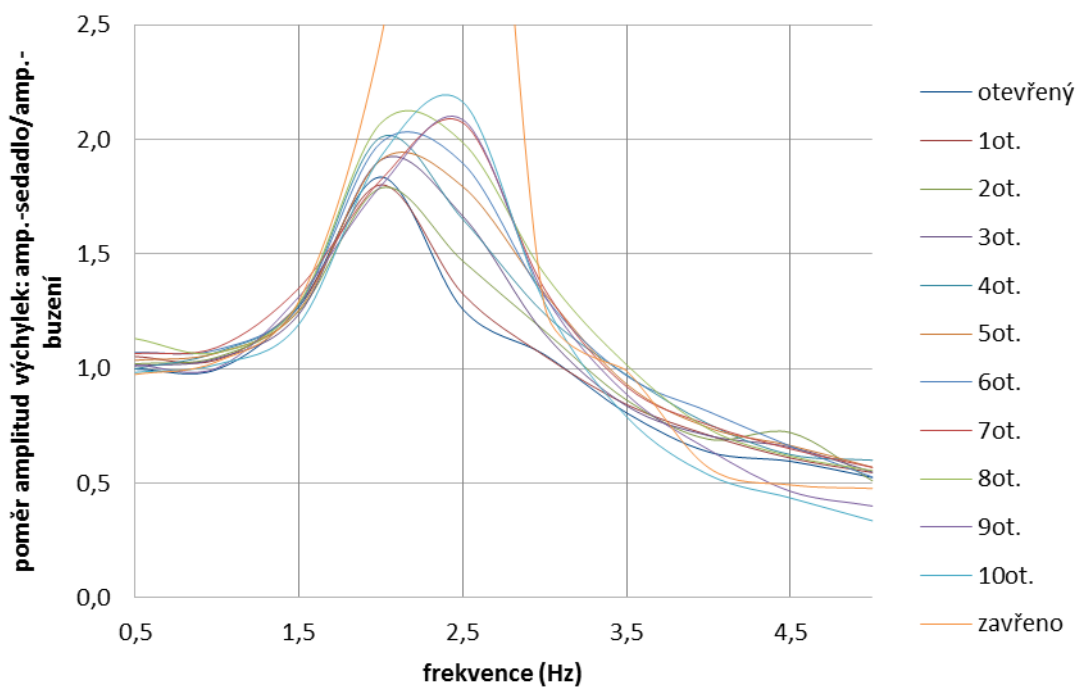
Obrázek 7: Schéma experimentu

(1- Testovaný podstavec sedadla, 2- Upevňovací deska, 3- řízený lineární hydromotor s integrovaným snímačem polohy (INOVA), 4- závaží, 5- laserový snímač polohy (Balluf), 6 - konzola, Spring 1 – nosná pružina Continental 818 ZA, Spring 2 a spring 3 – tlumící pružiny Dunlop 2 3/4" x3)

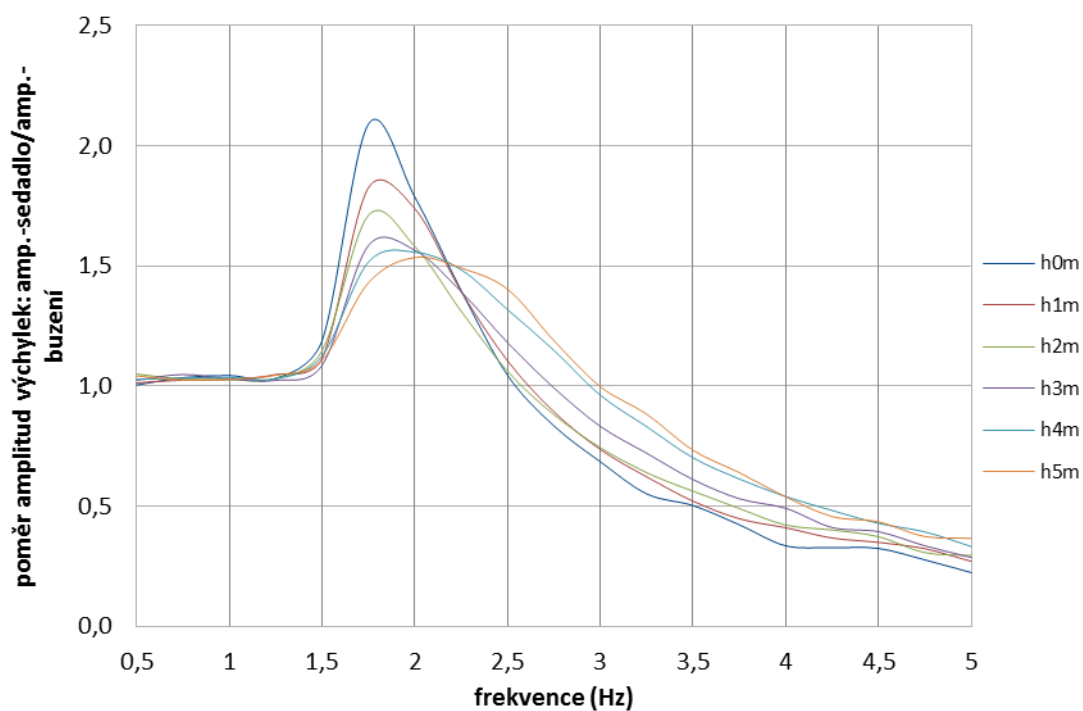
Experimenty probíhaly za stejných podmínek. Kinematické buzení má sinusový průběh. Amplituda výchylky je +/- 10 mm, frekvence od 1 Hz do 5 Hz, krok 0,25 Hz. Závaží představuje hmotnost 70 kg. Vlhkost a teplota vzduchu průběh měření zásadně neovlivňují. Dosud nebyla řešena úprava pro extrémní klimatické podmínky. Předpokládá se provoz v prostředí, kde bude člověk. Léty používání je vyzkoušeno, že použité prvky budou správně plnit svou funkci po celou dobu životnosti podstavce.

Byla provedena série měření s různým škrtícím prvkem, u kterého bylo v některých případech možné upravit intenzitu škrcení. U některých měření byl do pneumatického obvodu připojen přídatný objem. Všechna měření byla následně zpracována v programu MS Excel 2010 a byly tak získány přenosové charakteristiky (viz obr. 8 a 9). [5, 6, 7].

Ze zpracovaných přenosových charakteristik je zřejmá důležitost a také citlivost nastavení správného škrcení [8, 9, 10].



Obrázek 8: Přenosové charakteristiky pro běžný škrťací ventil (polohy ventilu jsou ovládány šroubem)



Obrázek 9: Přenosové charakteristiky pro různé délky propojovacích hadic (od 0 do 5m)

7 Závěr

Současným trendem je všeobecné zlevnění výroby a zjednodušení výrobních procesů. Platí to i u sedadel řidiče nákladních a jiných vozidel při zachování pohodlí, ergonomie, dodržení norem a bezpečnosti. Řešení podstavce sedadla řidiče s integrovaným vzduchovým tlumením s absencí viskózního tlumiče je výhledově velmi efektivní. Současná konstrukce se vřazením přídatných pružin je prostorově silně omezená, nicméně pro funkci tlumení využívá médium, které je v každém sedadle řidiče nejen nákladního vozidla, tím je stlačený vzduch. Vzhledem k dlouhodobě zakořeněnému gumárenskému průmyslu v České republice předpokládám, že nebude problém zajistit výrobu pneumatické pružiny, ve které bude současně integrováno několik oddělených prostorů.

Z výsledků počítačové analýzy, ale i z měření v laboratoři aplikované mechaniky na půdě Technické univerzity v Liberci, je zřejmé, že cesta vzduchového tlumení povede ke konstrukci podstavce, který nebude muset být vůbec, nebo pouze v krajních případech, obsluhou nebo drahými řídicími systémy přestavován do optimálního pracovního režimu.

Literatura

- [1] Pešík, L., Skarolek, A.: Tuning of Vibration Isolation Differential Pneumatic System by Means of Trottle Valve. In *Transactions of the Universities of Košice: Research reports from the Universities of Košice*. 2nd edition. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2011. s. 191-196. ISSN 1335-2334.
- [2] Pešík, L., Skarolek, A.: Heat Transfer Effects on Vibration Isolation Differential Pneumatic System. In *Transactions of the Universities of Košice: Research reports from the Universities of Košice*. 3rd edition. Košice :Technická univerzita v Košiciach, 2012. s. 109-114. ISSN 1335-2334.
- [3] Dresig, H.; Holyweißig, F.: *Maschinendynamik*. 8. Auflage.SpringerVerlag. Berlin, 2008.
- [4] V. Zeman, Z. Hlaváč: Kmitání mechanických soustav. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN: 978-80-7043-337-9.
- [5] Chytrý J., Hemzal, K. a kol.: Větrání a klimatizace., Technický průvodce č. 31, Praha: Bolit Brno, 1993
- [6] Idelchik I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance - 3. vydání, Betelu House Inc., 1993
- [7] Uhlir, R., P. Mossoczy and P. Maly: Experimental Testing of Agricultural Trailer.In: Book of Proceedings of 54th International Conference of Machine Departments. Liberec: Technical University of Liberec, 2013. pp. 353-358. ISBN: 978-80-7372-986-8.
- [8] Whitehouse, D. J. Handbook of surface and nanometrology. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2011. ISBN 978-1-4200-8201-2.
- [9] Girfhar, Y, XU A., Dey B. B., MeghjaniM., ShkurtiF., RekleitisI., Dudek G. M.: Marine Autonomous Robotic Explorer. In: Mobile Robotics Lab [online]. McGill University, 2011.
- [10] Mansouri, Majdi, IlhamQ.,SnoussiH., Richard C.. Adaptive quantized target tracking in wireless sensors networks. *Wireless Networks*, Vol. 17, No. 7, pp. 1625-1639. ISSN: 1022-0038.

LINKA PRO ZVÝŠNENÍ PRODUKCE SPECIFICKÉ NANOVLÁKENNÉ VRSTVY

Kovář Radovan

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 4. ročník

Doktorský studijní program – KONSTRUKCE STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

Abstrakt: V současnosti je kladen důraz na výrobu anorganických nanovláken se zvýšením možností jejich využití. Obecně lze tvrdit, že nanovláknový materiál má lepší vlastnosti v porovnání s konvenčními materiály. V souvislosti s tím jsou hojně využívána nanovláknová oxidu titanu, která jsou charakteristická svou krystalickou strukturou. Ta je tvořena formami rutil a anatas, jejichž poměr ji předurčuje pro konkrétní využití. Zatímco dříve byl kladen důraz na formu rutil, v současné době se dostává do popředí anatas. Materiály s takovou strukturou se používají v oblasti fotokatalytiky a fotovoltaiky. Pro výrobu nanovláknové struktury s vyšším obsahem anatasu byla zkonstruována výrobní linka. Výroba takové nanovláknové struktury se provádí principem elektrostatického zvlákňování s následnou kalcinací precursoru. Účinnost produkce je závislá na chování elektrického pole, které je využíváno během procesu zvlákňování. Cíleným ovlivněním bylo dosaženo vyšší produkce nanovláknové struktury, která byla následně vypálena v průběžném kalcinačním systému. Výsledný produkt byl podroben testům na přítomnost požadovaných forem oxidu titanu.

Klíčová slova: electrospinning, zvýšení účinnosti, nanovláknová, anatas, výrobní linka

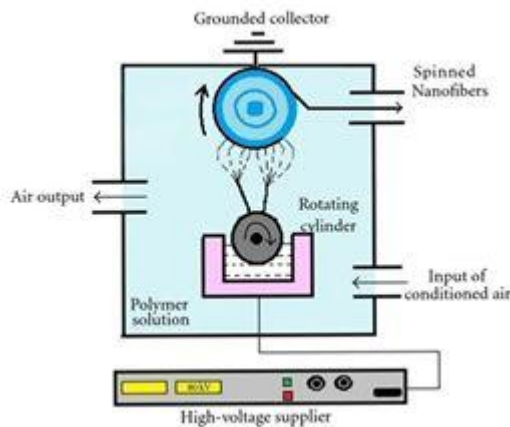
1 Úvod

Anorganická nanovláknová nabízí využití v mnoha průmyslových oborech a aplikacích. V porovnání s ostatními, v současné době využívanými materiály, umožňuje aplikace anorganických nanovláken v produktech zvýšení jejich funkčnosti, výkonnosti a celkové zvýšení přidané hodnoty těchto produktů, což v blízké budoucnosti způsobí revoluci v jejich využití. Mezi nejvýznamnější vlastnosti anorganických nanovláken patří velký měrný povrch v porovnání k objemu (až stovky m² v jednom gramu materiálu), velmi vysoká porozita a prodyšnost, dále chemické a mechanické vlastnosti, díky kterým je možné anorganická nanovláknová dále upravovat pro využití v celé řadě průmyslových aplikací. Nejvyšší produktivitu výroby nanovláknové struktury vykazuje princip elektrostatického zvlákňování z volné hladiny za použití válečku [1-2]. Do provozu se dostal ve spojitosti se zařízením, ve kterém je prováděn. Tento přístroj je nazýván NanospiderTM. Funkčnost procesu elektrostatického zvlákňování je však závislá na mnoha parametrech, které ovlivňují elektrostatické pole v okolí zvlákňovací elektrody a kolektoru. Je zde vliv použitého polymeru, hodnota přivedeného napětí do prostoru zvlákňování, materiál zvlákňovací elektrody, materiál a konstrukce kolektoru, vzdálenost kolektoru od zvlákňovací elektrody, teplota a vlhkost prostředí, velikost boxu kde zvlákňování probíhá, překážky v prostoru boxu. Některé dříve zmíněné parametry ovlivňují elektrostatické pole v okolí zvlákňovací elektrody a kolektoru. Numerickou simulací lze pro toto pole zjistit rozložení el. potenciálu a hodnoty intenzity. Úpravou prvků mající vliv na elektrostatické pole lze docílit vysokých hodnot intenzity, což má za následek zvýšení účinnosti zvlákňování. Ke zvýšení produkce vláken přispívá také fakt, že tvar kolektoru musí splňovat funkci nepřetržitého procesu výroby. Jeho součástí musí být tedy i mechanismus, který dokáže strhnout vrstvu vláken z kolektoru. Odtahovým systémem jsou vlákna odvedena z prostoru experimentálního labu mimo

zvlákňovací komoru. Konečnou úpravou zvlákňované vrstvy je proces kalcinace, čímž se oddělí organické složky a získáme finální produkt [3].

2 Výrobní linka

Linky pro výrobu anorganických nanovláken se skládají z několika částí, jejich počet závisí na zvlákňovaném roztoku. V tomto případě je zvlákňovaným roztokem oxid titanu PVP(TiO_2). Pro tento druh anorganických nanovláken je třeba využít v první části linky technologii vhodnou pro výrobu nanovláknenné vrstvy. Po dokončení zvlákňování je třeba materiál transportovat do kalcinační jednotky. Ta tvoří druhou část linky, kde dojde k vypálení organických složek a na výstupu z linky získáme čistá vlákna oxidu titanu v krystalické struktuře. První část linky je založena na využití technologie Nanospider, která používá zvlákňování z volné hladiny válečku. Uvnitř zařízení se nachází prázdný prostor, ve kterém probíhá proces zvlákňování. Nevodivá konstrukce je osazena dvěma vysokonapěťovými zdroji, které dodávají napětí o velikosti až 100 kV do prostoru zvlákňování. Uprostřed komory je umístěn zásobník polymer (dále jen vana), do které je nalit roztok polymeru. Ve vaně se otáčí zvlákňovací elektroda, která je částí svého objemu ponořena do polymeru. Ta má nejčastěji tvar plného válce[6]. Použití těchto elektrod je vázáno na zvlákňovaný typ polymeru. Rotací elektrody je polymerní roztok přiváděn po její ploše do prostoru, kde působí elektrostatické pole. Působením elektrostatických sil na povrch zvlákňovací elektrody se z polymerní vrstvy začnou vytvářet Taylorovi kužely. Z jejich vrcholů je uvolňován tenký proud polymerního roztoku, který je přitahován ke kolektoru. Ten je umístěn nad zvlákňovací elektrodou v definované vzdálenosti. Postupným odpařováním částí proudu a jeho následným štěpením získáme na kolektoru vrstvu nanovláknenné struktury. Schéma principu funkce Nanospideru je znázorněn na obr. 1.

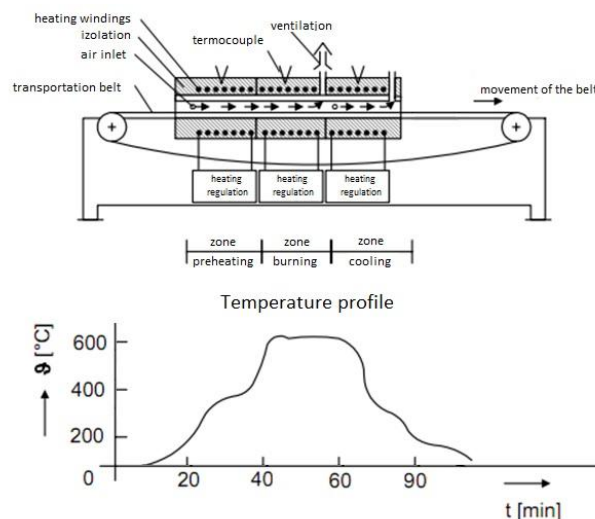


Obrázek 1: Schéma procesu electrospinning

Pro podmínku nepřetržitého provozu a zvýšení účinnosti zvlákňování bylo třeba vyvinout speciální kolektor. Pro něj je hlavní podmínkou, aby plocha pro zvláknění byla neustále čistá, jinak nedojde k vytvoření požadované nanovláknenné vrstvy. Z dřívějších experimentů vyplývá, že se zvyšující hustotou položených vláken na kolektoru se snižuje jejich vytváření na zvlákňovací elektrodě. Pro nepřetržitý proces je stěžejní podmínkou zachování minimální účinnosti zvlákňování během jeho trvání. V ideálním případě by měla vlákna dopadat neustále na čistý povrch kolektoru. Této podmínce vyhovuje nahrazení pevného plochého kolektoru rotačním prvkem. Rotační prvek má osu rovnoběžnou s osou rotace elektrody. Jeho otáčky jsou nižší, než otáčky elektrody. Během jedné otáčky je jedna jeho polovina povlákněna zatímco na jeho druhé straně dochází ke strhávání vláken z jeho povrchu. Při začátku druhé

otáčky se již do prostoru zvlákňování dostává opět čistá část povrchu elektrody. Problematikou však zůstává, jaký rotační prvek zvolit. Jeho povrch musí splňovat podmínku potřebnou pro proces zvlákňování a zároveň musí existovat způsob, jak vlákna z takového povrchu sejmut. Pro snímání je nejvhodnější hladký čistý povrch. Takový tvar je však nedostatečný pro vytvoření ideálního procesu zvlákňování. Vzhledem k tomu, že prioritní podmínkou je spuštění procesu elektrostatického zvlákňování, byl nahrazen hladký povrch povrchem tvarovým. Můžeme říci, že čím více tenkých bodů, tím více vláken se po dobu procesu vytvoří. Takové podmínky splňuje válcový rotační kartáč. Jedná se o rotační prvek, který má po rozdělení střední rovinou dvě identické části. Zároveň je zde mnoho samostatných bodů, které jsou tvořeny špičkami drátů kartáče. V jejich okolí tak roste intenzita elektrického pole a na Všechny dráty musí být uzemněny, aby mohly fungovat jako kolektor. Kartáč se otáčí rychlostí od 1 otáčky za 5 minut, až po rychlost 1 otáčky za 10 minut.

Pro zachování kontinuálního procesu je třeba nahromaděná vlákna z povrchu kartáče odstranit. Proto je nutné do systému následně integrovat strhávací zařízení s mechanickými, nebo vzduchovými prvky na opačnou stranu kartáče, než kde probíhá povlákňování. Vzhledem k vysokému napětí uvnitř komory stroje, nesmějí být použity v zařízení jakékoliv elektronické prvky. Strhaná vlákna jsou potom odváděna mimo prostor stroje. Druhou částí linky pro výrobu anorganických nanovláken musí být kalcinační systém. Během kalcinace dochází k separaci vláken od plastového nosiče, což je zajištěno jeho vypálením. Oxid titanu je nejstabilnější forma titanu v přírodě. Proto pro vypalování je nutné použít vysoké teploty okolo 600 °C, aby došlo k požadovanému vypálení nosiče. Kalcinační systém je vhodné zvolit ve formě průběžné pece. Zde dochází ve třech zónách k předehřevu vypalovaného materiálu, dále k jeho kalcinaci a následnému chladnutí. Posun materiálu skrz pec zajišťuje nekonečný průběžný pás, který koná přímočarý pohyb rychlostí cca 2 m/hod. Schéma průběžné pece s vyznačeným teplotním profilem je zobrazeno na obrázku č. 2.



Obrázek 2: Schéma průběžného kalcinačního systému s teplotním profilem

3 Optimalizace a experiment

Zvýšení účinnosti výroby nanovláken elektrostatickým zvlákňováním resp. zvýšení podílu nanovláken usměrněných z rotační elektrody je složitý komplexní problém. Ten závisí na aktuálním nastavení vzdálenosti elektrod, hodnotě napětí (používá se v rozmezí 50 - 100 kV), vlastnostech polymerního roztoku a dále na vlhkosti a teplotě okolního prostředí. Tyto parametry ovlivňují potenciál a intenzitu elektrostatického pole. Elektrostatické pole je pravděpodobně ovlivňováno dalšími parametry, které lze hledat v konstrukčním řešení vany. Vliv má především geometrické provedení konstrukce a použité konstrukční materiály. Velikosti změny pole v okolí vany je dána hodnotou relativní permittivity. Jedná se o podíl permittivity daného materiálu a permittivity vakua. Pro modelové simulace byly na základě permittivit vybrány tyto materiály: dřevo, sklo, plast, kov (povrchová úprava s TiBC). Zvolené materiály vynikají tvarovou stálostí a odolností vůči rozpoštědlům obsažených v polymerním roztoku.

3.1 Modelová simulace elektrostatického pole

Popsat rozložení potenciálu a intenzity elektrického pole v procesu elektrostatického zvlákňování je velmi složité a prakticky neměřitelné. Pro porovnání intenzity elektrostatického pole byly provedeny modelové simulace pro posouzení použití skleněné, dřevěné, kovové a plastové vaničky, čímž lze získat významné porovnávací hodnoty jak výsledná geometrie a relativní permittivita ovlivňuje výslednou intenzitu elektrostatického pole. Při sestavení modelu je použito stejné uspořádání se stejnými okrajovými a počátečními podmínkami pro všechny vany.

Intenzitu elektrického pole lze přibližně definovat podle [4] jako limitní sílu působící na jednotkový náboj podle rovnice 1.1.

$$\vec{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{q} \quad (1.1)$$

kde \vec{E} vyjadřuje intenzitu elektrického pole, \vec{F} je působící síla, q je jednotkový náboj.

Využitím intenzity elektrického pole \vec{E} můžeme stanovit elektrické napětí mezi 2 polohovými vektory r_1 a r_2 definované vztahem 1.2.

$$U = \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} dl = \varphi(r_1) - \varphi(r_2) \quad (1.2)$$

kde $\varphi(r_i)$ vyjadřuje potenciál elektrického pole. V látkovém prostředí (vnější okolí) definujeme vektor elektrické indukce \vec{D} popsany rovnicí 1.3.

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1.3)$$

kde ε_0 vyjadřuje permittivitu vakua ($\varepsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$), \vec{P} je elektrická polarizace popsaná vztahem 1.4.

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E} \quad (1.4)$$

kde χ vyjadřuje elektrickou susceptibilitu materiálu (pro vzduch $\chi = 0,00054$).

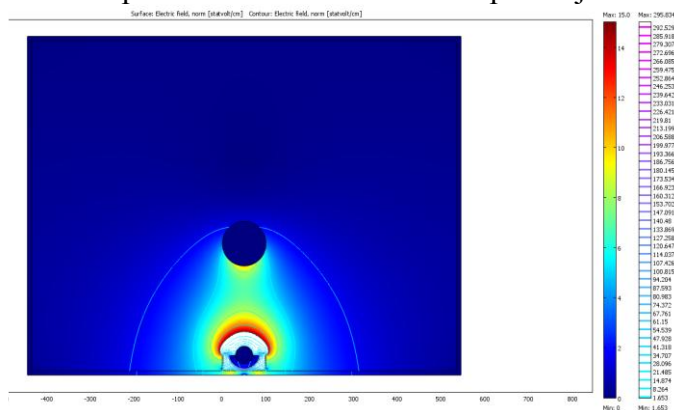
Podle rovnice 1.4 můžeme následně vyjádřit elektrickou indukci \vec{D} konstitutivní rovnicí 1.5.

$$\vec{D} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (1.5)$$

kde ε_r vyjadřuje relativní permitivitu materiálu ($\varepsilon_r = 1 + \chi$). Výsledný elektrostatický potenciál v místě j-tého náboje (1.12) lze potom vyjádřit z energie elektrostatického pole popsané rovnicí 1.6.

$$\varphi_j = \sum_j \frac{q_i}{4\pi\varepsilon_0 r_{ij}} \text{ resp. pro jeden náboj } \varphi = \frac{qq'}{4\pi\varepsilon_0 r} \quad (1.6)$$

Výsledky modelových simulací s parametry podle při vstupním napětí 60 KV na zvláknovací elektrodě zobrazily rozložení potenciálu elektrostatického pole u jednotlivých van.



Obrázek 3: Modelová simulace hodnot intenzity elektrostatického pole v okolí skleněné vany

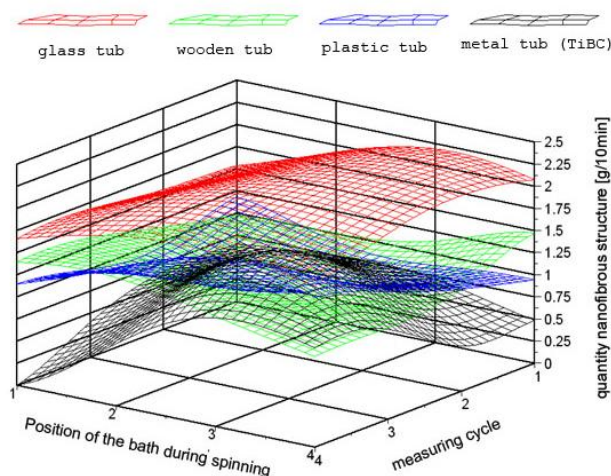
Rozložení potenciálu je u jednotlivých van podobné, ale není totožné. To potvrzuje, že konstrukční řešení ovlivňuje prostorové rozložení vstupního potenciálu. Hodnota potenciálu následně ovlivňuje intenzitu elektrostatického pole porovnávaných konstrukcí. Intenzita byla vyjádřena v jednotkách statvolt/cm (Pozn. 1 statvolt=299,8 volt).

Tabulka 1: Srovnání hodnot intenzit v okolí využívaných van.

Materiál vany	Hodnota intenzity v okolí [statvolt/cm]
Kovová vana	295,9
Plastová vana	320,2
Dřevěná vana	326,7
Skleněná vana	526,2

3.2 Experiment

Během testování bylo provedeno celkem 16 měření, 4 měření pro danou pozici a kartáčovým kolektorem. Po každém procesu zvláknování, které trvalo 10 min byla naměřena hodnota hmotnosti zvlákněné struktury pro danou vanu. Při porovnání výsledných hmotností z výsledných vláknenných nanostruktur, které vyprodukovaly vany (dřevěná, skleněná, kovová, dřevěná byla ze vany naměřeny maximální hodnoty v měřeních 1,47; 0,89; 1,45; 1,35 g.10min⁻¹ a ze skleněné vany naměřeny hodnoty 1,82; 2,19; 1,82; 2,08 g.10min⁻¹. Výkonové porovnání mezi jednotlivými vanami charakterizuje parametrický graf na obr. 16, kde je patrné, že nevyšší hodnoty naměřené hmotnosti nanovláknenné struktury byly získány ze skleněné vany, pak následovala dřevěná vana, plastová vana a kovová vana. Z grafu je zřejmé, že výsledky výkonů jednotlivých van korespondují s hodnotami intenzity elektrického pole provedené simulací.



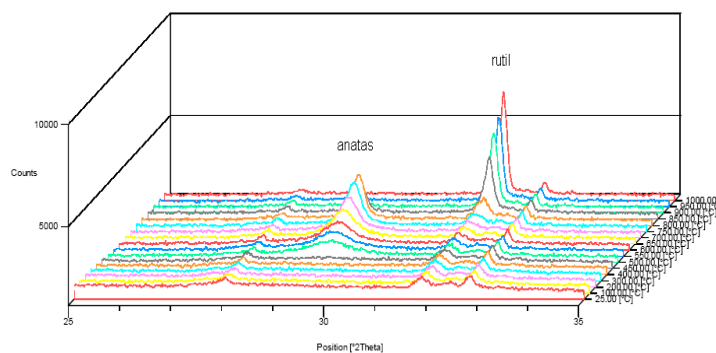
Obrázek 4: Výsledky experimentu zvlákňování na jednotlivých vanách

4 Kalcinace, výsledná struktura produktu

Minerály rutil a anatas jsou nejběžnější formy oxidu titaničitého. Zatímco rutil (jako pigment titanová běloba) se průmyslově vyrábí již mnoho let, materiály na bázi anatasu se díky mimořádným schopnostem této krystalové formy dostávají do popředí zájmu až v současnosti. Forma TiO_2 – anatas nabízí mnoho zajímavých vlastností, nejznámější jsou fotokatalytická aktivita a fotokatalyticky indukovaná superhydrofilita. Fotokatalytická aktivita umožňuje degradaci organických struktur (organických polutantů, mikroorganismů) na povrchu TiO_2 působením záření s vlnovou délkou pod 390 nm. Tento efekt předurčuje využití materiálů na bázi TiO_2 pro aplikace pro čištění vody, vzduchu, pro samočisticí a antibakteriální vrstvy.

4.1 Optimalizace kalcinace prekursoru TiO_2

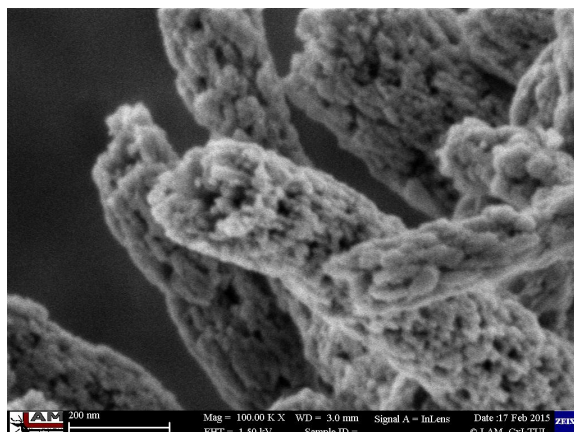
Byla provedena optimalizace kalcinace jako vliv růstu teploty, maximální teploty a doby výdrže na max. teplotě a složení atmosféry (vzduch, kyslík) na fázové složení výsledného TiO_2 . Pro hrubý nástřel maximální teploty byl použit vysokoteplotní RTG. Fázové složení kalcinovaných vzorků bylo sledováno metodou práškové RTG, množství zbytkového uhlíku metodou EDX. Na základě výsledků z vysokoteplotní RTG analýzy byla jako maximální teplota zvolena teplota 600°C (obr.5). Při žhání v kyslíku docházelo v rychlé oxidaci, zahoření vzorku a ke vzniku rutilové fáze. Jako optimální byla nalezena teplota ohřevu 1°C za min s prodlevou 120 min na teplotě 600°C .



Obrázek 5: Vysokoteplotní RTG prekursoru TiO_2

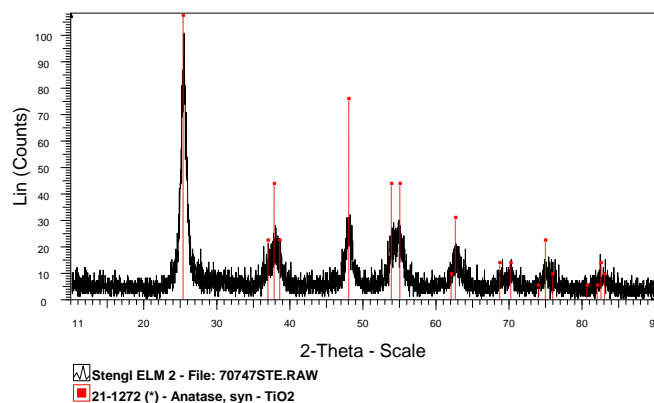
4.2 Fyzikální analýza kalcinovaného TiO₂ a měření fotoaktivity

Vzorek po kalcinaci byl rozemlet v perlovém mlýně s achátovými kuličkami z důvodu rozdužení shluků vláken a možnosti provedení analýzy fázového složení, měrného povrchu dle BET a měření fotoaktivity. Po rozdispergování vláken v mlýně byla prověřena nanovláknenná morfologie vzorku pomocí SEM (obr. 6). Bylo zjištěno, že nanovláknenná morfologie zůstala zachovaná, vlákna však v důsledku mletí byla kratší.



Obrázek 6: SEM snímek výsledné vypálené nanovláknenné struktury TiO₂

Fázové složení kalcinovaného prekursoru bylo potvrzeno metodou RTG práškové difrakce. Bylo zjištěno, že vzorek obsahoval čistou anatasovou fázi TiO₂ a velikostí primárních krystalitů 12 nm (obr. 7).



Obrázek 7: Difraktogram kalcinovaného prekursoru TiO₂ na teplotu 600°C po dobu 120 minut

Analýza měrného povrchu kalcinovaného prekursoru byla provedena adsorpcí-desorpcí dusíku při teplotě 77 K a velikost měrného povrchu byla vypočtena pomocí isotermy BET (obr. 3). Bylo zjištěno, že měrný povrch BET nanovláknenného TiO₂ se pohybuje v rozmezí hodnot 174 – 235 m²/g s velikostí pórů 1,5 nm. Měření fotoaktivity nanovláknenného TiO₂ bylo provedeno pomocí fotodegradace barviva Oranže II s UV-Vis fotometrickou indikací koncentrace barviva při vlnové délce 480 nm. Suspenze barviva s vláknenným TiO₂ byla čerpadlem proháňena fotoreaktorem (trubka s koaxiálně umístěnou UV zářivkou) a spektrofotometrem. Bylo použito tří druhů UV zářivek: s třemi vlnovými délkami 254 nm, 365 nm a 400 nm.

Výsledky fotokatalýzy byly srovnávány s komerčním nanopráškem P25 od fy Degussa. Výsledky fotoaktivity byly vyjádřeny pomocí kinetické konstanty degradace barviva (byla uvažována reakce 1. řádu). Bylo zjištěno, že nanovláknový TiO₂ vykazoval vyšší fotoaktivity při všech vlnových délkách než P25. S rostoucí vlnovou délkou UV záření fotoaktivity klesala. Výsledky jsou uvedeny v tab. 2.

Tabulka 2: Výsledky fotoaktivity nanovláknového TiO₂ v porovnání s P25

Vzorek	254 nm	365 nm	400 nm
Precursor TiO ₂	0,4444	0,1298	0,0054
P25	0,2851	0,1272	0,0022

5 Závěr

Tento článek popisuje výrobu anorganických nanovláken oxidu titaničitého za využití principu elektrostatického zvlákňování z volné hladiny. Materiálovou a konstrukční optimalizací van nesoucích zvlákňovací elektrodu lze kladně ovlivnit elektrostatické pole mající vliv na účinnost zvlákňování. Tím je docíleno žádané navýšení produkce anorganické nanovlákněné vrstvy oxidu titaničitého. Následnou kalcinací je docílena výsledná krystalická struktura vláken. Pro optimální využití vypálených vláken je třeba docílit jejich specifické formy zvané anatas. Pro tento účel bylo provedeno RTG měření a na základě výsledků byla stanovena teplota kalcinace na 600°C po dobu 2 hodin. Po kalcinaci prekursoru byla zkoumána struktura vláken za využití difraktogramu, kdy byla zjištěna přítomnost primárních krystalů anatase o velikosti 12 nm. Výsledný produkt byl podroben testům fotokatalýzy a byl porovnán s běžně využívaným nanopráškem P25. Ve všech vlnových délkách vykazovala vlákna oxidu titaničitého vyšší fotoaktivitu než zmiňovaný nanoprášek. Optimalizací linky se docílilo navýšení produkce nanovlákněné vrstvy s vyšší mírou použitelnosti.

Literatura

- [1] JIRSÁK, O. *Method of nanofibers production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the method*. 2004. Patent, WO 0127365
- [2] LUKÁŠ, D.; SAKAR; MARTINOVÁ, L.; VODSEĎÁLKOVÁ; LUBASOVÁ, D.; CHALOUPEK, J.; POKORNÝ, P.; MIKEŠ, P.; CHVOJKA, J. A KOMÁREK, M. "Physical Principles of Electrospinning (Electrospinning as a Nano-scale Technology of the Twenty-first Century) ". Textile Progress, No.41., 2009. pp. 59-140
- [3] HE, F. ; MA, F. ; LI, J. ; LI, T. and LI, G. *Effect of Calcination Temperature on the Structural Properties and Photocatalytic Activities of Solvothermal Synthesized TiO₂ Hollow Nanoparticles*. In: *Ceramics International*, 2014. pp. 6441-6446. Volume 40, Issue 5.
- [4] PETRŮ, M.; NOVÁK, O.; LEPŠÍK, P.: "Increase of the efficiency of the production lines for the spinning of inorganic nanofibers by the electrostatic field intensity optimization". *MM Science Journal*, No. 4, 2012, pp. 382-385
- [5] KEITH M. FORWARD; GREGORY C. RUTLEDGE. "Free surface electrospinning from a wire electrode". *Chemical Engineering Journal*, Vol. 183, 2012, pp. 492-503
- [6] ANGAMMANA, C. J.; JAYARAM, S. H.: "The Effects of Electric Field on the Multi-jet Electrospinning Process and Fiber Morphology". *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47 (2), 2011, pp. 1028 – 1035.

OVĚŘENÍ PŘESNOSTI POLOHOVÁNÍ MEMS UPÍNEK ZA POMOCI PRŮMYSLOVÉ KAMERY

Matúšek Ondřej

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 4. ročník
Doktorský studijní program – STROJE A ZAŘÍZENÍ

Abstrakt: Tato práce se zabývá možnostmi a ověřením přesnosti automatické montáže MEMS upínek. Použitý skript pro vizuální navádění byl založen na principu oko-ruka. Souřadnice aktuální 3D pozice MEMS součástky jsou získávány v reálném čase využitím 3D CAD trackovacího algoritmu. Přesnost navádění z 20 různých pozic byla ověřena a spočtena dle standardu ISO 9283. Dosažená přesnost polohování byla 1,3 μm a opakovatelnost polohování byla 2,1 μm . Přesnost natočení objektu byla menší než 0,4°.

Klíčová slova: Mikro-montáž, mikro-robotika, trackování objektu, vizuální polohování, MEMS

Úvod

Tato práce vznikla ve spolupráci s AS2M oddělením FEMTO-ST Institutu, ENSMM, v Besanconu, Francii. Tento institut se zabývá výzkumnými aktivitami v oborech mikro-robotiky, mikro pohonů, automatického řízení a mikro montáže.

Konvenční robotická montáž v reálném "makro" světě záleží na přesných robotech, které zajišťují pohyb se zpětnovazebným řízením. Tato forma open-loop manipulace avšak není vhodná pro mikro-operace. Požadavky na přesnost jsou mnohem vyšší a zároveň technika manipulace je odlišná. Z tohoto důvodu řízení v uzavřené smyčce (closed-loop control) se jeví jako dobré řešení pro automatizaci montáže MEMS prvků. Často je tedy využíváno vizuální řízení s pomocí snímání scény kamerovým systémem. Tento systém může být navíc kombinován s využitím silového řízení [1], [2] a [3].

Bohužel proces mikro-montáže byl identifikován jako kritický pro mikro a nano technologii. Zvyšující se poptávka po MEMS / MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems) pro mikro-systémy vede k vývoji nových konceptů a víceúčelových mikro montážních stanic. Bylo vyvinuto několik platforem umožňující montáž komponent menších než několik desítek mikrometrů. Ty jsou více popsány v [4] a [5]. Navzdory mnoha provedeným pracím, automaticky řízená mikro montáž je úkol extrémně náročný. Největším úskalím je omezenost vizuálního řízení, křehkost objektu, nutnost komplexní trajektorie a řízení s extrémně velkou přesností.

První sekce popisuje zadání úkolu. Zvolené cíle jsou doplněny souhrnem vstupních parametrů. Celý úkon byl realizován na mikro-montážní stanici a skript připraven v C++ programovacím jazyce a s použitím ViSP a OpenCV sdílených knihoven. Druhá část se zabývá experimentem na ověření přesnosti a opakovatelnosti polohování. V poslední sekci jsou shrnuty získané výsledky.

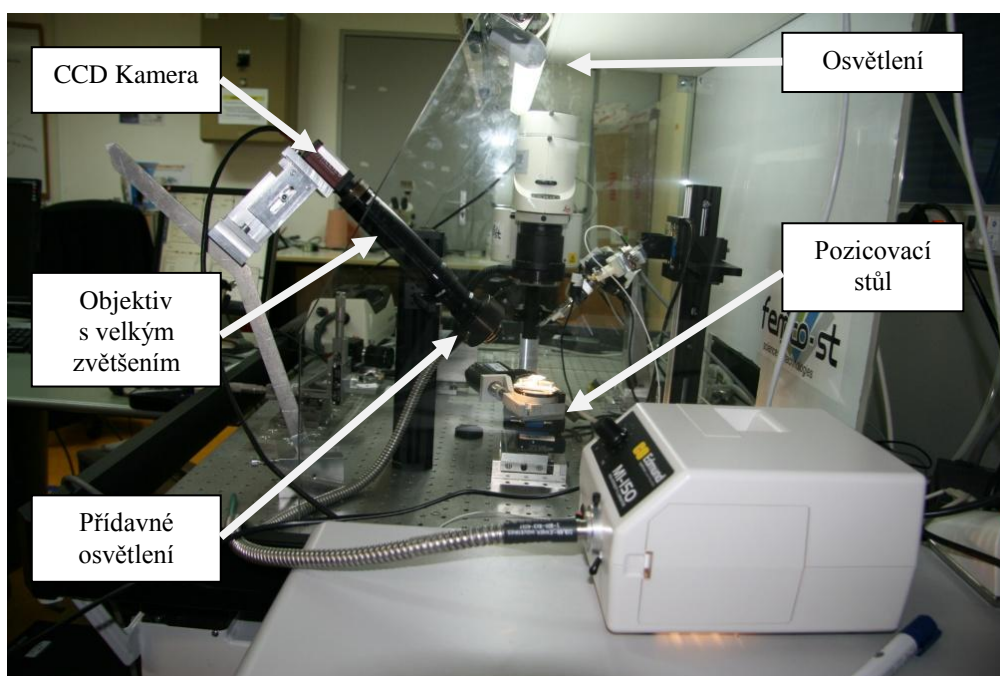
1 Řešená problematika

1.1 Cíl práce

Cílem této práce bylo ověřit přesnost automatické montáže MEMS upínek. Venkovní rozměry těchto upínek jsou 1,2 x 0,8 x 0,05 mm. Po zprovoznění „trackování“ objektu - tímto pojmem se rozumí sledování reálné pozice objektu v souřadnicovém systému kamery - byla realizována řada experimentů k ověření přesnosti a opakovatelnosti polohování.

1.2 Pracoviště

Polohování takto malých objektů přináší několik problémů, spojených zejména se zmíněnými mikro-rozměry. Jeden z nejvíce znatelných je vliv vibrací. Z tohoto důvodu bylo celé uspořádání (obr. 1) umístěno na anti-vibrační stůl. Použité pracoviště se skládá z mikro-polohovacího stolu se třemi stupni volnosti (dvě translace x, y, a rotace theta), průmyslové kamery s odpovídajícím osvětlením, počítače vyhodnocujícího aktuální pozici objektu a počítače řídicího PI mikro-polohovací stůl.



Obrázek 1 Připravené pracoviště

1.3 Software

V problematice trackování objektů existují různé přístupy. Nejrozšířenější je klasická blob detekce, případně liniová detekce hran. Pro řešení MEMS polohování byla zvolena sofistikovanější metoda, 3D modelově založený tracker. Možnosti trackování objektu jsou detailněji popsány v [6].

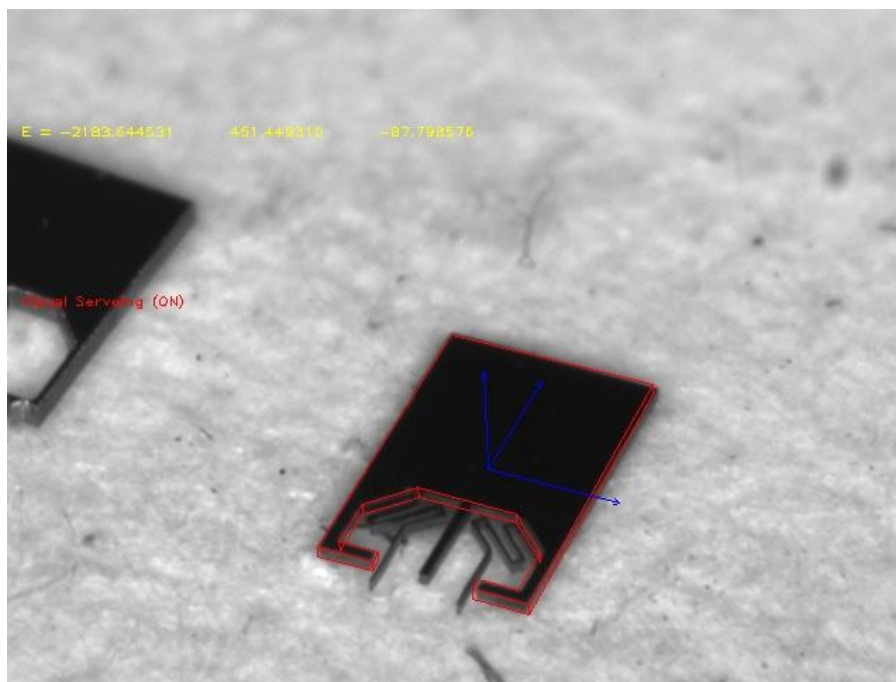
3D model based tracker (3DMBT) umožňuje získat 3D souřadnice sledovaného objektu ve scéně při použití jedné kamery počítáním odhadu nelineární pozice mezi kamerou a objekty. Tracker je založen na kombinaci liniové a blob detekce. Používá jakýsi předdefinovaný model, který se skládá z definovaných bodů (rohů) a linií (hran objektu). Pro komplikovanější případy lze navíc rozšířit tento model o kruhy a elipsy. Pokud je kamera zkalibrována, jsou

tyto virtuální body a linie přiřazeny objektu snímané scény. Tento proces umožňuje sledování objektu v reálném čase. Robustnost byla zajištěna integrováním M-estimátoru a odhadu chyby metodou nejmenších čtverců. [7].

Správná funkce 3DMBT je závislá na náležitě kalibraci kamery. Kalibraci kamery je myšleno zjištění vnitřních parametrů kamery. Tyto parametry jsou použity při výpočtech, které umožňují přesné definování polohy sledovaného objektu ve 3D prostoru a to s pomocí pouze jedné kamery. Problematika kalibrace kamery je detailněji popsána v [8] a [9].

Pro získání vnitřních parametrů kamery byl v našem případě použit Matlab toolbox. Kalibrace kamery s velkým zvětšením je opravdu náročný úkol, kvůli malé hloubce ostrosti používaných objektivů. Na jedné z mikro-součástí byl tedy vytvořen šachovnicový vzor pomocí vyřezaných čtverců a kamera pak byla kalibrována za pomoci manuálního mikro-pozicovacího stolku. Podrobněji byl tento proces popsán v [10].

Bylo vytvořeno několik virtuálních modelů objektu. Tyto modely jsou následně promítány na získaný snímek. Tracker promítne jeho virtuální model a sjednotí virtuální a reálné hrany objektu. Jak již bylo zmíněno, ke správné funkci trackeru je třeba znát vnitřní parametry kamery. Ty jsou standardně uloženy a načítány z XML konfiguračního souboru, případně může být jejich definice implementována do samotného kódu. Pozice virtuálního modelu je neustále sjednocována s pozicí snímaného objektu a to umožňuje získání aktuálních souřadnic snímaného objektu v reálném čase. Popsaná situace je zobrazena na obr. 2.



Obrázek 2 Virtuální model sjednocen se snímaným objektem

1.4 Specifika snímání mikro-součástí

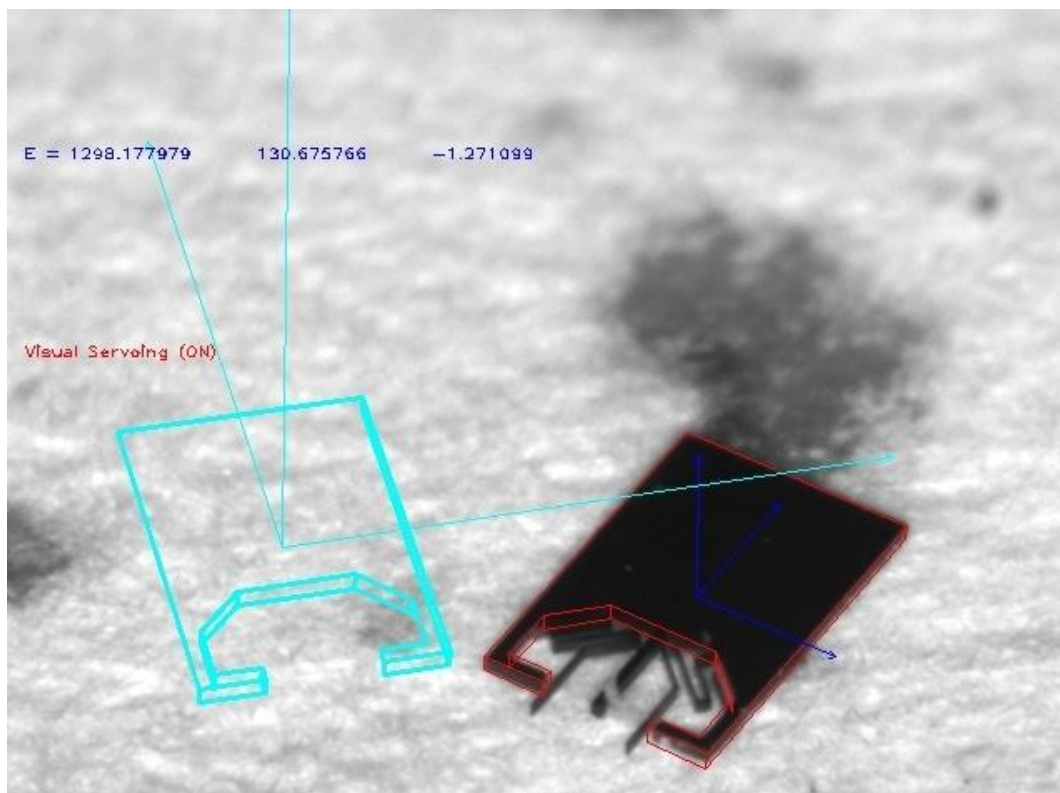
Vnitřní proměnné trackeru jsou závislé na vstupních parametrech a různí se pro každou použitou aplikaci. Z toho důvodu jsou zde zmíněny pouze obecné parametry. Těmi jsou rychlost pohybu objektu, vhodné osvětlení, hloubka ostrosti objektivu a v neposlední řadě snímkovací rychlost kamery. Bylo testováno několik rychlostí pohybu objektu za účelem

definování maximální hodnoty, kdy je dosaženo vysoké rychlosti, ale trackování je stále stabilní. Dosažená hodnota byla $60 \mu\text{m/s}$ pro obě translace a $2^\circ/\text{s}$ pro rotaci.

Prezentovaná soustava je velmi náchylná na kvalitu osvětlení. Pokud se ve scéně objevují stíny objektu, mohou být vyhodnoceny jako součást sledovaného objektu a to by mohlo způsobit nepřesnost pozicování, popřípadě i zhroucení běžícího skriptu. V našem případě bylo použito intenzivního prstencového osvětlení spolu s plochým disperzním osvětlením umístěným nad pracovištěm. Je také důležité dosáhnout stability světelných podmínek, protože tracker pracuje s bodovými intenzitami. Za tímto účelem byly zakázány všechny automatické funkce kamery, jako je např. vyvážení bílé, či automatický výpočet rychlosti závěrky a zisku. Hloubka ostrosti je problém spojený s každým snímáním mikro-objektů. Použitý objektiv, bohužel, nebyl vybaven řízením clony. Byla tedy vyrobena a použita dodatečná pevná clona, která umožnila zvětšit hloubku ostrosti. Nakonec byla určena plocha $4 \times 2,5 \text{ mm}$, ve které bylo možné bezpečně sledovat pohyb MEMS upínky.

1.5 Vizualní pozicování

Definování stabilních podmínek bylo nutné pro realizaci trackování objektu. Dalším úkolem byla implementace vizuálního polohování a v poslední řadě ověření přesnosti a opakovatelnosti polohování. Proces visual servoing je založen na systému oko-ruka a vychází právě z trackovacího algoritmu. MEMS upínka je nejprve umístěna manuálně do finální pozice. Pozice, kam bude prováděno navádění. Toto je prováděno připojeným joystickem. Souřadnice této pozice jsou následně uloženy do skriptu. Po uložení této pozice je možné spustit automatické polohování objektu z jakéhokoliv místa, které je v rozsahu viditelné plochy kamery.



Obrázek 3 Pozicování MEMS upínky

Po určení počáteční pozice algoritmus hodnotí chybu mezi aktuální (současnou) pozicí a pozicí finální. Tato akce je prováděna pro každou osu zvlášť. Tato informace je poslána řídicímu počítači a osy jsou dorovnány na základě zjištěné diference a v závislosti na nastavenou maximální hodnotu rychlosti. Tento proces je realizován v on-line smyčce a objekt je polohován plynule v čase. Na obrázku 3 je sledovaná upínka (červeně orámovaná) a uložená finální pozice je promítnuta modro-zelenou barvou.

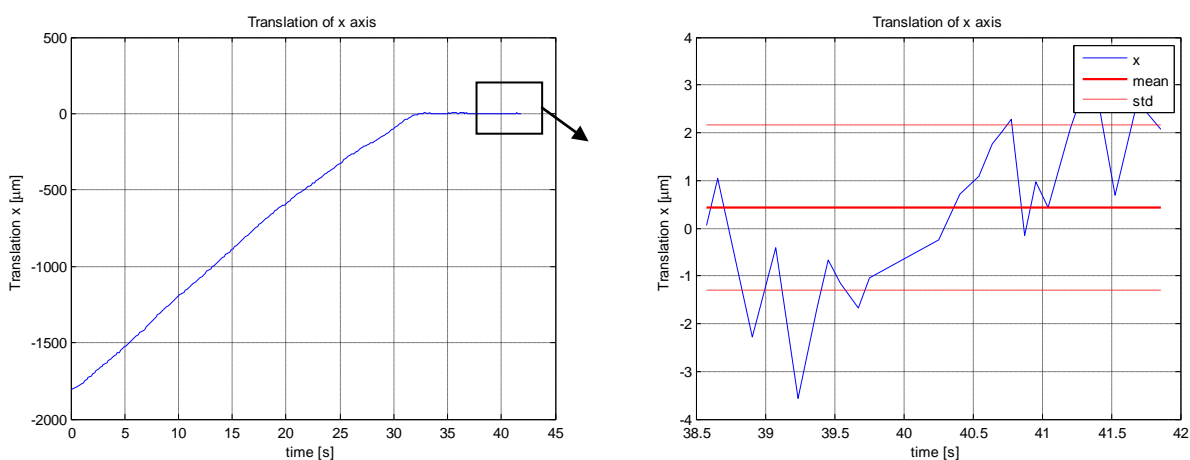
2 Experiment

Pro ověření robustnosti bylo realizováno několik testů na ověření přesnosti polohování. Nejprve bylo provedeno měření z jedné počáteční do jedné finální pozice. Za pomoci automatického skriptu byla upínka umístěna do předdefinované počáteční polohy. Byl spuštěn tracker a automatické řízení pohybovalo s objektem do definované finální polohy. Po dosažení finální polohy byl program zastaven a objekt přemístěn opět do počáteční polohy a tracker spuštěn opět od začátku. Výsledky tohoto experimentu byly publikovány v [10].

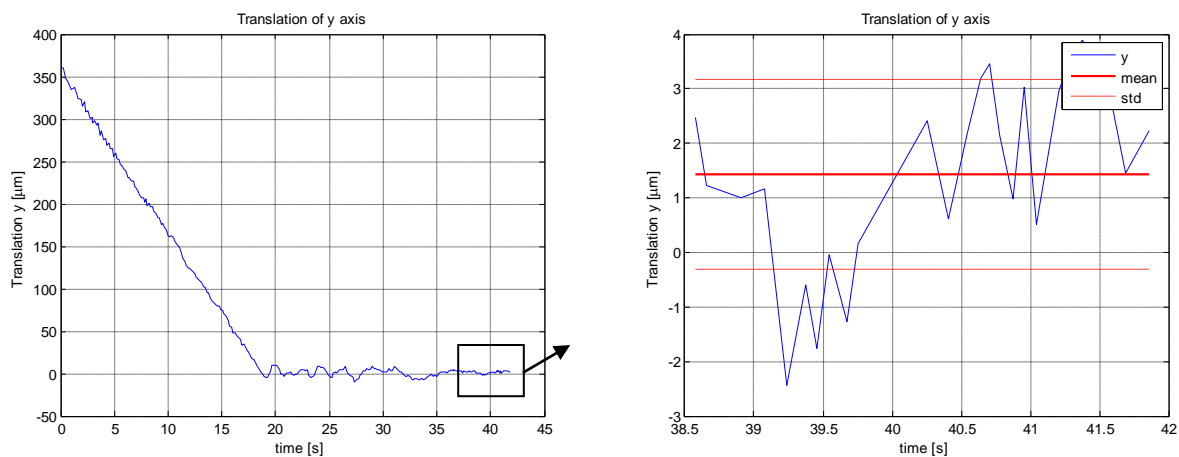
Když bylo zvládnuto automatické polohování z jedné počáteční pozice, bylo nutné ověřit robustnost (stabilitu) trackování a univerzálnost připraveného skriptu. To bylo provedeno tak, že bylo naprogramováno 20 různých počátečních míst. Program poté fungoval obdobně, jako v prvním případě. Mikro-polohovací stanice nejprve umístila upínku do předdefinované počáteční polohy. Byl spuštěn tracker a automatické řízení pohybovalo s objektem do definované finální polohy. Po dosažení finální polohy byl program zastaven a objekt přemístěn do další odlišné počáteční polohy. Tracker byl spuštěn opět od začátku a takto proběhla celá smyčka 20 pozic. Protože připravený skript vyhodnocuje pohyb v každé ose zvlášť, jsou již zobrazeny grafy vždy pro každou osu zvlášť.

Byly vybrány 2 nejzajímavější případy: Pozicování s maximální translací v ose x a v ose y a pozicování s velkým rozsahem translace x a největším přetočením objektu v ose $theta$. Grafy ukazují vždy celý průběh pohybu pro každou osu zvlášť a ve druhém obrázku posledních 25 cyklů (cca 4s) po dosažení pozice.

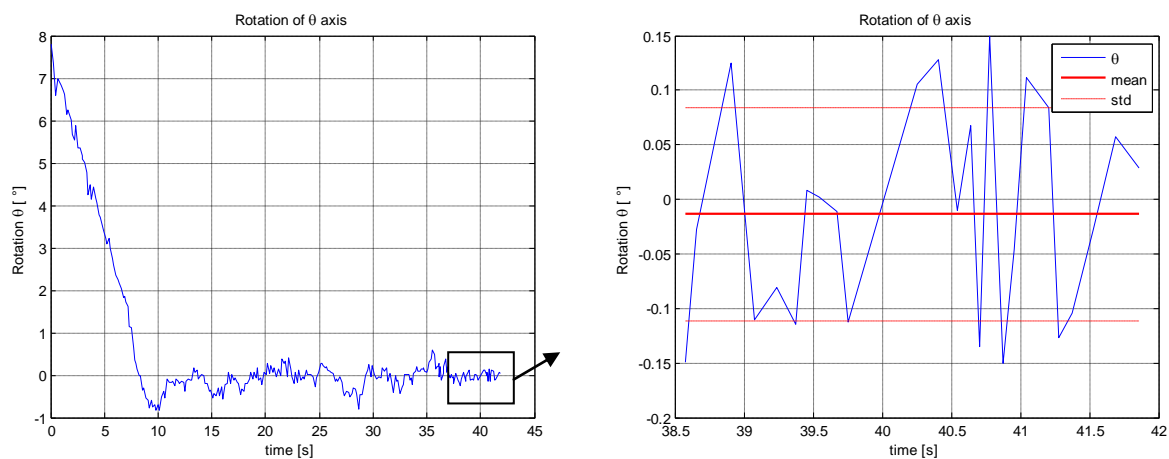
V prvním případě byl pohyb na ose x 1804 μm v záporném směru, na ose y 361 μm v kladném směru a objekt se natočil o 8° .



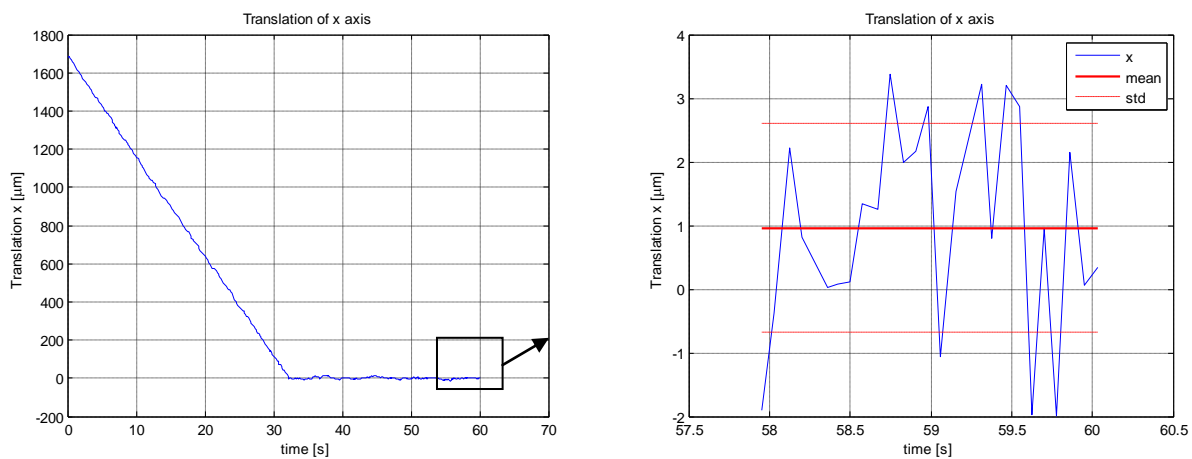
Obrázek 4 Graf průběhu translace x a detail po dosažení finální polohy

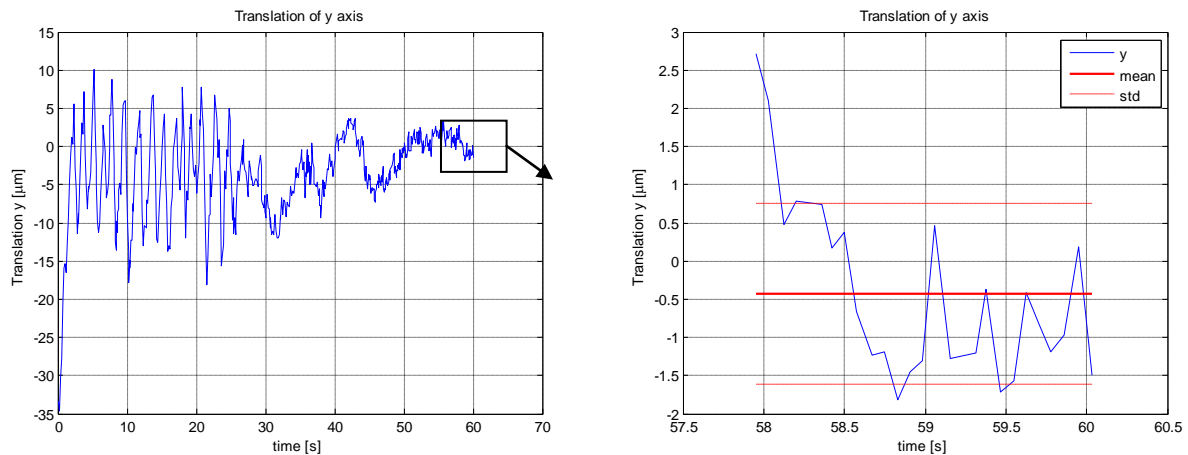


Obrázek 5 Graf průběhu translace y a detail po dosažení finální polohy

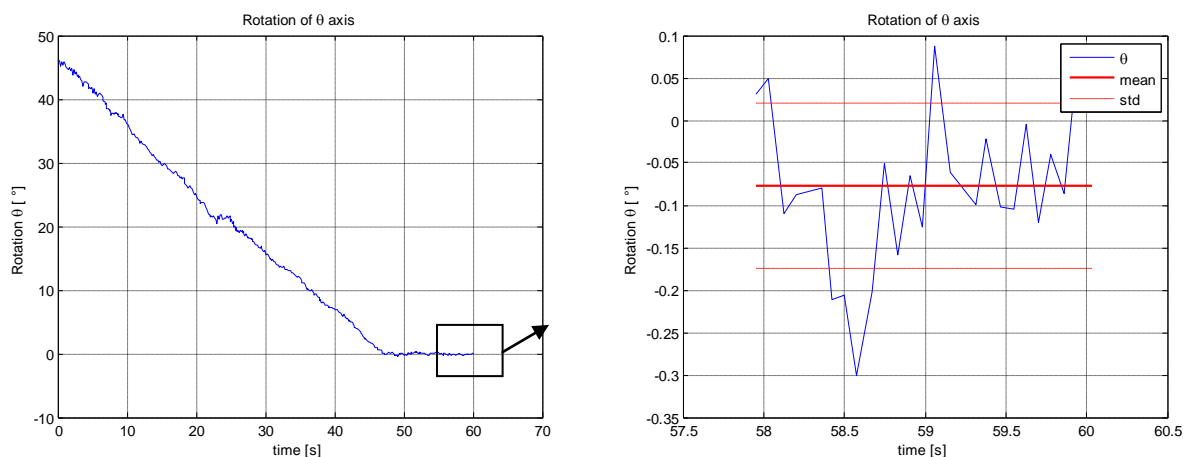
Obrázek 6 Graf průběhu rotace *theta* a detail po dosažení finální polohy

Pro druhou variantu byl pohyb na ose x 1680 μm kladným směru, na ose y 33 μm v záporném směru a objekt se otočil o 46° kolem osy *theta*.

Obrázek 7 Graf průběhu translace x a detail po dosažení finální polohy



Obrázek 8 Graf průběhu translace y a detail po dosáhnutí finální polohy



Obrázek 9 Graf průběhu rotace theta a detail po dosáhnutí finální polohy

Po dosažení finální pozice byla vyhodnocena data z posledních 25 cyklů trackeru (přibližně 4 sekundy). Byla spočítána průměrná hodnota, směrodatná odchylka a chyba metodou nejmenších čtverců pro každou z 20 pozic. Průměrná a maximální hodnota zmíněných parametrů byla vyhodnocována pro každou osu zvlášť. Navíc průměry a směrodatné odchylky byly vyneseny do grafů.

Přesnost a opakovatelnost pozicování byla následně vyhodnocena podle ISO 9283:1998, normy pro průmyslové roboty (Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods). Přesnost polohování AP byla spočtena dle normy:

$$AP = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2} , \quad (1)$$

kde x_c, y_c jsou souřadnice finální polohy, v našem případě $[0,0]$, a \bar{x}, \bar{y} jsou:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j , \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j , \quad (2)$$

x_j a y_j jsou souřadnice dosažené polohy, n je celkový počet měření. Opakovatelnost RP byla spočítána jako:

$$RP = \bar{l} + 3Sl ; \quad (3)$$

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j ; \quad (4)$$

$$l_j = \sqrt{(\bar{x} - x_j)^2 + (\bar{y} - y_j)^2} ; \quad (5)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} . \quad (6)$$

$x_j, y_j, \bar{x}, \bar{y}$ jsou hodnoty použité při výpočtu přesnosti polohování.

Přesnost a opakovatelnost polohování byla spočtena podle zmíněné robotické normy. Bylo provedeno 20 nezávislých pokusů. Dosažená přesnost polohování byla 1,3 μm a dosažená opakovatelnost polohování byla 2,1 μm .

3 Závěr

Předložený článek se zabývá ověřením přesnosti polohování MEMS součástek při automatické montáži. Skript pro vizuální polohování MEMS upínek byl vytvořen s pomocí C++ programovacího jazyka. Byl použit 3D CAD modelově založený tracker sdílené knihovny ViSP. Automatické navádění bylo realizováno ve 3 osách, na mikro-polohovacím stole se 2 translacemi a jednou rotací. Byl připraven experiment ověřující přesnost a opakovatelnost polohování. Sledovaná upínka byla z různých počátečních pozic opakovaně automaticky navedena do finální pozice a byl vyhodnocován průběh jejího pohybu. Přesnost a opakovatelnost polohování byla vyhodnocena podle mezinárodní normy ISO 9283. Dosažená hodnota přesnosti polohování byla 1,3 μm a dosažená opakovatelnost polohování byla 2,1 μm . Chyba rotace byla menší než 0,4°.

Částečné zlepšení dosažených hodnot by bylo možné získat kvalitnější kalibrací kamery, nebo použitím kamery s vyšším rozlišením. To je však ale doprovázeno vyšší pořizovací cenou a většími nároky na řídicí systém. Lepší objektiv by umožnil sledovat větší plochu.

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže Technické univerzity v Liberci č. SGS 21006/115, využívající účelové podpory na specifický vysokoškolský výzkum a je financovaná Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] K. Yesin and B. Nelson. 2005. A CAD-model based tracking system for visually guided microassembly. *Robotica*, 23:409–418.
- [2] J. T. Feddema and R. W. Simon. 1998. Visual servoing and CAD-driven microassembly. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 5 (4):18–24.
- [3] B. Tamadazte, E. Marchand, S. Dembélé, N. Le Fort-Piat, CAD model based tracking and 3D visual-based control for MEMS microassembly, *The Int. Journal of Robotics Research*, 2010
- [4] K. Rabenoroso, C. Clévy, P. Lutz, P. Bargiel and Ch. Gorecki, A micro-assembly station used for 3Dreconfigurable hybrid MOEMS assembly, *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, ISAM'09.*, Suwon, Korea, Democratic People's Republic of (2009)
- [5] S. Bargiel, K. Rabenoroso, C. Clévy, C. Gorecki and P. Lutz, Towards Micro-Assembly of Hybrid MOEMS Components on Reconfigurable Silicon Free-Space Micro-Optical Bench, *Journal of Micromechanics and Microengineering (JMM)*, 20(4), 2010
- [6] O. Matúšek, Possibilities of object tracking, *Workshop pro doktorandy FT a FS Chata pod lipami 2013*. ISBN 978-80-7372-987-5, 173-176 (2013).
- [7] Visp documentation, [online], c2012, [2013-06-20], available from World Wide Web: <<http://www.irisa.fr/lagadic/visp/publication.html>>
- [8] J. Bouguet, Camera calibration toolbox for Matlab, c2010, [2013-06-22], available from www: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/#system>
- [9] E. Štefanová, Kalibrace nematických kamer, [online], c2006, [2013-06-22], available from World Wide Web: <http://www.vugtk.cz/odis/sborniky/jine/geos06/paper/53_stefanova_e/paper/53_stefanova_e.pdf>
- [10] MATÚŠEK, Ondřej, Vlastimil HOTAŘ, Guillaume J. LAURENT, Brahim TAMADAZTE a Cedric CLEVY. Characterization of the Positioning Accuracy and Precision of MEMS Die Servoing Using Model-Based Visual Tracking. In: MATÚŠEK, Ondřej, Vlastimil HOTAŘ, Guillaume J. LAURENT, Brahim TAMADAZTE a Cedric CLEVY. *Applied Mechanics and Materials: Industrial and Service Robotics*. Switzerland: Trans Tech Publications, 2014, s. 426-433. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.613.426. ISBN 978-3-03835-202-0. ISSN 1660-9336. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/AMM.613.426>

ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ TEPLOT V BLÍZKOSTI BOKŮ ZUBŮ OZUBENÝCH KOL

KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ A STAVBA ZAŘÍZENÍ

Mazač Martin

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta STROJNÍ

Doktorský studijní program – STROJE A ZAŘÍZENÍ

Abstrakt: Tato práce pojednává o konstrukci a využití zařízení pro měření teplot v blízkosti boků spoluzabírajících zubů stálého převodu automobilové převodovky. V práci je popsána a prakticky dokumentována konstrukce a výroba stavu pro zatěžování převodovky za podmínek blízcím se reálnému provozu. Práce dokumentuje zástavbu snímačů teploty do pastorku stálého převodu, který byl zvolen jako místo měření teplot. Je popsána výroba nových a úprava stávajících částí převodovky, aneb kroky nezbytné k vestavbě měřicího zařízení.

Klíčová slova: měření, teplota, převodovka, ozubené kolo, bok zubu,

1 Úvod

Převody realizované za pomoci ozubených kol jsou jedním z nejvýznamnějších prvků užívaných ve všeobecném strojírenství. Dle konkrétní aplikace převodu je jejich konstrukci věnována patřičná pozornost a převážně je vyžadována maximální preciznost funkce. Funkci ozubených převodů ovlivňuje mnoho faktorů a jejich správná konstrukce je velice složitá práce, vyžadující využití znalostí v mnoha technických oborech. Důraz při návrhu převodů je kladen zejména na jejich mechanické a provozní vlastnosti.

Mechanickými vlastnostmi převodovek míníme nejvyšší možné transformovatelné parametry přenášeného výkonu, tedy krouticí moment a otáčky, k této problematice se vztahuje mnoho omezujících parametrů, vycházejících ze současného stavu poznání. Provozními vlastnostmi rozumíme parametry chování převodovky vycházející z její konstrukce, mechanických a geometrických vlastností. Do skupiny těchto parametrů můžeme zařadit hlučnost a účinnost. Oba tyto parametry jsou pozorně sledovány a je vyžadováno jejich udržení v určitých limitech. Limity si zpravidla stanovuje výrobce na poměrně přísných hodnotách. Hodnoty hlučnosti a účinnosti jsou vzájemně závislé a korespondují s geometrickými a mechanickými vlastnostmi ozubení a převodovky.

Vzhledem k mnoha a mnoha technickým aplikacím se dále soustředíme jen na převody užívané pro transformaci energie v převodovkách vozidel, ačkoliv obdobné parametry jsou sledovány i u mnoha dalších průmyslově využívaných převodovek.

Jak již bylo uvedeno parametry hlučnost a účinnost spolu do jisté míry souvisejí a je výhodné tudíž nalézt optimální geometrii ozubení tak, aby hlučnost a účinnost byly v přijatelných mezích. U většiny soukolí se dnes používají korekce tvaru boku zubu pro získání optimálních záběrových parametrů. Nesmíme však opomenout říci, že záběr dvou boků zubů ozubených kol závisí na více parametrech, jako je například kvalita mazání související s obvodovou rychlostí kola a také materiál nebo kvalita povrchu kol.

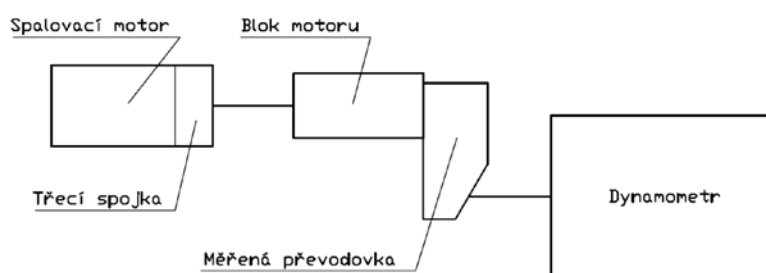
Vzhledem k výše uvedeným faktům by bylo výhodné měřit teploty v blízkosti povrchu boku zubu, abychom si utvořili celkový náhled na kvalitu transformace energie (účinnost) a funkci ozubeného soukolí. Pro tato měření bylo sestaveno zařízení, které bude popsáno dále.

2 Měřicí zařízení

Vzhledem k uvedeným faktům bylo přistoupeno k sestavení zařízení umožňujícího provoz a zatěžování automobilové převodovky za podmínek blízcích se reálnému jejímu reálnému provozu, tuto část považujeme za část mechanickou. Druhou nezbytnou částí pro zajištění měření teplot v blízkosti boků zubů byla část obsahující elektroniku a čidla teploty, tuto část nazýváme elektronickou. V práci [1] z minulého roku již bylo uvedeno větší množství informací o zařízení a systému měření teplot, proto se omezíme jen na neuvedená specifika obou částí a konstrukční řešení některých částí. Tato práce volně navazuje a rozšiřuje práci [1].

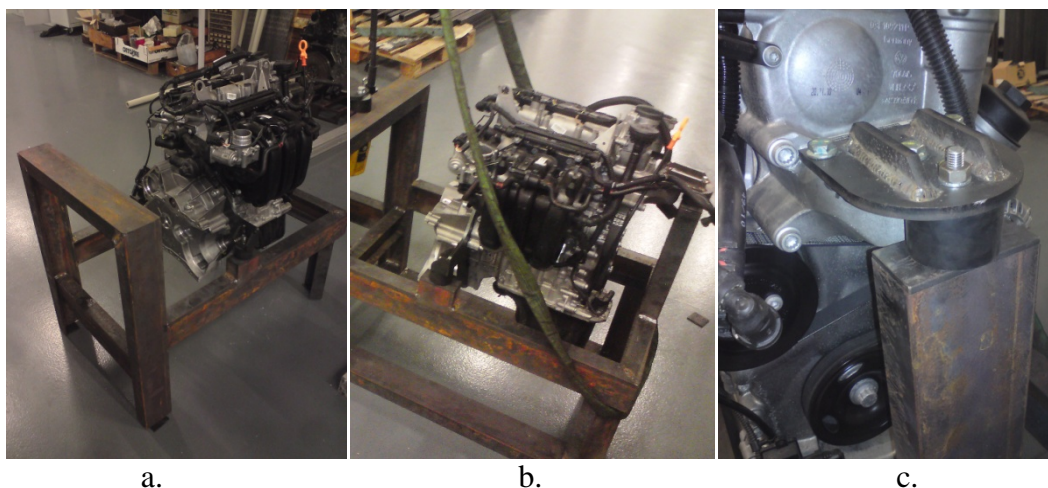
2.1 Mechanická část

Mechanickou částí rozumíme část stavu určenou pro uchycení převodovky, na které je prováděno měření, a tedy je realizován její provoz za podmínek blízkých reálnému provozu. Pro měření byla zvolena převodovka MQ100 - Škoda Auto a.s., která představuje typickou dvouhřídelovou převodovku malého vozu s pohonem předních kol. Pro provoz převodovky byl zvolen typ stavu s otevřeným tokem energie, u něhož lze zajistit pohon pomocí spalovacího motoru a tím umožnit pohon se všemi "kvalitativními nedostatky" (nerovnoměrnost chodu, rázy). Mnohé o tomto stavu bylo zveřejněno již v [1]. Na Obr.1 je zachyceno blokové schéma mechanické části zařízení.



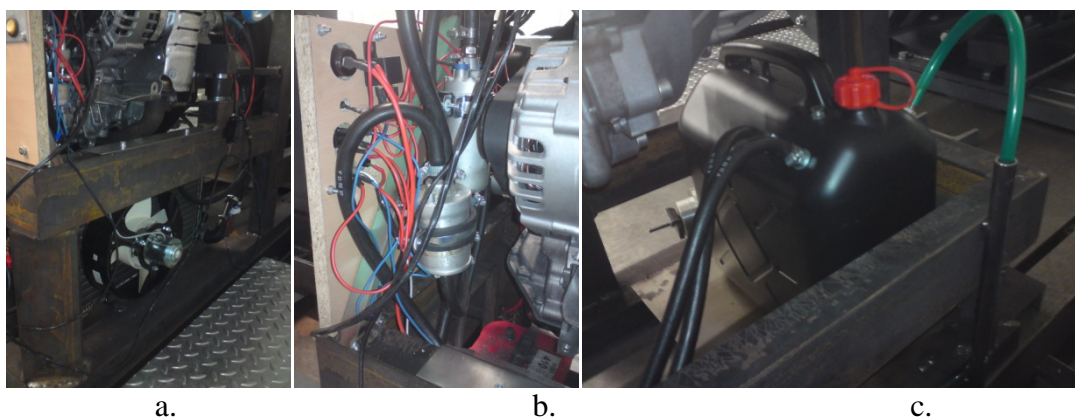
Obrázek 1: blokové schéma- mechanická část

Popišme nyní části a jejich úpravy v pořadí jak jsou umístěny na zařízení. Zdrojem energie pro pohon řetězce je spalovací motor (Obr.1- zcela vlevo). Byl zvolen tříválcový, atmosféricky plněný motor 1,2HTP/44kW Škoda Auto a.s., který svými parametry nejlépe odpovídá jinak v kombinaci s MQ100 používanému 1,0/44kW. Pro uchycení motoru na základní ocelový rám byly použity tři standardní pryžová lůžka 60x40mm, z nichž jeden se nachází pod držákem na čelní straně motoru u rozvodového řetězu, další dva jsou umístěny pod úchyty vyrobené příruby na straně setrvačníku. Ocelovou přírubu na straně setrvačníku bylo nutné vyrobit a je navržena tak, aby byla schopna plnit funkci reakce a přenášet tak reakční síly na základní rám. Části uchycení motoru (viz.popis obrázku) jsou zobrazeny na Obr.2.



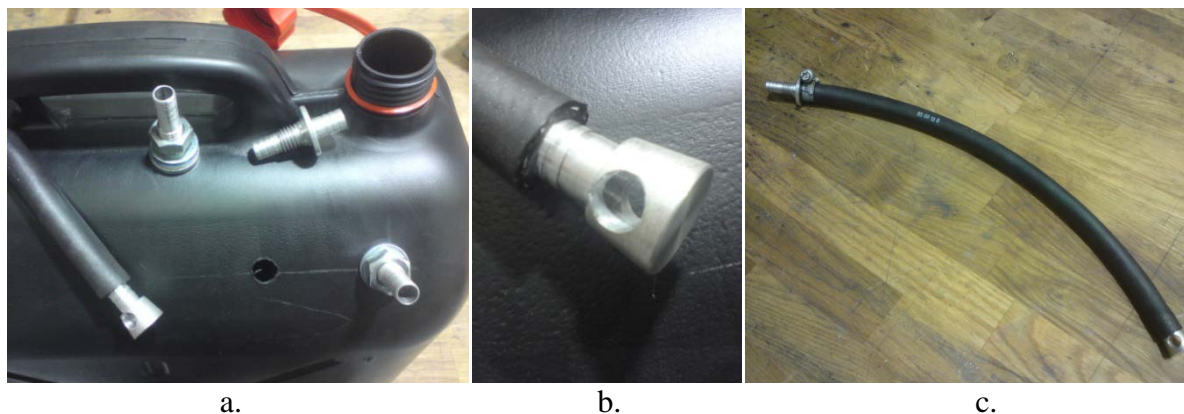
Obrázek 2: a,b) spal. motor a část rámu c) pryžové lůžko

Pro funkci motoru bylo nutné doplnit také části jeho příslušenství. Vzhledem k požadavku aby bylo možné zařízení provozovat nezávisle od vybavení laboratoře, byly doplněny systémy chlazení motoru, přívodu a filtrace paliva. Tyto systémy jsou zachyceny na Obr.3.



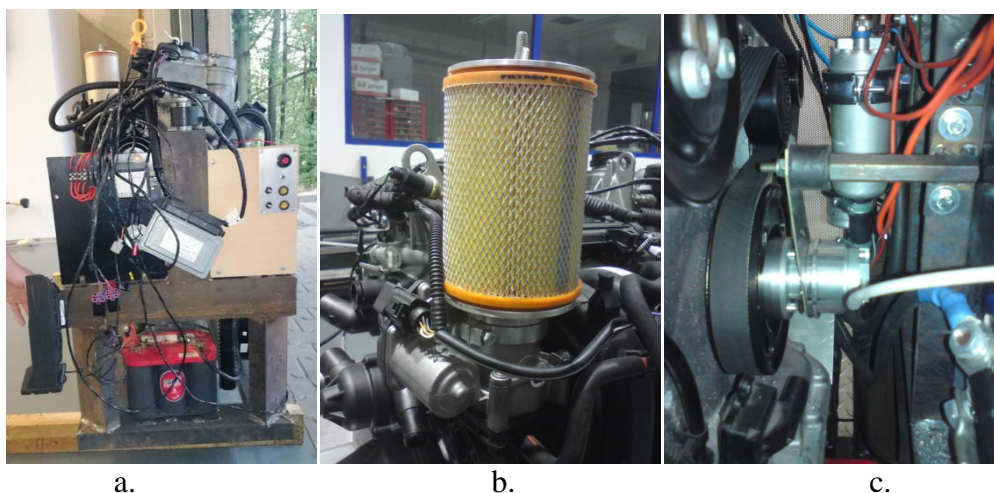
Obrázek 3: a) chladič s ventilátorem b) palivový filtr a čerpadlo c) "nádrž paliva"

Jako nádrž paliva bylo využito kanystru s objemem 20l, který byl osazen hadičníky pro připojení palivových hadic výstupu a přívodu přebytečného paliva od motoru. Výstupní průchodka s hadičníkem byla uvnitř nádrže opatřena prodloužením v podobě krátké palivové hadice s koncovkou, tak aby byl zajištěn přívod paliva ze dna nádrže. Koncovka vnitřní palivové hadice zabráňuje možnému přisátí hadice ke stěně a zamezení tak přívodu paliva. Dále je nádrž osazena jednoduchým palivoznakem. Na vrchu nádrže je umístěn jednocestný kuličkový ventil pro přisávání vzduchu při vzniku podtlaku v nádrži. Části palivové nádrže jsou zachyceny na Obr.4.



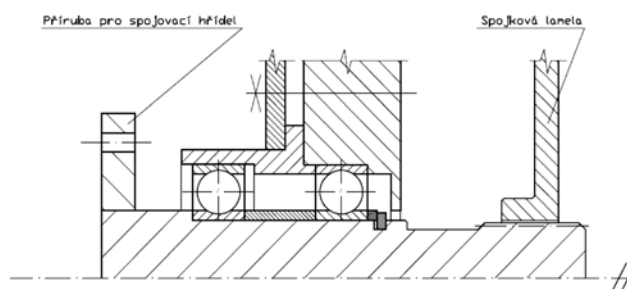
Obrázek 4: a) díly palivové nádrže, b) koncovka vnitřní části výstupu, c) vnitřní část výstupu

Dále je zařízení vybaveno také vlastním elektrickým systémem, který zajišťuje napájení řídicí jednotky motoru, palivového čerpadla, ventilátoru chladiče a ovládání startéru pro spouštění. Elektrický okruh je vybaven odpojovačem baterie, kterým je možné také rychle motor zastavit. Elektrická zařízení jsou ovládána přes velice jednoduchý čelní panel, na němž se nacházejí vypínače ventilátoru chlazení, palivového čerpadla a spínač startéru, dále zde jsou také pouzdra s trubičkovými pojistkami. Část elektrického systému a ovládací panel jsou na Obr.5a. Bylo nutné osadit motor novým jednodušším filtrem nasávaného vzduchu, zachycen na Obr.5b. Další z úprav byla realizace uchycení inkrementálního snímače otáčení klikového hřídele motoru. Snímač je uchycen přes vyrobenou redukci k řemenici klínového řemene- na Obr.5c.



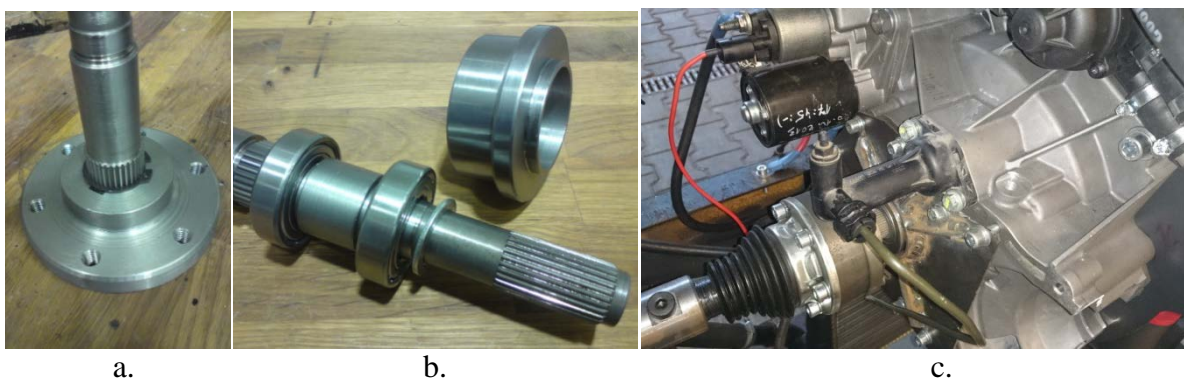
Obrázek 5: a.) čelní panel, b.) filtr vzduchu, c.) inkrementální snímač

Další částí nezbytnou pro provoz zařízení je třecí rozjezdová spojka umístěná na hnacím spalovacím motoru. Tato celá část vznikla úpravou běžné spojkové skříně z převodovky MQ200 Škoda Auto a.s.. Toto uspořádání řeší také umístění startéru a hydraulického válce pro rozeptání spojky, neboť tyto součásti jsou osazeny na spojkové skříně. Skříně bylo nutné, vzhledem k tloušťce použité příruby pro uchycení motoru k rámu, o 8mm snížit a ořezat část pro diferenciál. Dalším zásahem byla nutnost vytvořit výstupní hřídel s přírubou pro následující uchycení spojovacího hnacího hřídele. Výstupní hřídel vznikla upravením standardního vstupního hřídele z již zmíněné převodovky MQ200. Upravený hřídel byl uložen do dvou kuličkových ložisek- náčrt Obr.6.



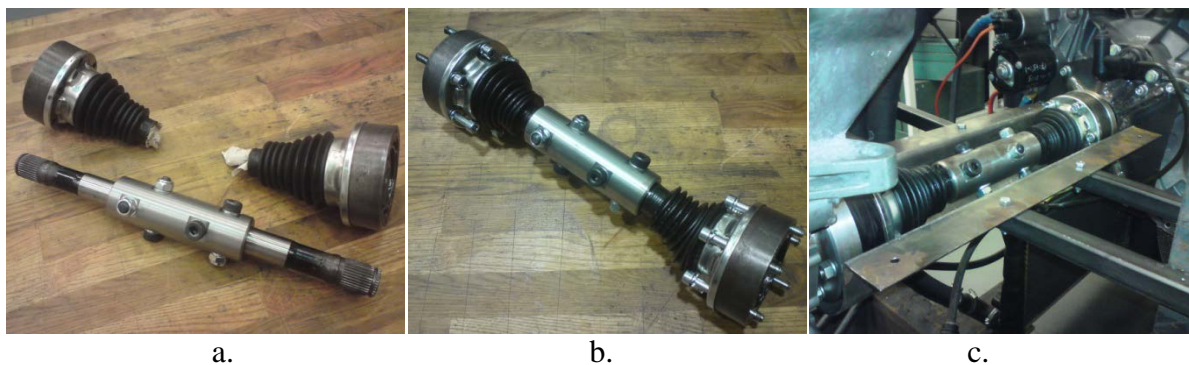
Obrázek 6: uložení výstupního hřídele

Výstupní část upraveného hřídele byla opatřena přírubou se šesti otvory pro připojovací šrouby. Část výstupního hřídele s přírubou je na Obr.7a, příruba je nalisována na hřídeli spolu s použitím těsného pera, proti vysunutí je na jedné straně vytvořeno osazení a na straně druhé je zajištěna pojistným kroužkem. Na Obr.7b jsou části uložení výstupní hřídele a na Obr.7c je zachycen pohled na již namontovanou spojkovou skříň.



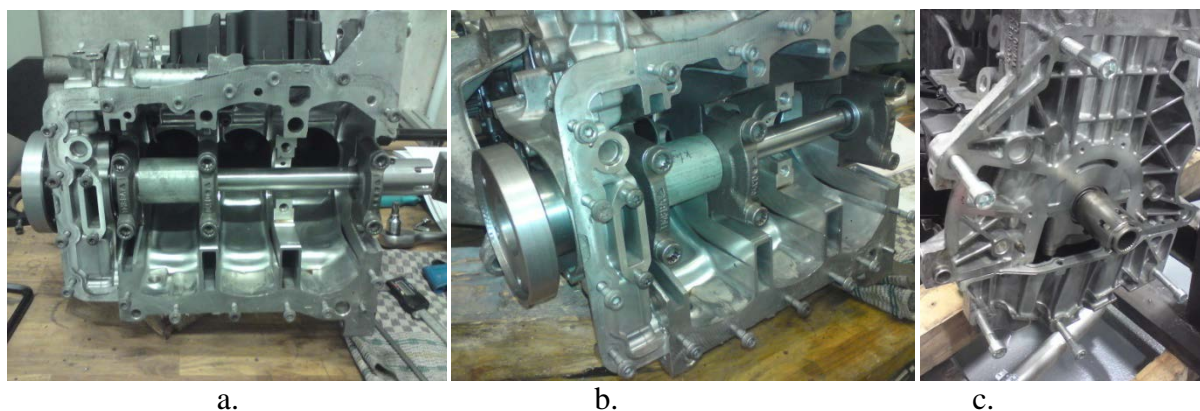
Obrázek 7: a.) část výstup. hřídele s přírubou, b.) části uložení výst. hř., c.) spojková skříň

Další z částí zařízení je propojovací hřídel, který slouží k přenosu hnací energie na měřenou převodovku. Zde bylo nutné zabezpečit možnost úhlového vyosení, aby nedocházelo k přičení a vzniku napjatosti, také byla vyžadována maximální stabilita parametrů přenášeného výkonu, tedy aby nedocházelo ke vzniku nerovnoměrnosti chodu. Byla zvolena varianta, kdy byly použity dva kuličkové homokinetické klouby z hnacích hřídelů automobilu. Neboť je vždy jen jeden tento kloub na hnací hřídeli, bylo nutné prakticky spojit dvě poloviny dvou hnacích hřídelů, k tomuto kroku došlo za pomoci nalisování převlečného dílce a zajištění lícovanými šrouby radiálně k ose rotace hřídele. Na Obr.8a jsou jednotlivé použité dílce hřídele. Sestava hnacího hřídele je zachycena na Obr.8b. Na Obr.8c je hnací hřídel již instalován mezi výstupní hřídel spalovacího motoru a přírubu hnané části zařízení.



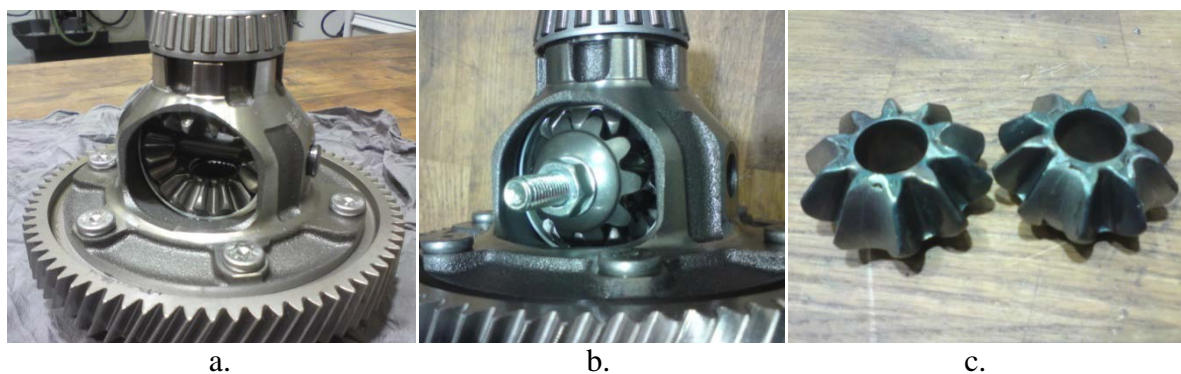
Obrázek 8: a.) dílce hřídele, b.) sestava hřídele, c.) vestavěný hřídel

Po propojovací hřídeli následuje v řetězci hnaná část zařízení. Hnaná část se skládá z bloku motoru 1,0/44kW a převodovky MQ100 (v modifikaci NZC) výrobce Škoda Auto a.s.. Tento "agregát" je uchycen k rámu zařízení obdobně, tak jak je tomu v automobilu, tedy na dvou pryžových lůžkách zachycujících svislé reakce a momentové vzpěry zachycující klopný moment. Toto uchycení agregátu a potažmo zkoušené převodovky zaručuje tuhost sestavy velice blízkou aplikaci ve vozidle. Blok motoru použitý pro uchycení převodovky má ponechánu hlavu válců a olejovou vanu, kliková hřídel a pístní skupina jsou odebrány. Kliková hřídel je nahrazena pouze rovnou hřídelí, uloženou do dvou kuličkových ložisek vložených místo původních třecích pánví (vnější průměr 47mm). Ložisko blíže vstupní strany je zajištěno proti posunutí na hřídeli pomocí osazení a pojistného kroužku, vnější kroužek tohoto ložiska je zajištěn pomocí rozpěrek. Druhé ložisko je na hřídeli fixováno za pomoci pojistných kroužků. Uložení kompletní hřídele je zachyceno na Obr.9a. Na vstupní straně (v čele motoru u rozvodového řemene) je hřídel osazena pomocí kuželu a pera přírubou (Obr.9b) pro uchycení hnací spojovací hřídele od spalovacího motoru, výstupní strana je opatřena pomocí pera mezikusem pro přenos výkonu pomocí drážkování na vstupní hřídel převodovky. Na Obr.9c je zachycen namontovaný mezikus společně s upravenou částí spojkové lamely obsahující jemné drážkování pro nasazení na vstupní hřídel převodovky.



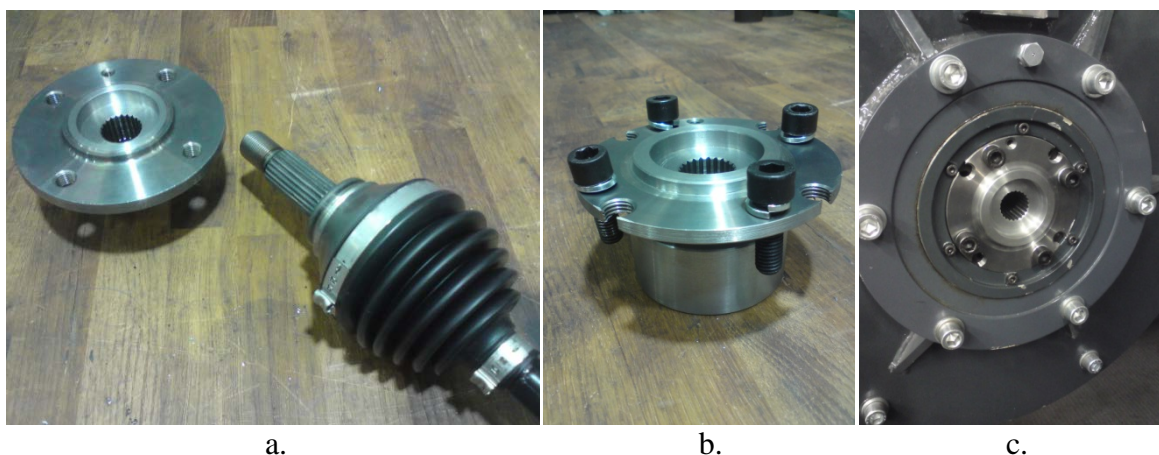
Obrázek 9: a.) uložení hřídele, b.) vstupní příruba, c.) dílce pro připojení převodovky

Pro jednoduchost byl zablokován u zkoušené převodovky zablokován diferenciál, tím lze zatěžovat pouze jednu hnací poloosu, což prakticky simuluje přímou jízdu a zároveň není třeba dvou dynamometrů pro měření energie. Zablkování bylo realizováno pomocí vyvaření zubových mezer v satelitech diferenciálu. Na Obr.10a je zachycen celý diferenciál, Obr.10b znázorňuje záběr satelitu po vyražení hřídele a potočení, na Obr.10c jsou satelity po úpravě.



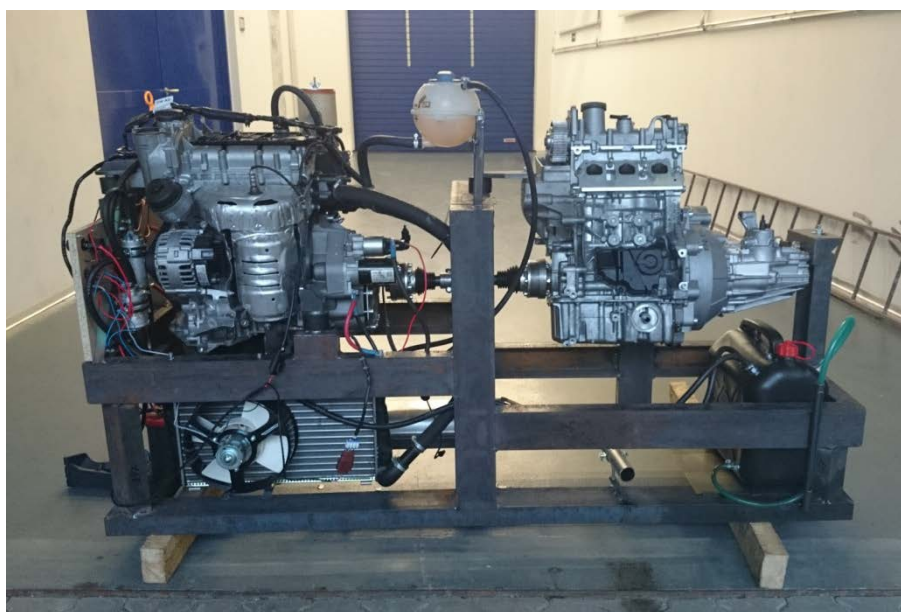
Obrázek 10: a.) diferenciál, b.) záběr satelitu, c.) satelity po úpravě

Jako předposlední článek celého řetězce toku energie do dynamometru figuruje standardní hnací poloosa z automobilu Citigo, do kterého se právě převodovky MQ100 montují. Posledním prvkem, který bylo nutné použít a upravit je náboj kola, úprava směřovala k možnosti uchycení tohoto náboje na přírubu dynamometru. Náboj obsahuje drážkování, které by bylo samostatně velice těžko vyrobitelné, a proto byl použit a upraven právě náboj kola. Bylo nutné náboj opravit, vyvrtat nové díry pro šrouby a vyrobít nový středící válec jako náhradu původního ložiska. Bylo zvoleno uchycení pomocí čtyř šroubů M10. Náboj částečně obroben s koncem poloosy je zachycen na Obr.11a, náboj plně obroben je na Obr.11b, náboj již namontován do příruby dynamometru je zachycen na Obr.11c.



Obrázek 11: a.) náboj a konec hn. hřídele, b.) upravený náboj, c.) namontovaný náboj

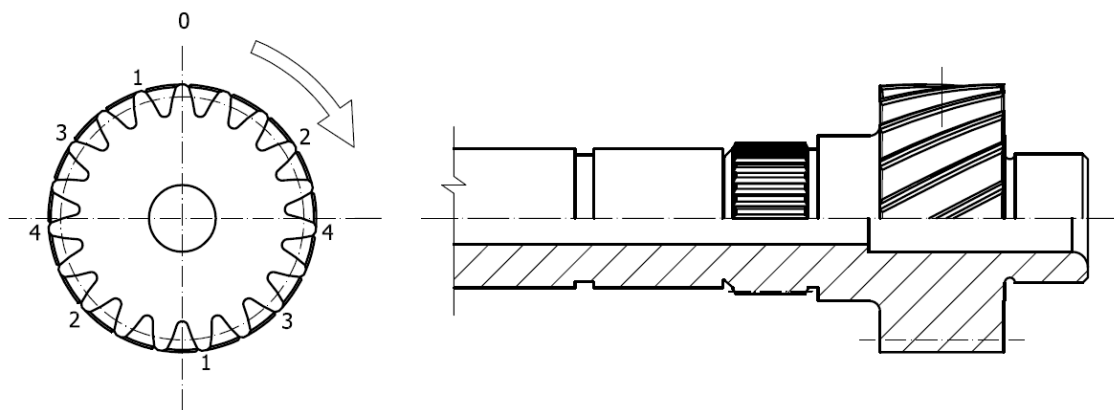
Všechny výše uvedené části jsou sestaveny do zařízení, u něhož je nosnou částí rám z ocelových profilů U100. Závěrem kapitoly pojednávající o mechanických součástech zařízení lze názorně na obrázku ukázat celý stav již ve stavu umožňujícím jeho funkci- Obr.12, stav na fotografii není připojen k dynamometru.



Obrázek 12: zařízení (stav) pro zatěžování a měření na převodovce MQ100

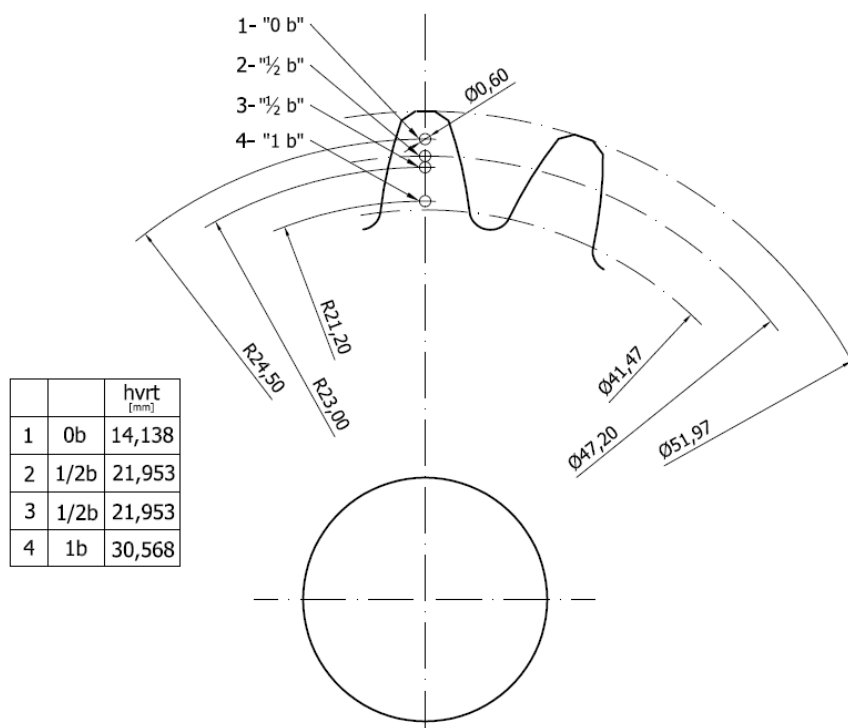
2.2 Zástavba elektronické části

Dalším bodem bylo řešení zástavby snímačů zařízení popsaného v [1,2,3] do převodovky. Zvoleno bylo měření v ozubení pastorku stálého převodu. Byla navržena místa zástavby celkem osmi termistorů. Vždy dva termistory jsou umístěny na stejných geometrických pozicích, ale na jiných zubech, aby bylo možné vždy porovnání shody hodnot ze dvou snímačů. Jejich rozložení je voleno vzhledem k pevnosti zubů a záběrovým poměrům (ϵ), tak aby mezi dvěma zuby osazenými snímači byl vždy jeden bez úprav. Rozložení je zachyceno na Obr.13. Číslo označuje specifickou polohu otvoru pro termistor dle dále zmíněných geometrických parametrů.



Obrázek 13: Rozložení čidel teploty po obvodu ozubeného kola

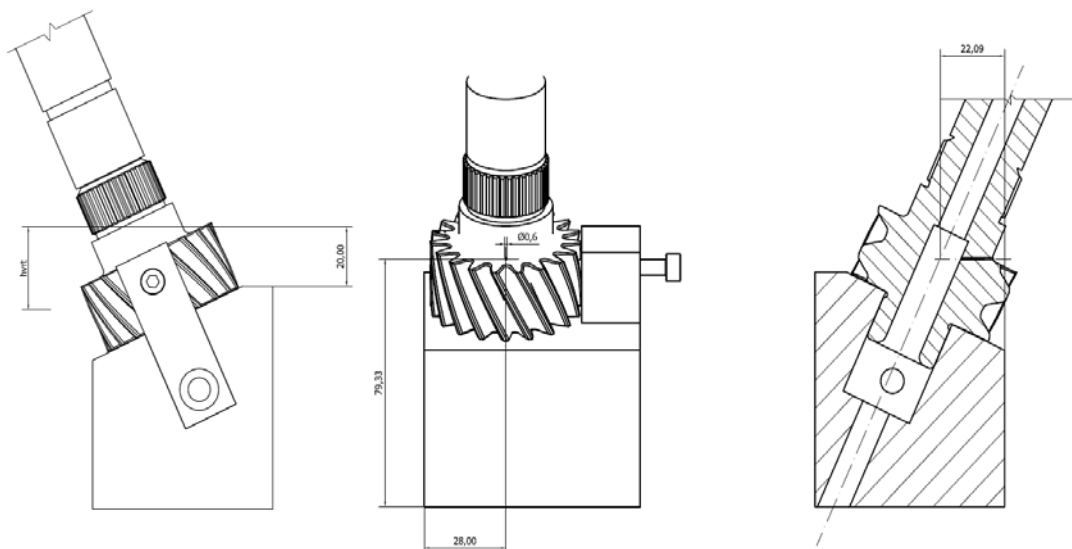
Voleny jsou také průměry umístění, tedy umístění v různých výškách zubů. Tyto průměry jsou zachyceny na Obr.14.



Obrázek 14: Rozdělení otvorů pro čidla teploty po výšce zubu

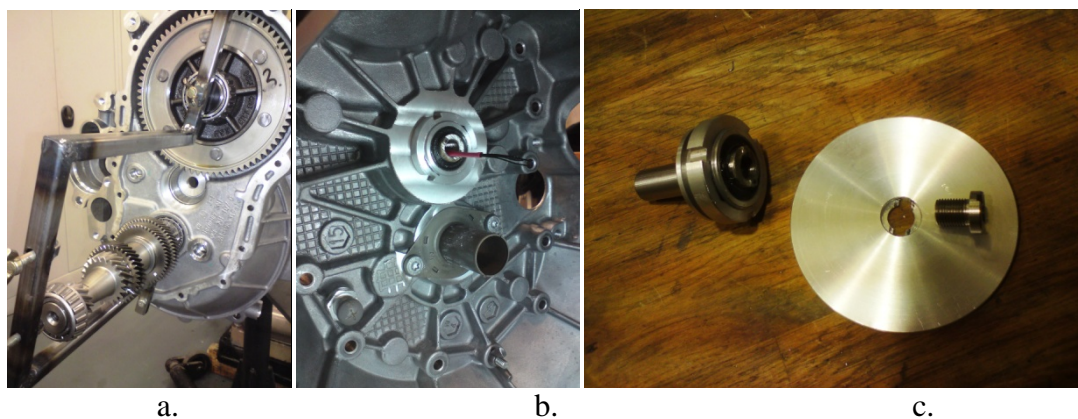
Tabulka na Obr.14 přiřazuje každému otvoru jeho číslo (1-4). Dále jsou voleny polohy po délce zubů a právě tuto hodnotu značí index "Xb" (také v tabulce). Poloha "0b" odpovídá umístění termistoru ve vzdálenosti cca.5mm od čelní roviny ozubení, stejná je i poloha "1b" jen s tím rozdílem, že je měřena z protějšího čelní roviny. Poloha "1/2b" leží v půlce šířky ozubení.

Pro hloubení otvorů byl vyroben přípravek, který zajišťuje hřídel ve správné poloze a to pod úhlem β ($\beta=24,75^\circ$) vůči podložce. Dále přípravek zajišťuje správnou polohu natočení hřídele, hřídel je aretován kuličkou $\varnothing 6\text{mm}$ vtlačovanou do zubové mezery. Přípravek je využíván po upnutí do univerzálního svěráku, po jeho upnutí v horizontální lze hloubit i otvory "kolmé" k podélné ose hřídele. Přípravek je zachycen na schématu Obr.15. Hloubení je realizováno metodou elektroerozivního obrábění. Výsledné velikosti otvorů jsou 0,6mm.



Obrázek 15: Přípravek pro hloubení otvorů pro čidla teploty

Po vyhloubení otvorů do hřídele a pastorku bylo nutné konstrukčně upravit a zajistit průchod vodičů na rotor vně převodovky. Pro uchycení převodovky byl využit univerzální montážní stojan a pro aretaci hřídelů v jejich přibližných polohách byl vyroben přípravek- Obr.16a. Na Obr.16a je také patrný otvor kudy prochází vlisované prodloužení hřídele skrz průchodku s těsnícím kroužkem, tento otvor již opatřený průchodkou je patrný na Obr.16b. Na Obr.16c jsou zachyceny součásti pro zajištění vývodu vodičů a umožnění montáže rotoru, jsou to: prodloužení hřídele pro nalisování do jejího vrtání, průchodka s těsnícím kroužkem, deska pro uchycení rotoru, šroub pro upevnění nosné desky rotoru.



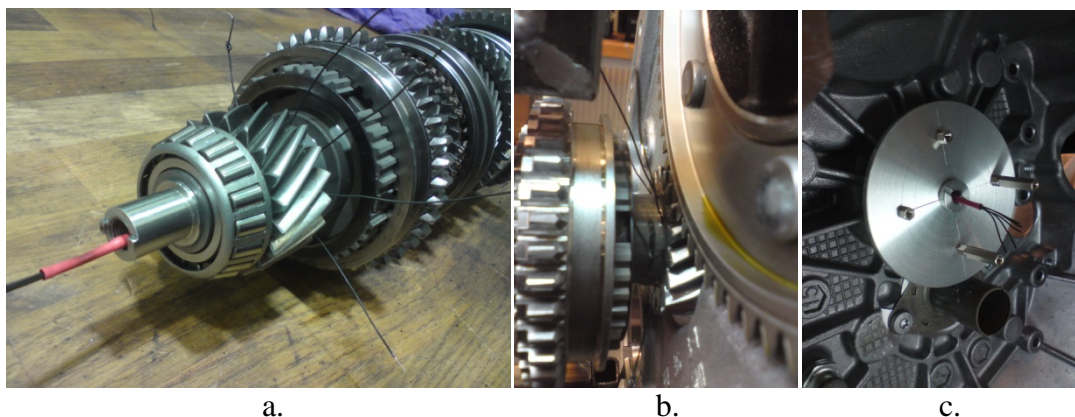
a.

b.

c.

Obrázek 16: a.) přípravek-aretační hřídelů b.) průchodka c.) nosné části elektroniky pro měření

Na Obr.17a je zachycen již nalisovaný díl pro prodloužení hřídele a je zde také patrné umístění montážních kabelů, do jejichž izolace lze zasunout konce termistorů a následným pohybem je protáhnout skrze otvory pro jejich vedení. Na Obr.17b jsou tyto montážní kabely již "uvnitř" skříně převodovky, z této pozice se termistory s vodiči zasouvají do otvorů vyhloubených v čelní rovině kola. Po aplikaci termistorů dochází k jejich lepení a těsnění zbylých otvorů za pomoci silikonového tmelu. Na Obr.17c je ještě zachycena deska k montáži rotoru s elektronikou pro měření.



Obrázek 17: a.) prodloužení hřídele b.) montážní kabely c.) deska rotoru elektroniky

Statorová část měřicí elektroniky je uchycena na bloku motoru proti rotoru v ose rotace, vzhledem k principu přenosu dat.

3 Závěr

Tato práce pojednává a v krátkosti popisuje stavbu mechanické části, úpravu sériových dílů a výrobu speciálních dílů pro zařízení určené k zatěžování a následnému provádění měření na převodovce MQ100 Škoda Auto a.s.. Dále krátce popisuje zástavbu elektronického zařízení pro měření teplot v blízkosti boků zubů ozubených kol (pastorku stálého převodu). Práce nabízí některá konstrukční a technologická řešení pro další využití v technické praxi s důrazem na technická měření. Zařízení je výjimečné tím, že je měření možné provádět na reálné převodovce a nikoliv jen na experimentálním soukolí. Na zařízení je dále možné zkoumat vlivy maziv, vibrace a případně i lehké zkoušky životnosti převodovek. Celá problematika je obsáhlejší a překračuje rámec této práce, proto bude dále rozvedena v dalších publikacích.

Literatura

- [1] Mazač M.: Měření teplot ozubených kol v reálném provozu, Studentská vědecká a odborná činnost 2014, TUL, 28.5.2014, ISBN 978-80-7494-071-2
- [2] Mazač M., Herajtn P., Svoboda M.: The Equipment for Temperature Measurements near a Gear Tooth Flank, 55th International Conference of Machine Design Departments (ICMD2014), Beroun, September 9.-12.2014, ISBN 978-80-01-05542-7
- [3] Mazač, M., Herajtn, P., Svoboda, M.: The Gear Tooth Flank Temperature Measurements System, Transactions on Electrical Engineering, Vol. 4 (2015), No. 1, p. 27-30, ISSN 1805-3386

VLIV VYŠŠÍHO OBSAHU KŘEMÍKU NA VLASTNOSTI LITINY S KULIČKOVÝM GRAFITEM

Řidký Ondřej

Sekce – STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 3. ročník

Doktorský studijní program – STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE

Abstrakt: Dosavadní výzkumy ukazují, že zvýšením obsahu Si u litiny s kuličkovým grafitem může u běžně používané EN-GJS 500-7 s feriticko-perlitickou strukturou, kompenzovat velké rozdíly v tvrdosti a mechanických vlastnostech, jelikož vyšší obsah Si podporuje tvorbu feritické matrice a to i u tenkých stěn odlitků. Běžně dosud používaná EN-GJS 500-7 má různý poměr feritu a perlitu v matrici a to závislosti na tloušťce stěny odlitku. Bylo proto odlito několik zkušebních taveb, u kterých se provádělo metalografické hodnocení a měření tvrdosti a meze pevnosti v tahu. Při výrobě odlitků se také stanovovalo vhodné složení vsázky pro výrobu této litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si.

Klíčová slova: litina s kuličkovým grafitem, vyšší obsah Si, mechanické vlastnosti, měření tvrdosti

1 Úvod

Stále zvyšující se požadavky na bezpečnost a snižování emisí CO₂ vedou k vývoji nových materiálů nebo k vylepšování vlastností těch stávajících. V tomto případě se jedná o snížení rozptylu mechanických vlastností u odlitků z LKG, a tím zlepšit využitelnost materiálu a snížit tak hmotnost dílů. Důvodem výroby litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku vedl fakt, že běžně používané litiny s kuličkovým grafitem vykazovali u odlitků s rozdílnou tloušťkou stěny nejen velké výkyvy tvrdosti, ale i rozptyl mechanických vlastností, jako je pevnost a tažnost. Kde rozptyl hodnot tvrdosti byl následkem různé struktury v odlitku. V tenkých stěnách se vyskytuje převážně perlit a ve stěnách s větší tloušťkou se naopak vykytuje více feritu. Rozdíly ve struktuře měly mimo jiné i za následek zhoršení obrobitelnosti. Výzkumem této litiny se zabývali dva vědci L. E. Björkegren a K. Hamberg ze Švédska. Výroba této litiny s kuličkovým grafitem a vyšším obsahem křemíku se řídila normou ISO 1083:2004. Tyto litiny by do budoucna mohly v určitých případech nahradit dosud používané litiny EN-GJS 400-15 s mezí pevnosti 400 [MPa] a tažností 15 [%] a EN-GJS 500-7 s feriticko-perlitickou strukturou, pevností 500 [MPa] a tažností 7 [%]

2 Výroba litiny s kuličkovým grafitem s vyšším Si

2.1 Výroba taveniny

Tavby byly prováděny v kelímkové středofrekvenční indukční peci IO 40 (Obrázek 1) pro maximální množství 40 kg taveniny (výrobce je firma Indukce, s.r.o.). Pec byla opatřena kyselou vyzdívkou (Calderys SILICA MIX 7A). Pro odlévání byla použita hluboká modifikační pánve vhodná pro polévací metodu. Tato pánve je opatřena přepážkou ve spodní části, do které se umísťuje modifikátor a očkovač pro první stupeň očkování. Vyzdívka pánve byla kyselá (obchodní název ACYKUP). Vsázkový materiál byl připraven pro všechny tavby zvlášť. Pro přípravu vsázky bylo použito surové železo s obchodním názvem

SORELMETAL, dále vratný odpad z předchozích námi provedených taveb a vratný odpad z Komerční slévárny šedé a tvárné litiny Turnov.

Bylo provedeno několik taveb, ve kterých se zvolilo rozdílné chemické složení, nejdůležitějším parametrem bylo množství křemíku. Použité množství předslitin (grafitizační očkovač FeSi75 a Superseed, modifikátory KVZ a FeSiMg) bylo stanoveno na základě výpočtu vzhledem ke konečnému obsahu křemíku. Vsázka byla zahřátá na teplotu 1450 °C, to proto, aby tavenina před odléváním do forem měla teplotu okolo 1400 °C. Teplota taveniny se stanovovala optickým pyrometrem (Obrázek 1) Modifikační a zároveň licí pánve byla předeřtá na teplotu cca 600 °C pro snížení rychlosti ochlazování taveniny po nalití do pánve a během modifikace. Do pánve bylo vloženo odvážené množství modifikátoru FeSiMg a očkovač FeSi75, vše bylo zakryto drobnými ústřížky karosářského plechu, popřípadě litinovými třiskami. Po rozpuštění modifikátoru, následoval druhý stupeň očkování, při kterém se rozptýlilo dané množství očkovač Superseed na hladinu taveniny v pánvi.

Po promíchání taveniny byla zjištěna teplota taveniny optickým pyrometrem a následovalo odlévání zkušebních odlitků při teplotě 1400°C.

Tabulka 1: Složení vsázky jednotlivých taveb.

Označení Tavby	Složení vsázky [kg]			
	SORELMETAL	Vrat	FeSi75	FeMn65
1	16	-	0,39	-
2	27	-	1,1	-
3	14,5	14,7	0,2	0,1
4	6,5	21,2	0,19	-
5	7,5	19,1	0,05	-
6	5,1	12,4	-	-



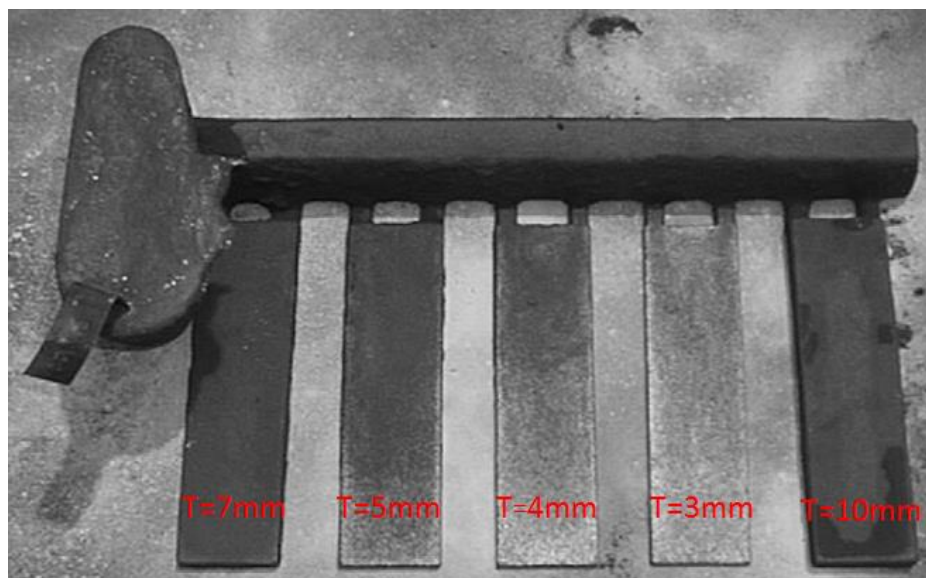
Obrázek 1: Měření teploty optickým pyrometrem v indukční peci.

2.2 Slévárenská forma

Byla použita bentonitová formovací směs, ostřivem byl křemenný písek Střeleč T2S, ze 7 hmotnostními procenty pojiva bentonit Speciál 550, 3 hmotnostní procenta vody a 4 hmotnostní procenta kamenouhelné moučky, (snížení penetrace taveniny mezi zrna ostřiva). Formovací směs v rámech byla upěchována a před složením obou ráků byl líc formy postříkán vodním roztokem melasy (zpevnění líce formy) a posypán kamenouhelnou moučkou.

2.3 Výroba zkušebních odlitků

Byly odlévány zkušební odlitky tvaru desky (Obrázek 2). Rozměry odlévaných desek byly 160 x 43 mm, tloušťky 3, 4, 5, 7, 10 mm. Současně byly odlévány i zkušební tyče Ø 30 x 115 do formy z CT směsi. Dále byly vyráběny i odlitky Y bloků, typ II, a také vzorky pro zjištění chemického složení litiny (destičky průměru 35 x 5 mm, pro chemickou analýzu).



Obrázek 2: Tloušťky jednotlivých destiček a jejich poloha vůči vtokové soustavě.

2.4 Metalografické hodnocení odlitků

Vzorky pro metalografické pozorování byly odřezány ze zkušebních destiček, pomocí metalografické pily s chlazením, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění struktury. Vzorky odlitků pro metalografické pozorování byly připraveny běžným metalografickým způsobem (zalaty do Dentacrylové pryskyřice a řádně označeny, broušeny na metalografických bruskách a leštěny na leštících kotoučích s použitím leštící kapaliny pro litinu). Metalografické pozorování struktury připravených vzorků bylo provedeno na světelném mikroskopu Neophot 21 (výrobce Carl Zeiss Jena, SRN). Vzorky byly na mikroskopu pozorovány v neleptaném a leptaném stavu. K naleptání struktury litiny byl použit Nital 2,5. Při sledování tvaru, velikosti a rozložení grafitu byly metalografické vzorky sledovány v neleptaném stavu dle ČSN 420461 při 100 násobném zvětšení. V naleptaném stavu byla hodnocena struktura základní kovové hmoty (matrice) litiny při 100 násobném zvětšení. Získané struktury byly sledovány digitální kamerou a vyhodnoceny pomocí normy ČSN 42 0461. Získané struktury vzorků jsou zaznamenány na níže uvedených obrázcích (Tabulka 3), vždy jeden vzorek z tavby (destička tloušťky 3 mm) a výsledné hodnocení struktury vybraných destiček je v Tabulce 2.

Tabulka 2 : Metalografické výbrusy pro destičky tloušťky 3mm.

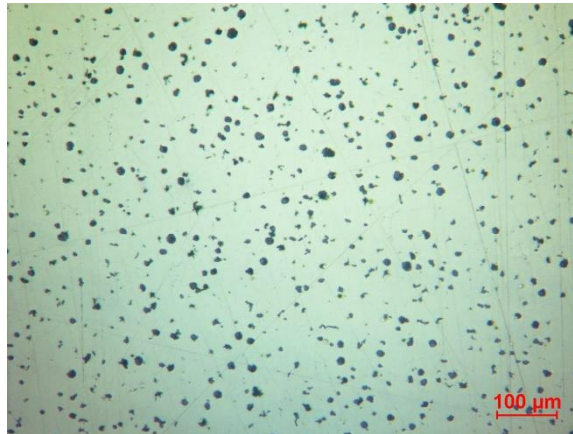
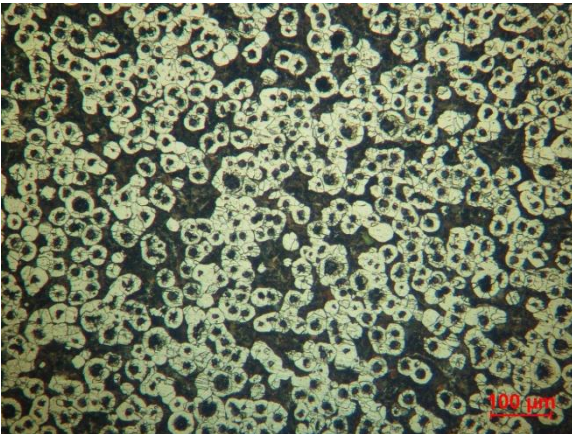
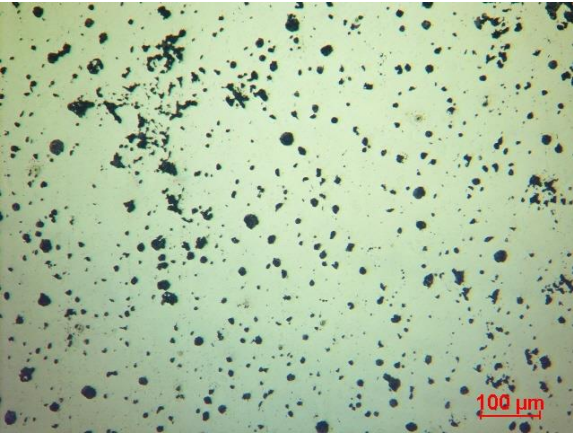
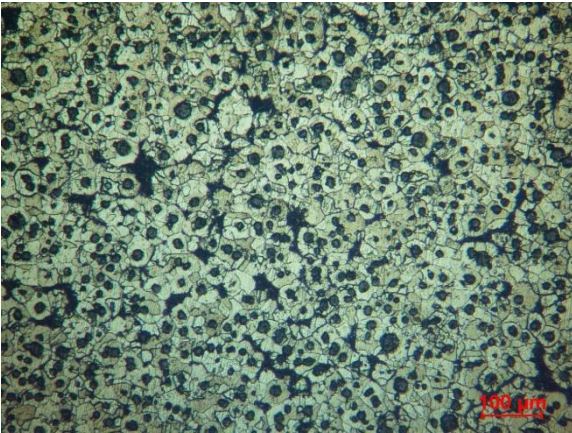
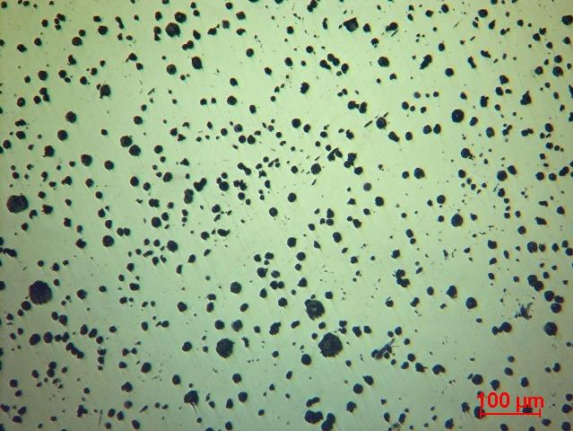
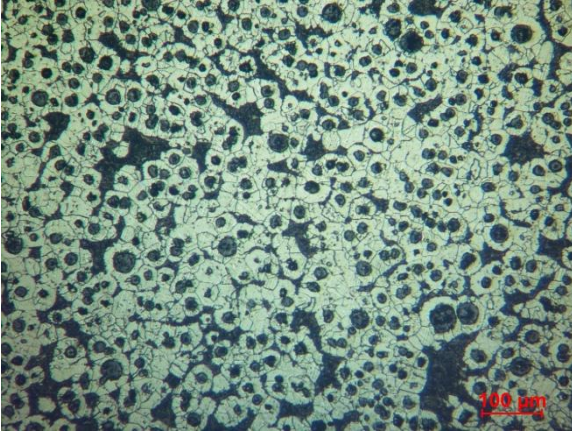
Tavba	Obsah Si [%]	Tloušťka destičky [mm]	Struktura litiny	
			Tvar a velikost grafitu	Charakter základní hmoty
1	2,7	3	70% VI 8, 30% V 8 P20	P20
2	3,83	3	70% VI 8 -7, 30% V 7	P0
3	3,49	3	80% VI 7-8, 20% V 8	P6
4	3,86	3	60% VI 8-6, 40% V 8	P20
5	3,47	3	70% VI 7-5, 30% V 7	P45
6	4,1	3	30% VI 8-7, 60% V 8-7, 10% III 7	P20

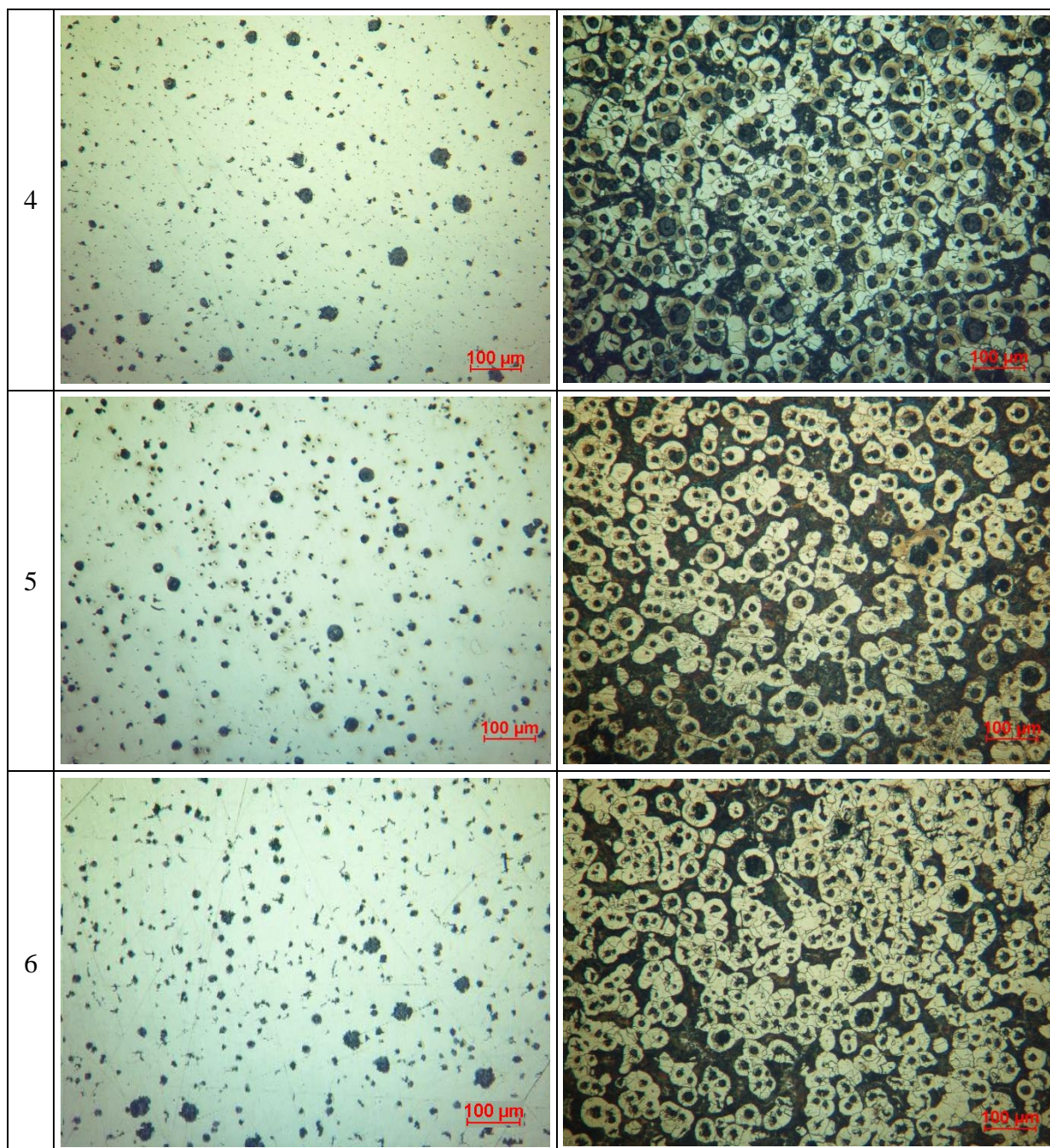
Tvar grafitu : **III**- červíkovitý, **V**-nedokonale zrnitý, **VI**- pravidelně zrnitý

Velikost grafitu: **8**= do 15 μm, **7**=nad 15 do 30 μm, **6**=nad 30 do 60 μm, **5**=nad 60 do 120 μm

Obsah perlitu: **P0**= do 2%, **P6**= nad 2 do 10%, **P20**= nad 10 do 30%, **P45**= nad 30 do 60%

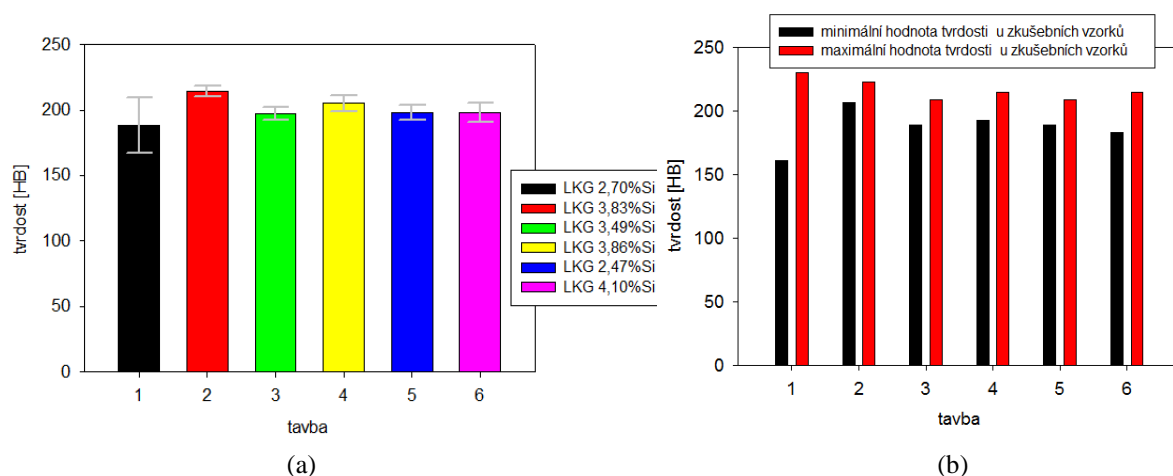
Tabulka 3: Metalografické výbrusy z destiček tloušťky 3 mm při 100 násobném zvětšení.

tavba	neleptáno	Leptáno Nital 2,5
1		
2		
3		



2.5 Měření tvrdosti

Měření tvrdosti bylo prováděno na odlitých zkušebních destičkách. Pro měření tvrdosti byla použita metoda podle Brinella, použit byl tvrdoměr firmy Carl Zeiss. Zkušebním tělískem byla kulička z kalené oceli o průměru 5 mm, zatížení 7355 N (750 kp), doba měření tvrdosti byla přibližně 30sekund, rozměr vtisku byl změřen pomocí optického měřidla a to vždy ve dvou na sebe kolmých směrech, ze střední hodnoty se stanovila výsledná tvrdost. Výsledné hodnoty byly statisticky vyhodnoceny a zaneseny do grafů (obrázek 3). Odlitky byly před měřením tvrdosti obroušeny a zbaveny licí kůry a nečistot. Tvrdost destiček se měřila ve čtyřech bodech u vtoku a ve třech bodech na opačném konci.



Obrázek 3: (a) statistické vyhodnocení tvrdostí destiček v jednotlivých tavbách, (b) porovnání minimálních a maximálních hodnot destiček v jednotlivých tavbách.

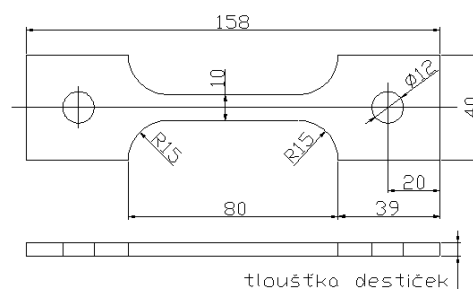
2.6 Měření meze pevnosti v tahu

Zkušební vzorky pro měření meze pevnosti v tahu byly zhotoveny ze zkušebních odlitků (destičky různé tloušťky, Obrázek 4). Další zkušební vzorky (tyčky) byly vyrobeny z Y bloků.

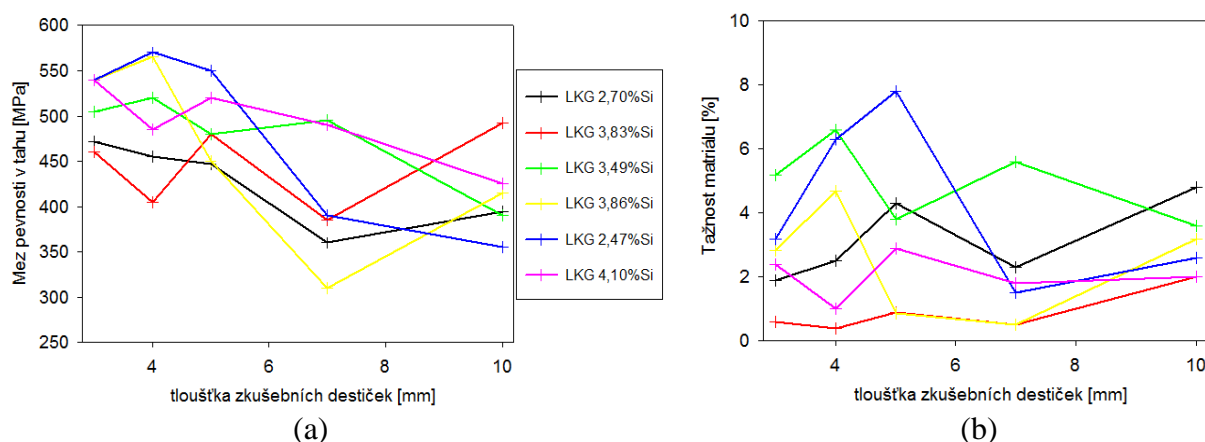
Pro měření pevnosti v tahu byl použit trhací stroj TIRA test 2300 a laserový extenzometr (firmy Fiedler optoelektronik GmbH), který slouží k zaznamenání prodloužení.

Tabulka 4: Hodnoty získané z tahové zkoušky zkušebních těles vyrobených z Y bloků.

Tavba	Mez pevnosti v tahu [Mpa]	Tažnost [%]
1	440	20,7
2	570	23,4
3	505	22,4
4	530	23,1
5	500	24,1
6	495	25,3



Obrázek 4: Zkušební těleso vyrobené z destičky.



Obrázek 5: (a) Mez pevnosti v tahu stanovená ze zkušebních těles pro různé tavby, (b) Tažnost materiálu stanovená ze zkušebních těles pro různé tavby.

3 Diskuze

Cílem této práce bylo stanovit metodiku výroby a vhodné složení vsázky pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku. K vyhodnocení bylo použito metalografických výbrusů, kde se hodnotilo rozložení, velikost a tvar grafitu. Po následném leptání se hodnotila základní kovová hmota. Měření tvrdosti probíhalo na zkušebních odlitcích, ze kterých byla odstraněna licí kůra a nečistoty. Hodnota tvrdosti se zjišťovala ve vybraných oblastech. Statická zkouška pevnosti v tahu sloužila ke stanovení meze pevnosti v tahu. Výše popsaná měření byla zhotovena pro 6 taveb, kde se volily různé kombinace vsázkového materiálu, u kterých se hlavně sledoval rozdílný obsah dvou základních prvků křemíku a uhlíku. V neposlední řadě množství modifikátoru a postup očkovaní. Na základě vyhodnocení dílčích pokusů lze stanovit několik podmínek, které musí být dodrženy, aby bylo dosaženo litiny s kuličkovým grafitem s feritickou strukturou a pevností v tahu 500 MPa:

a) Základem výroby LKG s vyšším obsahem Si je nutný pečlivý výběr vsázky tak, aby obsah škodlivých prvků S a P byl co nejnižší. Při dodržení feritické struktury je nutno věnovat pozornost karbidotvorným prvkům, které se v běžném vratu vyskytují (Mn, Cu, Sn, Cr, a další karbidotvorné prvky) a složit vázku tak, aby byl dodržen zvýšený obsah Si. V tomto případě pro zvyšování obsahu křemíku ve vsázce sloužilo očkovaadlo FeSi75.

b) Tavicí agregát ovlivňuje zárodečný stav taveniny, čím je vyšší teplota tavení tím se zárodečný stav zhoršuje. Z toho důvodu je vhodná indukční středofrekvenční pec, ve které je možné ohřát taveninu na požadovanou teplotu konstantně v celém objemu s minimálním propalem Si a C a zajistit tak dobrý výchozí stav pro získání kvalitních odlitků. Před přelitím taveniny do pánve s modifikátorem a očkovaadlem je nutné dodržet její teplotu tak, aby proběhla modifikace a očkování. Jakmile tyto děje proběhnou, je nutné začít odlévat, kvůli odeznívajícím účinkům modifikace a očkování a poklesu teploty taveniny.

c) Konstrukce formy je rovněž důležitá pro dosažení kvalitních odlitků. Jedná se zejména o způsob provedení vtokové soustavy s ohledem na plnění dutiny formy. Při následném tuhnutí a chladnutí je nutné zachování směru tuhnutí od nejvzdálenějších míst odlitku ke vtoku, popřípadě nálitku. Zamezit vzniku tepelných uzlů, které jsou místem vzniku ředin a porezity. A v neposlední řadě úprava líce formy pro zamezení vzniku povrchových vad odlitku.

4 Závěr

Shrnutím výše uvedených výsledků získáme informace o možnostech výroby do jisté míry specifické litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku. S tímto typem litiny v našich slévárnách nejsou zkušenosti. Prvními výrobci této litiny jsou L. E. BJÖRKEGREN a K. HAMBERG, kteří se zabývali vývojem pro automobilový průmysl, kde se využívají materiály, které vykazují vysokou hodnotu tažnosti. Tato vlastnost je důležitá pro zvýšenou bezpečnost osádky automobilů. Dodržení tažnosti je problémem u tenkých stěn odlitků.

Výzkum prováděný s litinou s kuličkovým grafitem potvrzuje, že tento materiál z metalurgického hlediska nevyžaduje žádná zvláštní metalurgická opatření. Jediným rozdílem, oproti běžně vyráběným jakostem litiny s kuličkovým grafitem, je pouze vsázkový poměr běžných surovin a jejich vysoká kvalita s pečlivým uvážením použití vratných odpadů. Při dodržení těchto zásad, jež platí i pro běžnou výrobu litiny s kuličkovým grafitem, a při dodržování předpisů normy *ISO 108:2004* týkajících se limitních obsahů prvků potlačujících feritickou základní kovovou hmotu, není důvod ke vzniku problémů při výrobě tohoto materiálu. Pro jeho výrobu, tj. LKG s vyšším obsahem křemíku je nutné, aby vyráběná litina obsahovala max. 3,9 % Si. K její výrobě lze doporučit středofrekvenční indukční pec a odlévací pánev (Sendwich) s kyselou vyzdívkou.

Pro tavicí pec o objemu taveniny 40 kg lze doporučit z výsledků měření tvrdosti (Obrázek 3) tavby 2 až 6 (obsah Si 3,83%, 3,49%, 3,86%, 3,47% a 4,10%). U taveb 2 až 6 se tvrdost pohybovala okolo 200 HB a rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou tvrdosti v tavbě u destiček 3 až 10 mm se pohybovala okolo 20HB. Je tedy patrné, že zvyšující se obsah křemíku rozptýl tvrdosti snižuje, protože tavba 1 obsahovala pouze 2,70% Si a rozdíl mezi minimem a maximem byl 69 HB.

Z hlediska velikosti a tvaru grafitu (Tabulka 2 a 3), už výsledky nejsou tak jednoznačné. U taveb 1 až 5 převažoval kuličkový grafit rovnoměrně i nerovnoměrně zrnitý velikosti 8 až 7 což odpovídá velikosti 0 až 30 μ m. Tavba 6 obsahovala červíkovitý grafit. Dalším hodnotícím kritériem byl obsah perlitu, kde pouze tavba 2 neobsahovala více jak 2% perlitu u destičky tloušťky 3mm. U ostatních taveb se obsah perlitu pohyboval až do 45% (Tabulka 2)

Mez pevnosti a tažnosti byla brána, jako průměrná hodnota, takže se jedná spíše o informativní veličiny a nemají vypovídající hodnotu o daném materiálu. Z hlediska pevnosti v tahu, kterou norma předepisuje pro stěny tloušťky 15 až 30 mm, mají vzorky zhotovené z Y bloků, (Tabulka 4) pevnost v tahu okolo 500MPa. Výjimku tvoří tavba 1, její pevnost v tahu byla 430MPa. Nejvyšší pevnost byla zjištěna u tavby 2, dosahovala hodnoty 570MPa. Tažnost všech vzorků z Y bloků, (Tabulka 4) přesáhla 20%. Tažnost a pevnost zkoušená u destiček tloušťky 3 až 10 mm. Může být do velké míry ovlivněna porezitou materiálu v tomto ohledu, však nebyly prováděny experimenty na zjištění poróznosti.

Shrnutím výše uvedených závěrů se jako nejvhodnější složení vsázky pro indukční pec jeví tavba 2 složená z 27 kg SORELMETALU a 1,1 kg FeSi75. Tavenina byla před odlitím očkovaná 0,16 kg FeSi75 a 0,11kg Superseed, pro modifikaci bylo použito 0,0043kg KVZ a 0,43 kg modifikátoru lamet 5504 (modifikátor na bázi Fe-Si-Mg s obsahem okolo 5,5 % Mg). Výsledky všech měření byly více či méně ovlivněny, jelikož se jedná o provádění taveb s malým množstvím roztaveného kovu, kde dochází k rychlému ochlazení taveniny a vlivem prodlev mezi jednotlivými operacemi zpracování taveniny (modifikace a očkování) mohlo dojít k poklesu teploty pod 1400°C, což vede ke zvyšování množství perlitu v tenkých destičkách zkušebních odlitků.

Literatura

- [1] NOVÁ, I.: Teorie Slévání, 2. díl Teoretické základy metalurgie slévárenských slitin, TU v Liberci, 2007.
- [2] ŠMRHA, J.: Vliv zvýšeného obsahu křemíku na mechanické vlastnosti tenkostěnných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. [Doktorská práce]. KSP – FS, TU v Liberci 2009.
- [3] TVRZNIČEK, P.: Metalurgické vlivy na výrobu tenkostěnných odlitků pro automobilový průmysl z LKG s vyšším obsahem křemíku. [Bakalářská práce]. KSP – FS, TU v Liberci, 2009.
- [4] ČSN 42 0461: Hodnocení metalografické struktury litin, ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, Praha, 1.12.1975.
- [5] L. E. BJÖRKEGREN a K. HAMBERG: Ductile iron with better machinability compared to conventional grades. Foundryman - Technical paper, Ductile iron, December 1998 p. 386 to 391.
- [6] KERSAY, S.: tvárná litina. 1. vyd. Fomplex, s.r.o., Trenčín, 1995, ISBN 80-967498-8-9.
- [7] ŘÍDKÝ ONDŘEJ: Litina s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku.[Diplomová práce]. KSP – FS, TU v Liberci, 2012.

ANALÝZA ODEZVY ROTORU NA KINEMATICKÉ BUZENÍ ZÁKLADU

Bc. David Svoboda

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 3. ročník

Navazující magisterský studijní program – APLIKOVANÁ MECHANIKA

Abstrakt: Práce se zabývá problémem rotorové dynamiky. Je zkoumána dynamická odezva kinematically buzeného rotoru. Studii může reprezentovat například rotor turbodmychadla, do kterého jsou přenášeny vibrace z motoru skrz ložiska. Rotor je modelován metodou konečných prvků a výsledky jsou otestovány v softwaru MSC.Adams. Metoda konečných prvků popisuje hřídel, kotouče jsou uvažovány jako tuhé. Kompletní model rotoru včetně ložisek je podroben modální analýze a dynamické simulaci. Všechny výpočty jsou provedeny v matematickém softwaru Scilab.

Klíčová slova: rotorová dynamika, kinematische buzení, metoda konečných prvků

1 Úvod

V oblasti rotorové dynamiky byla již řešena spousta typů úloh. Ať z hlediska různých typů zatížení, tak i druhu uložení, případně soustavy rotorů. Převážná většina prací ale zkoumá dynamické účinky rotoru na své okolí, nebo vyšetřuje dynamiku rotoru uloženého v inerciální soustavě. To znamená vlastní pohyb, vliv použitých ložisek a podobných dalších modifikací. Dále například i vliv nevyváhy rotoru, efekt fázového natočení nevyvážených kotoučů [1]. Tato práce se zabývá typem úlohy, kdy je uvažován ideálně vyvážený rotor, tím je předcházeno vzniku dynamických sil vzniklých nevyváhou. Uvažováno je ale uložení rotoru v neinerciální soustavě. Tím je zkoumán pouze vliv kinematische buzení na dynamiku rotoru bez ovlivnění výsledků dalšími externími účinky. Práce, která se například zabývá externím buzením [2] zjistila, že buzení rotoru v hydrodynamických ložiskách ovlivňuje amplitudy vibrací, ale neovlivňuje mez stability. Zpravidla se práce na toto téma zabývají, jak potlačit vibrace rotoru externím buzením [3]. Myšleno je řízené buzení. Cílem této práce nebylo zkoumat aktivní buzení, ale jak náhodné kinematische buzení ovlivní dynamické chování rotoru. Takovýto koncept práce nalezen nebyl.

2 Tvorba MKP modelu rotoru

K popsání vlastního rotoru je možno použít mnoho fyzikálních metod. Lze zanedbat hmotu pružných členů a uvažovat pouze hmotu tuhých členů systému, nebo diskretizovat hmotu pružného členu do jednotlivých uzlů spojených nehmotným členem, nebo popisovat systém jako kontinuum. Vše záleží na typu rotoru, čímž se myslí poměr hmotových charakteristik nábojů (kotoučů), které jsou usazeny na hřídeli, vůči hmotě vlastního hřídele. Nejvíce odpovídající realitě je popisovat systém jako kontinuum. Proto i v této práci byl tento typ popisu použit. Kontinuum lze popisovat dvěma způsoby. Buď využít analytický popis, anebo je výhodnější použít univerzální metodu pro řešení diferenciálních problémů na určité řešené oblasti. Tím je myšlena metoda konečných prvků. Touto cestou se dosáhne maximální obecnosti popisu úlohy, díky které se nezanedbá žádná hmota. Zároveň musí být brán zřetel

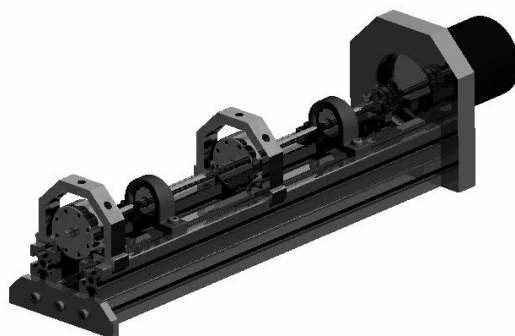
na to, že je to metoda aproximační, numerická, tedy je zapotřebí připravit dostatečně kvalitní model, metody řešení a provést kvalitativní rozbor výsledků.

Vlastní rotor se skládá ze tří hlavních částí. Tyto části jsou hřídel, náboje (což mohou být ozubená kola, turbíny, větráky atd.) a uložení. Dále do popisu patří i vlastní zatížení, které spolu s uložení tvoří okrajové podmínky problému.

V drtivé většině aplikací je hřídel kruhového průřezu s délkou značně převyšující jeho průměr. Proto ho lze popsat jako jedno-dimenzionální kontinuum (využijeme osové symetrie) pomocí konečných prvků [5]. Použité konečné prvky byly tedy typu “beam“, neboli nosníkové prvky. Na nich se hledaly posuvy a natočení. Při odvození byl předpoklad zachování kolmosti roviny průřezu vzhledem k deformované ose prvku (Bernoulliho – Navierova hypotéza). Tím se zanedbává vliv posouvajících sil v průřezu.

Jelikož nebyl k dispozici speciální software pro řešení rotorových soustav, tak byla celá úloha naprogramována. Protože vlastní otáčky hřídele mají své důsledky, které nelze zanedbat a lze také popsat jakákoliv ložiska, zatížení, získat výstupy z programu jaké potřebujeme apod. Díky takto vlastněmu vytvořenému programu nám nejsou kladeny meze v analýze rotoru oproti konvenčnímu softwaru, ve kterém by toto nebylo možné.

Simulovaný rotorový systém v této práci je katedrové laboratorní zařízení pro demonstraci jevů rotorové dynamiky. Ten lze vidět na obrázku 1. Kompletní informace a technickou dokumentaci nalezneme v literatuře [12]. Rotor je navržen tak, aby byl hřídel dostatečně pružný a kotouče dostatečně tuhé, aby se vlastní frekvence hřídele a kotoučů vzájemně neovlivňovali. Uložen je v samomazných kluzných ložiskách. Poháněn je elektromotorem přes pružnou lamelovou spojku. Všechny části rotoru potřebné do výpočtu byly detailně rozebrány.

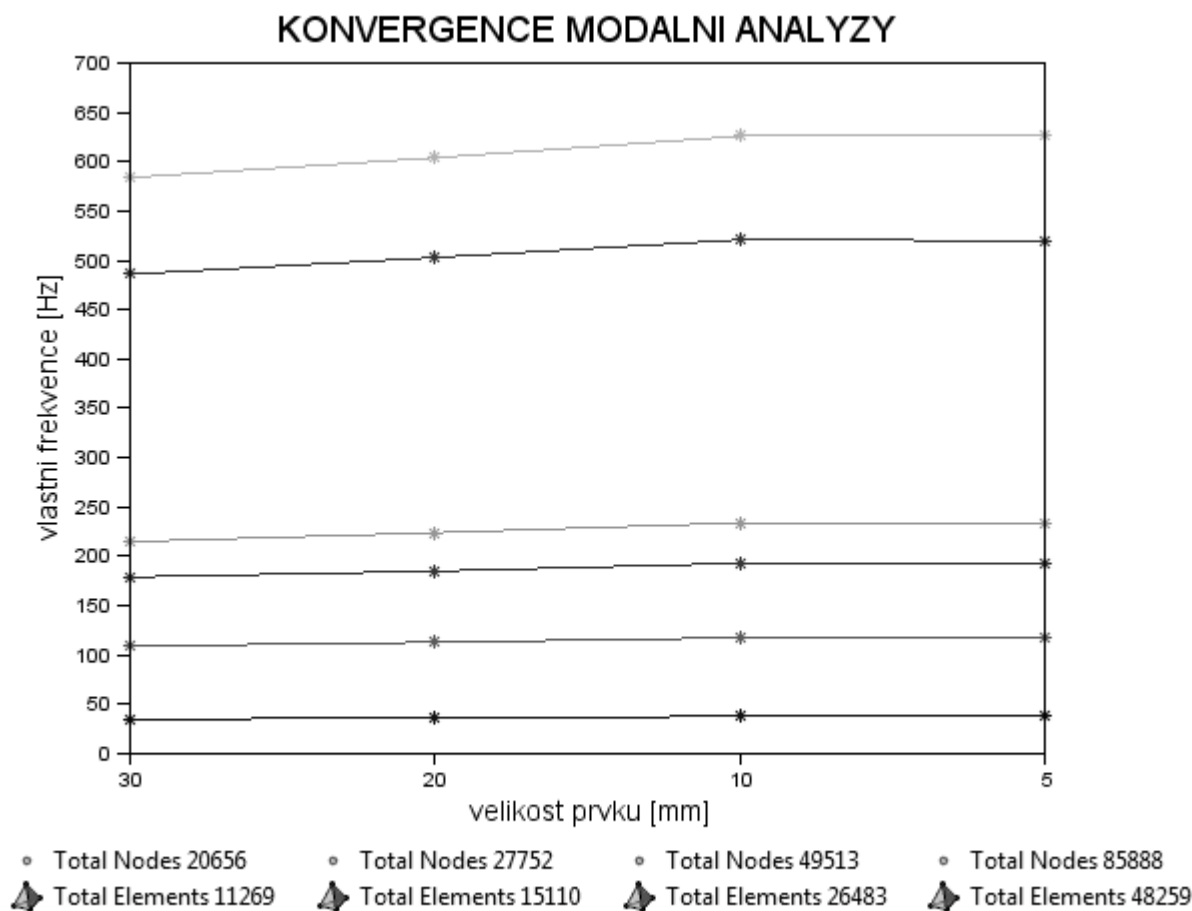


Obr. 1: Zkoumaný rotorový systém

Zařízení je opatřeno dostatečně tuhým rámem, aby nebyly ovlivňovány výsledky měření vlivem deformace vlastního rámu. U kotoučů jsou připevněny držáky pro uchycení čidel, které mohou zaznamenávat pohyb kotoučů. Rotorový systém má tedy takové vlastnosti, že na něj lze aplikovat fyzikální teorii pro analyzování rotorů popsanou v této práci. Bohužel nebylo k dispozici zařízení, které by provádělo kinematické buzení tohoto rotorového modelu, proto lze provést pouze numerickou analýzu této problematiky. V numerické analýze je nejdůležitějším krokem ve výzkumu jakéhokoliv systému zjistit co nejvíce realitě odpovídající vstupní parametry. Všechny informace jsou zjištěné na základě geometrických a materiálových informací o rotorovém systému. Během budoucího vlastního experimentu bude zapotřebí tyto parametry doladit na základě měření.

2.1 Kalibrační model rotoru

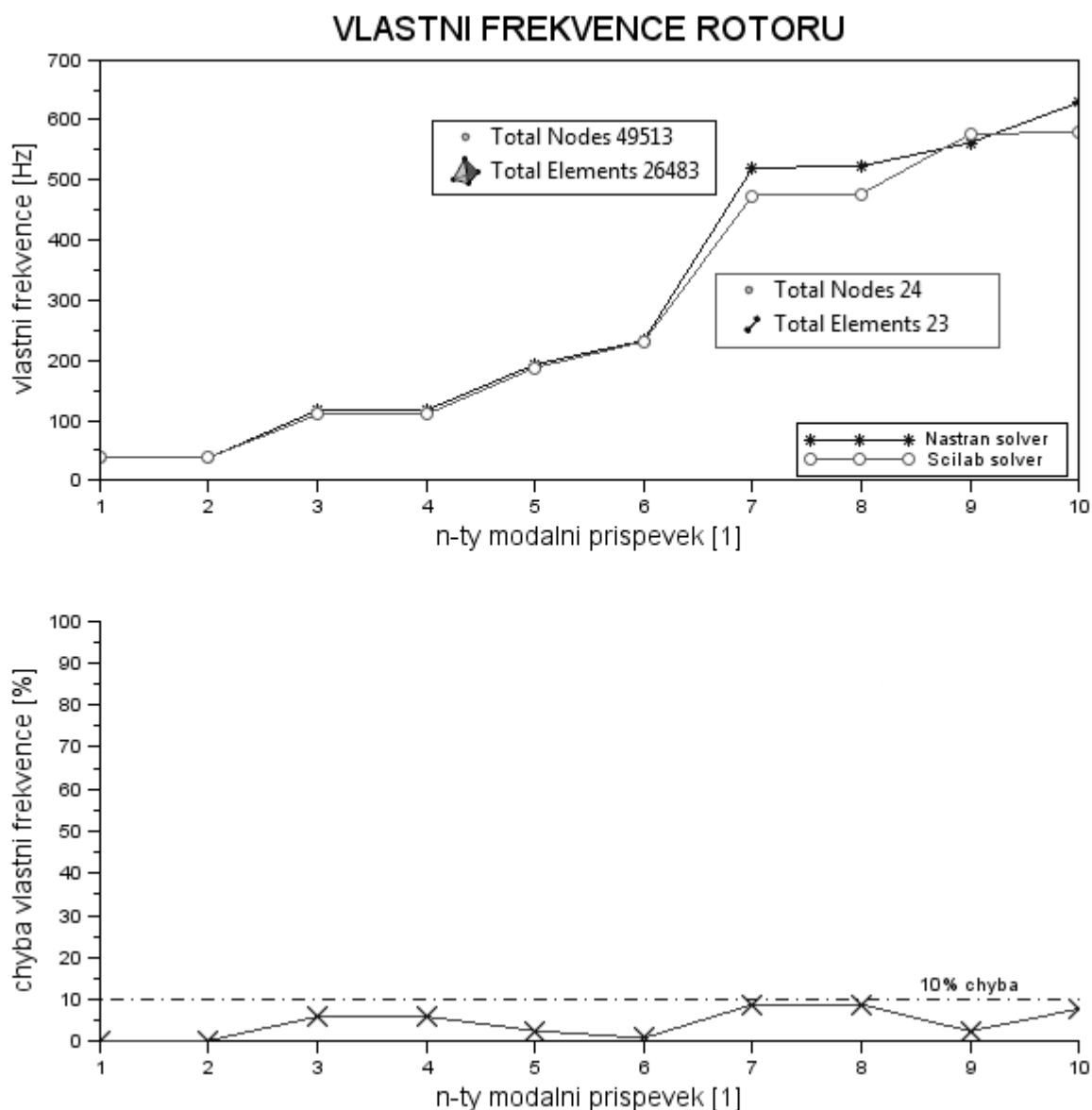
Použitá teorie v této práci pro popis rotoru konečnými prvky je mnohokrát ověřena experimenty [13], [14], lze konstatovat, že je dostatečně platná. Proto jí lze bez obav použít pro popis zkoumaného rotorového systému. Ale při tvorbě modelu diskretizovaného konečnými prvky je důležité vědět, že diskretizace byla provedena dostatečně, kvalitně a výsledky z výpočtů a ze simulací můžeme považovat za věrohodné. Proto se dále práce zabývala návrhem dostatečně kvalitního modelu rotoru. Pro vytvoření kalibračních hodnot byl zvolen software NASTRAN. Kalibrační model byl vytvořen pomocí objemových konečných prvků. Diskretizován byl celý model včetně kotoučů, jimž je hřídel osazen. Při kalibraci byly použity jiné okrajové podmínky úlohy, než skutečné popisující systém. Důvodem bylo, aby uložení hřídele bylo pevné, ne poddajné, jelikož šlo o kalibraci diskretizace hřídele samotného a nikoliv celé úlohy. Tedy nebylo žádoucí, aby výsledky ovlivňovaly okrajové podmínky. Kalibrace probíhala pro nulové otáčky rotoru a pro konzervativní model. Aby byl i kalibrační model nejvěrohodnější, bylo zapotřebí provést konvergenci diskretizace tohoto modelu. Konvergence včetně počtu použitých elementů a uzlů je vidět na obrázku 2, kde na vodorovné ose je velikost prvku a na svislé ose vlastní frekvence rotoru. Právě vlastní frekvence rotoru jsou referenčními hodnotami, kterými byl kalibrován odvozený konečně prvkový model rotoru. Velikostí prvku se zde myslí průměrná velikost prvku (tato hodnota je definovaná automaticky softwarem).



Obr. 2: Konvergence diskretizace kalibračního modelu

2.2 Odladění modelu rotoru

Nyní jsou k dispozici kalibrační hodnoty. Pro kalibraci bylo zvoleno, že prvních deset vlastních frekvencí by se mělo shodovat s chybou kolem 5% (zvolená obvyklá statistická hodnota chyby). Desátá vlastní frekvence se již blíží k 700 [Hz] a to je dostatečné pro simulace. Na obrázku 3 lze vidět, že vlastní frekvence se shodují i s požadovanou přesností. Zároveň si lze všimnout jednoho významného závěru. Tím je počet použitých prvků a tím i počet stupňů volnosti úlohy.



Obrázek 3: Kalibrace modelu rotoru

Pro diskretizaci kalibračního modelu byly použity lineární prvky. To znamená, že stupeň volnosti úlohy je trojnásobek (posuvy ve směru osy x , y , z) počtu uzlů. V odvozeném modelu je stupeň volnosti dán počtem uzlů násobených šesti (posuvy ve směru x , y , z a natočení kolem os x , y , z). Tyto dvě hodnoty jsou porovnány v tabulce 1.

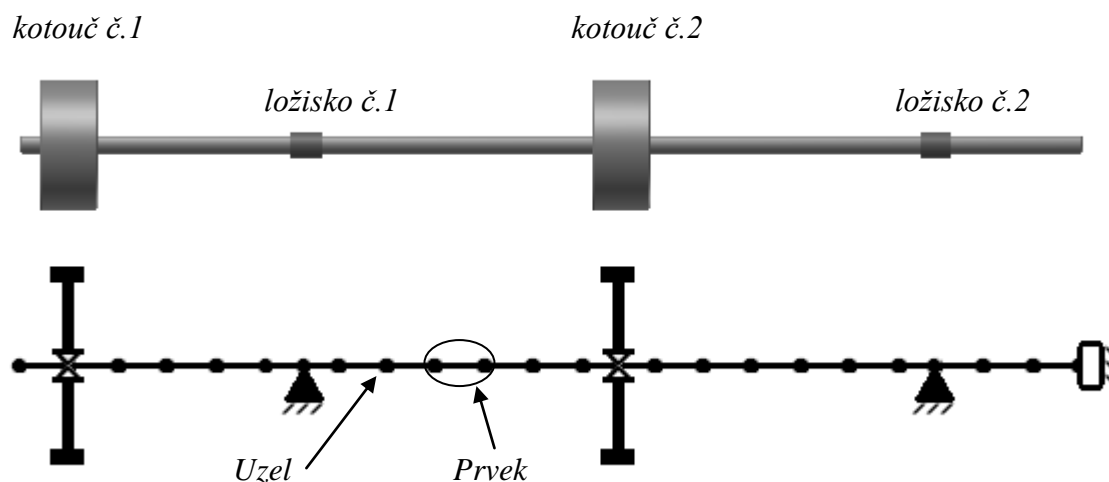
<i>3D MKP model rotoru</i>	<i>1D MKP model rotoru</i>
148539	144

Tab. 1: Stupeň volnosti úlohy

Je zřejmé, že odvozený konečně prvkový model má víc jak tisíckrát menší stupeň volnosti při srovnatelných výsledcích. To znamená neskutečné ušetření nároků na výpočetní techniku, ušetření výpočetních časů a hlavně neskutečný dopad na případné optimalizační úlohy.

Dále by šlo zmínit, že celá tato úloha byla programovaná ve volně přístupném softwaru Scilab. To znamená i velké ušetření finančních prostředků. A přitom, pokud je zapotřebí řešit úlohy rotorové dynamiky v komerčním softwaru, tak potřebujeme speciální software, standardní softwary tuto problematiku nevyřeší.

Na obrázku 4. je zobrazen konečně prvkový model zkoumaného rotoru diskretizovaný pomocí popsané metody v této práci. Na místech okrajových podmínek bylo nutné mít uzel a zbytek modelu rovnoměrně diskretizovat konečnými 1D prvky. Konečné prvky mají průměrnou délku kolem 25 [mm].



Obr. 4: 1D MKP model rotoru

3 Modální analýza

Pro vyhodnocení dynamických vlastností jakéhokoliv kmitajícího systému těles, nebo pružného tělesa se používá takzvaná modální analýza. Tou se v první řadě získá informace o vlastních frekvencích a jim příslušných vlastních tvarů kmitů. Tyto dvě informace popisují volné kmitání systému. Zároveň lze využít vlastních vektorů pro modifikaci soustavy závislých pohybových rovnic na soustavu nezávislých pohybových rovnic. To má obrovský dopad na vyřešení dynamických vlastností kmitajícího systému. Nyní je k dispozici řešení jednoduché pohybové rovnice, která je vyřešena analyticky. To ušetří mnoho výpočetového času, zároveň je známo analytické řešení, to znamená, že lze vyšetřovat jakoukoliv časovou oblast a nemusí se počítat pohyb do oné části. Další nesporná výhoda je v případě frekvenční odezvy. Ze soustavy n oscilátorů se získá n amplitudo-frekvenčních charakteristik. To odhalí dominantní vlastní frekvence a jejich příslušné amplitudy. Tím se analyzuje daleko detailněji zkoumaný systém. Celý tento převod systému popisující kmitající soustavu ve fyzikálních

souřadnicích do modálního prostoru popsaného pomocí jednotlivých oscilátorů v modálních souřadnicích se nazývá modální analýza. Rotorový systém popisuje soustava pohybových rovnic zapsaná v maticovém tvaru

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{B}_E + \mathbf{B}_I + \omega_0\mathbf{G})\dot{\mathbf{q}} + (\mathbf{K} + \omega_0\mathbf{K}_I)\mathbf{q} = \mathbf{0} . \quad (1)$$

Pokud je znám takto kompletní popis dynamického systému, lze provést jeho modální analýzu. Tímto krokem se získají základní povahové vlastnosti systému. Tyto dynamické vlastnosti systému popisují vlastní čísla a k nim příslušné vlastní kmity systému (tj. vlastní vektory). Když jsou známy tyto dva základní povahové rysy soustavy, lze následně převést soustavu dynamických rovnic popisující systém na soubor nezávislých pohybových rovnic jednotlivých oscilátorů (2).

$$\dot{c}_i(t) - s_i c_i(t) = 0 \quad (2)$$

Nejdříve bude rozebrán význam vlastních čísel systému. V rovnici (2) je vidět u členu s nulovou derivací vlastní číslo, které je obecně komplexně sdružené (3).

$$s_i = \alpha_i \pm j\Omega_i \quad \text{kde } j = \sqrt{-1} \text{ je imaginární jednotka} \quad (3)$$

Pohybová rovnice (2) má řešení ve tvaru (4).

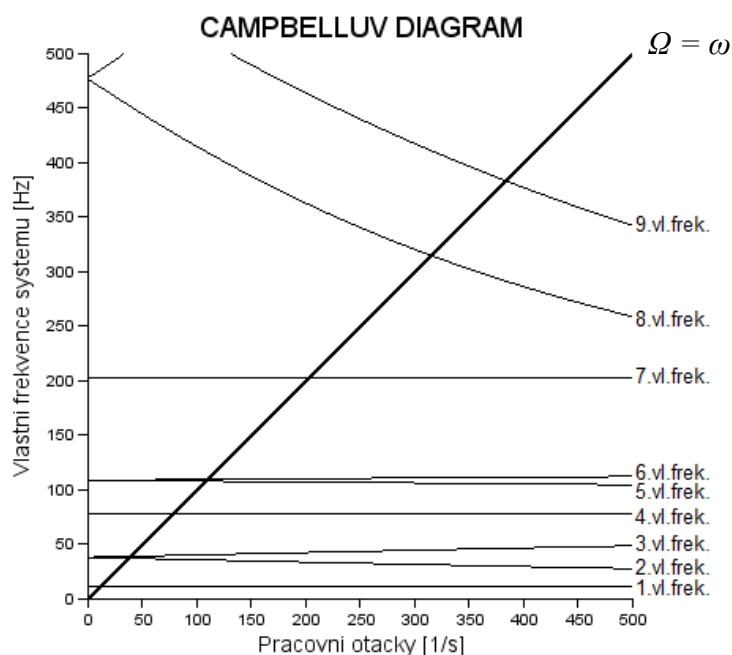
$$c_i(t) = e^{\alpha_i t} [A_i \cos(\Omega_i t) + B_i \sin(\Omega_i t)] \quad (4)$$

Z rovnice (4) lze konstatovat, že komplexní část vlastního čísla způsobuje oscilující pohyb (tj. vlastní frekvence systému) a reálná část dává informaci o chování amplitudy kmitavého pohybu (útlum systému). Z toho pohledu se posoudí stabilita systému.

- I. Pokud všechna $\alpha_i < 0$, amplituda se s časem zmenšuje a soustava je asymptoticky stabilní.
- II. Pokud alespoň jedno $\alpha_i = 0$, příslušný mód je na mezi stability.
- III. Pokud alespoň jedno $\alpha_i > 0$, amplituda se s časem zvětšuje a soustava je nestabilní.

Je zřejmé, že pohybové rovnice v rotorové dynamice závisí na otáčkách hřídele, to znamená, že i všechny získané výsledky závisí také na vlastních otáčkách rotoru. Proto ony získané výsledky budou zakreslované do grafů, kde nezávislá proměnná bude úhlová rychlost hřídele, respektive otáčky hřídele. Rozsah zkoumaných otáček bude po celou dobu analyzování rotoru od 0 do 500ti otáček hřídele za sekundu. Tato hodnota vychází z faktu, že jsou použita samomazná kluzná ložiska, kde je maximální možná kluzná rychlost 10 [m/s]. To pro průměr hřídele 10 [mm] vychází maximální otáčky cca 318 [ot/s]. Zkoumaných 500 [ot/s] dostatečně převyšuje tuto maximální oblast použití, zkoumaná oblast plnohodnotně analyzuje vlastnosti rotoru.

Po vykreslení imaginárních částí vlastních čísel Ω_i (tj. vlastní frekvence) systému v závislosti na otáčkách hřídele se získá takzvaný Campbellův diagram systému (obr.5). Vlivem gyroskopického efektu nejsou vlastní frekvence v rotorové dynamice konstantní a dochází k jejím štěpení. To je velmi důležitá informace, která říká, jak je důležité zahrnout vliv otáček do analýzy systému, jinak se získávají nesmyslné výsledky. Pokud se vlastní hodnota neštěpí, jedná se o vlastní frekvenci příslušnou torznímu, nebo axiálnímu vlastnímu tvaru.



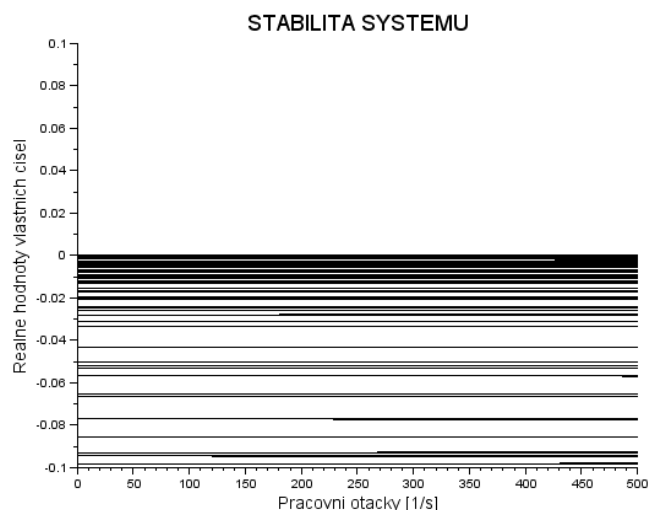
Obr. 5: Vlastní frekvence systému

Dále po vykreslení reálných částí vlastních čísel α_i systému v závislosti na otáčkách se získá informace o stabilitě systému (obr.6). V grafu lze vidět, že jsou reálné hodnoty vlastních čísel opět nekonstantní a opět dochází k jejich štěpení. Toto způsobuje cirkulační matice, která vznikla zahrnutím materiálového útlumu do popisu systému. Lze konstatovat, že ve zkoumaném rozsahu otáček je analyzovaný systém stabilní.

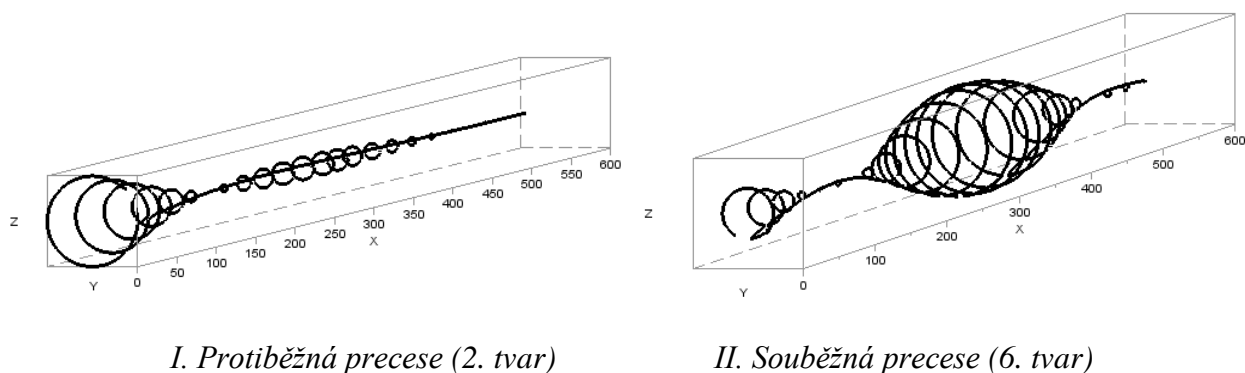
Po analýze vlastních čísel se získalo mnoho informací o systému. Bylo částečně zmíněno, jak podle charakteru průběhu vlastního čísla odhadnout, jakému druhu vlastního tvaru přísluší. Každému vlastnímu číslu systému přísluší vlastní vektor a ten popisuje, jakým tvarem bude příslušná vlastní frekvence systému při volném kmitání kmitat. V úloze mohou nastat tři typy kmitů:

- I. *Kmitání v axiálním směru. (1.vl.tvar)*
- II. *Torzní kmitání. (4,7.vl.tvar)*
- III. *Kmitání v radiálním směru. (2,3,5,6,8,9.vl.tvar)*

Nejzajímavější jsou kmity v radiálním směru, jelikož analyzované buzení probíhalo v radiálním směru. Tyto vlastní vektory vycházejí opět obecně komplexní. Tím v rotorové dynamice dochází při kmitání k takzvaným orbitám při pohybu. To je způsobeno svázaním pohybu ve směru osy y a z . Znamená to, že deformovaný hřídel má při kmitání švihadlový pohyb. Tento pohyb může být ve dvou formách, souběžné, nebo protiběžné precese. Protiběžná precese je takový tvar orbitu, při kterém vykreslovaná trajektorie deformovaného hřídele je v opačném směru, než je smysl otáčení hřídele (obr.7, I.). Souběžná precese je případ, kdy vykreslovaná trajektorie pohybu deformovaného hřídele je ve stejném směru, jako je smysl otáčení hřídele (obr.7, II.).



Obrázek 6: Stabilita systému



Obr. 7: Typy orbitů

4 Dynamická odezva

Jsou známy informace o vlastní povaze rotorového systému. Nyní lze zkoumat, jakou odezvu bude mít rotor při kinematickém buzení jeho uložení. Tuto odezvu budou popisovat přenosové charakteristiky. Tyto charakteristiky byly vytvořeny pro spektrum otáček od 0 do 500 [ot/s] a pro frekvence kinematického buzení od 0 do 500 [Hz].

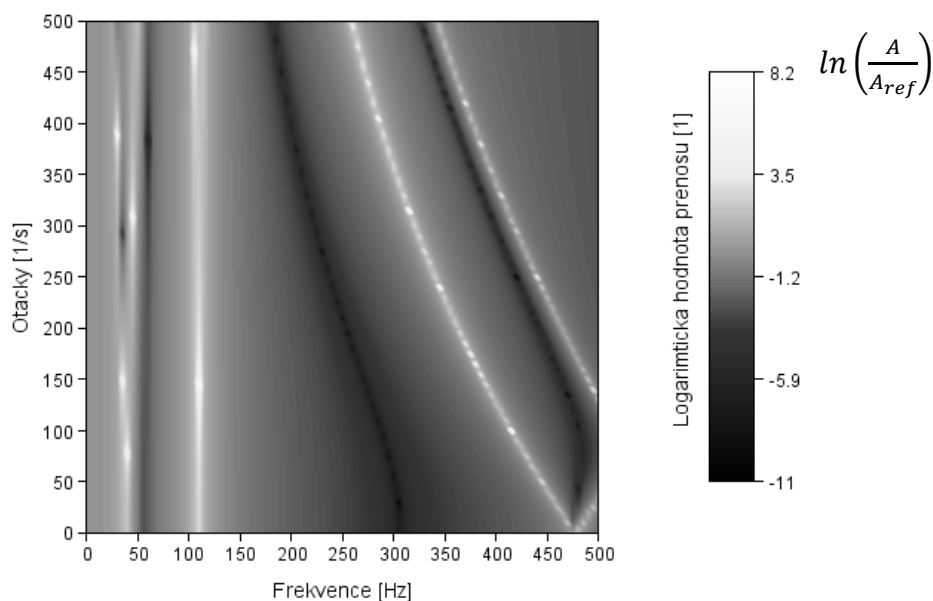
Kinematické buzení je ve směru osy y , bude se tedy zkoumat odezva pouze ve směru této osy. Přenosovou charakteristikou se získá informace o poměru výsledné amplitudy kmitání vůči vstupní amplitudě kinematického buzení pro různou hodnotu otáček a frekvence buzení. Na základě takovéto charakteristiky lze zjistit další důležité informace o systému při daném druhu buzení. Lze říci, že přenosová charakteristika je modifikovaný Campbellův diagram vlastních frekvencí, který ukazuje povahu systému a získaná přenosová charakteristika je už konkrétní projev těchto vlastností při dynamickém zatížení systému.

Nejdůležitější informací co charakteristika poskytne je informace o rezonancích systémů. Rezonance způsobuje, že se v systému budí větší a větší amplitudy kmitání až dojde k samotnému porušení, nebo destrukci zařízení. To vypovídá o důležitosti této informace. Rezonance se projeví ve formě souběžné precese, nebo protiběžné precese. To už záleží na typu vybuzení, na oblasti v přenosové charakteristice a vše má souvislost s povahou systému.

Tato povaha byla analyzovaná v kapitole o modální analýze systému, kde bylo ukázáno, jak dynamiku systému popisují vlastní čísla a vlastní vektory.

Další zajímavou oblastí, která se projeví, jsou oblasti antirezonancí. To znamená, že pokud je konkrétní zkoumané místo v antirezonanci, tak ačkoliv je celý rotor buzen, tak toto zkoumané místo je vůči globálnímu souřadnému systému spojeného se zemí v klidu a vůči lokálnímu souřadnému systému spojenému s uložením rotoru ztelně kmitá.

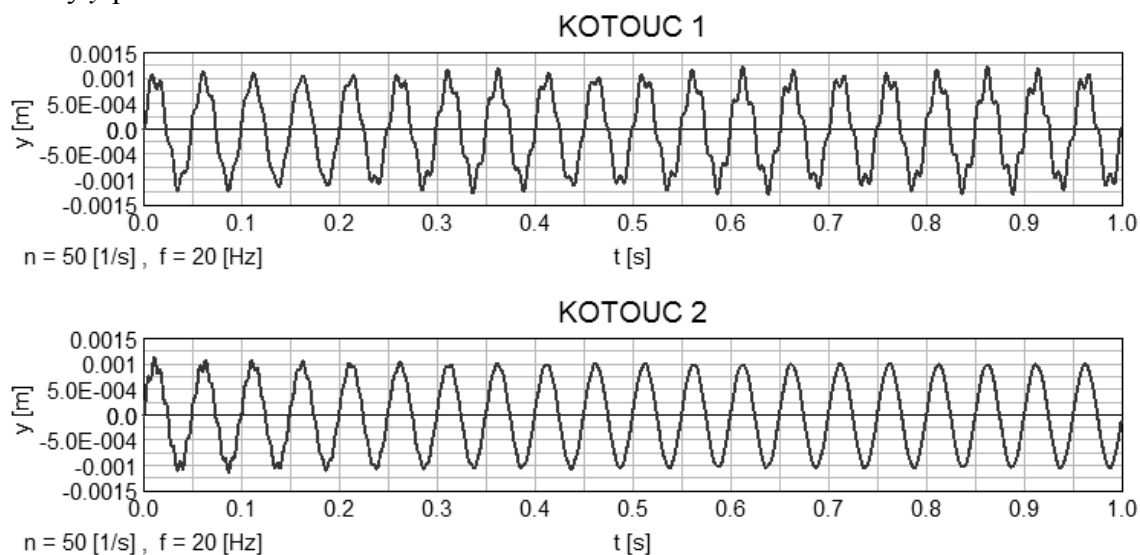
Nyní záleží na použití rotoru, co se od jeho funkce požaduje, nebo co je pro použití naopak nebezpečné. Všechny potřebné informace se vyčtou z těchto charakteristik. Nejzajímavější pro analýzu je, jakou odezvu budou mít místa uložení kotoučů. Na obrázku 8 je zobrazena přenosová charakteristika kotouče č.1, tj. na převislém konci. Stupnice je z důvodu přehlednosti v logaritmickém měřítku.

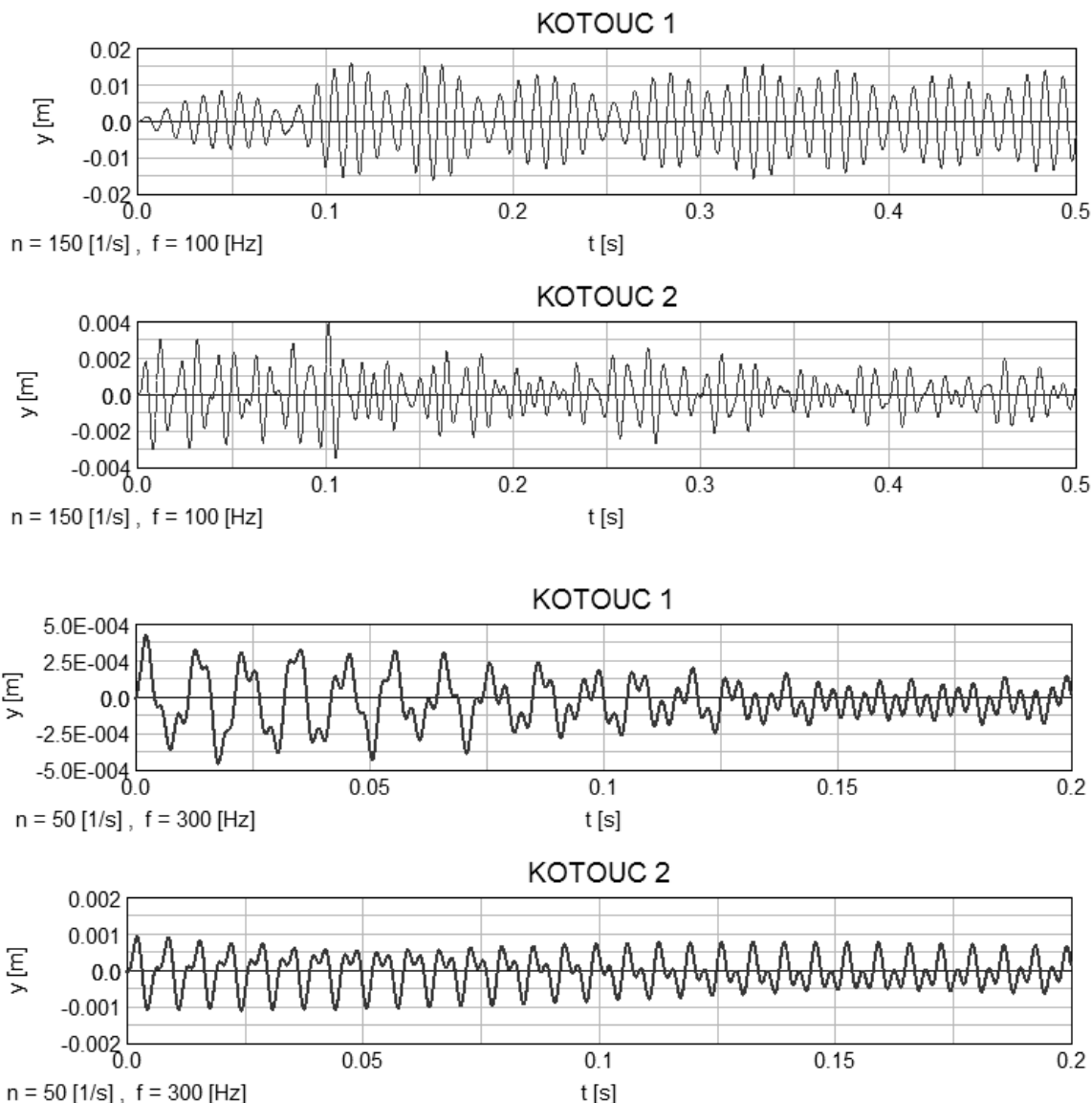


Obr. 8: Přenosová charakteristika kotouče č.1

5 Ukázka otestování analýzy v softwaru MSC.ADAMS

Simulace probíhaly pro různé otáčky rotoru a frekvence buzení, přičemž amplituda kmitání byla zvolena 1 [mm]. Na následujících grafech jsou zobrazeny získané průběhy pohybů ve směru osy y pro oba kotouče.





Závěr

Práce se zabývala popisem rotorového systému a jeho dynamickou odezvou na kinematické buzení. Analýza byla provedena v matematickém softwaru Scilab, který je volně dostupný, což znamená velké ušetření finančních nákladů za software. Další velkou výhodou je daleko hlubší pochopení problematiky díky jejímu velmi detailnímu rozboru. Hřídel byl popsán jako kontinuum metodou konečných prvků. Tento popis jednodimenzionálními konečnými prvky je obecně užívaný a platný, proto mohl být použit s předpokladem správnosti výsledků. Takto byl sestaven celkový model rotoru uložený v kluzných samomazných ložiskách osazen dvěma kotouči a spojen lamelovou spojkou s motorem. Globální model byl úspěšně kalibrován s objemovým konečným prvkovým modelem rotoru při nulových otáčkách v softwaru Nastran.

Po kompletním sestavení dynamického modelu rotoru byla provedena jeho modální analýza. Ta ukázala, jak vypadají vlastní čísla a vlastní vektory rotorových systémů. Vliv gyroskopického efektu, který zapříčiní štěpení vlastních frekvencí, které jsou závislé na otáčkách. Dále vliv vnitřního útlumu, který způsobuje nestabilitu rotoru. Tyto hodnoty jsou také závislé na otáčkách a dochází k jejich štěpení s právě narůstajícími otáčkami. Po modální analýze byla provedena dynamická odezva a tato charakteristika zobrazila místa rezonancí,

jejich vývoj s otáčkami a tvar kmitání rotoru při rezonanci. Bylo zjištěno, že vývoj rezonancí kotoučů v závislosti na otáčkách stopuje Campbellův diagram, pouze se projeví určité frekvence, které vybudí dané buzení. Následně tvar rezonance rotoru odpovídá tvaru vlastního vektoru příslušného jeho vlastní frekvenci. Po provedení analýzy byla provedena simulace pohybu, která byla řešena numerickou metodou řešení diferenciálních rovnic a simulované pohyby korespondovaly s přenosovými charakteristikami a informacemi o nich zjištěnými z analýzy rotoru. Tím se myslí informace o souběžných, respektive protiběžných precesích. Z přenosových charakteristik je vidět, že při kinematickém buzení jsou vybudeny oba typy precesí a tuto informaci právě ony simulace potvrdily.

Pro potvrzení celé numerické analýzy byl proveden simulační experiment v softwaru MSC.Adams. Tento software byl použit jako nejlepší možná kompenzace reálného experimentu, který nemohl být proveden. Pro konkrétní otáčky rotoru a budící funkce byly výsledky ze simulací MSC.Adamsu porovnány s přenosovými charakteristikami. Simulace a analýza spolu korespondují, lze tedy předpokládat důvěryhodnost celé analýzy.

Závěrem lze shrnout, že ikdyž je hřídel navržen dostatečně bezpečně z hlediska zatížení a únavy materiálu, tak je to nedostačující, pokud není potvrzeno dynamickou analýzou, že rotor neohrožuje vznik rezonance. Analýza v této práci potvrdila možnost vybudení rezonance při kinematickém buzení rotoru. Pokud je tedy rotor uložen na neinerciálních základech, je nutné provést jeho dynamickou analýzu a zjistit, zda frekvence buzení nezasahuje do oblasti vlastní frekvence rotoru.

Literatura

- [1] HUI MA, HUI LI, XUEYAN ZHAO, HEQIANG NIU BANGCHUN: *Effects of eccentric phase difference between two discs on oil-film instability in rotor-bearing system*, Mechanical Systems and Signal Processing, p. 526-545, 2013.
- [2] ŠIMEK, J., TŮMA, J., SVOBODA, R.: *Test stand for investigation of external excitation influence on behaviour of rotor supported in sliding journal bearings*, Dynamic of machines, 2008.
- [3] ANDRÉS BLANCO ORTEGA I, FRANCISCO BELTRÁN CARBAJAL, GERARDO SILVA NAVARRO, MARCO ANTONIO OLIVER SALAZAR: *Active vibration control of a rotor-bearing system based on dynamic stiffness*, Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 55 pp. 125-133. Septiembre, 2010.
- [4] BRDLÍČKA M., SAMEK L., SOPKO B.: *Mechanika kontinua*, Academia 2000.
- [5] SLAVÍK J., STEJSKAL V., ZEMAN V.: *Základy dynamiky strojů*. ČVUT, Praha 1997.
- [6] FIŠER, K.: *Teoretická mechanika*, učební text 2003. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/~chomutov/tm1.pdf>
- [7] BYRTUS M., HAJŽMAN M., ZEMAN V.: *Dynamika rotujících soustav*. ZČU, Plzeň 2010.
- [8] BREPTA, R. – PŮST, L. – TUREK, F.: *Mechanické kmitání*. Sobotáles, Praha 1994.
- [9] SKAROLEK, A.: *Numerical Analysis of Rotor Systems with Aerostatic Journal Bearings*, Dizertační práce, TUL, Liberec 2012.
- [10] NEWMARK, N. M.: *A method of computation for structural dynamics*. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 85 (EM3) 67-94., 1959.
- [11] RYABEN'KII, VICTOR S., TSYNKOV, SEMYON V.: *A Theoretical Introduction to Numerical Analysis*, CRC Press, p. 243, 2006.
- [12] TECHLAB, s.r.o.: *Technická dokumentace ROTOR KIT I*.
- [13] JEAN-JACQUESSINO, DAVIDDEMAILLY, CRISTIANOVILLA, FABRICETHOUVEREZ, MICHEL ASSENZIO AND FRANCK LAURANT: *Rotordynamics Analysis: Experimental and Numerical Investigations*, ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference Chicago, Illinois, USA, September 2–6, 2003.
- [14] X Y SHEN, J H JIA, M ZHAO, J P JING: *Numerical and experimental analysis of the rotor—bearing—seal system*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science August 1, 2008
- [15] DALÍK, J.: *Numerické metody II*, VUT, Brno 2013.
- [16] VÁVRA, P., LEINVEBER, J.: *Strojnické tabulky*, Praha: SNTL, 2005.
- [17] SVOBODA, D.: *Analýza odevzy rotoru na kmitání základu*, Diplomová práce, TUL, Liberec 2015.

Elektrické vlastnosti vstřikované termoplastické polymerní matrice

Jan Vácha

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 4. ročník
Doktorský studijní program – STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Tato práce zkoumá vliv uhlíkových nanotrubic na mechanické vlastnosti a vodivost elektrického náboje nanokompozitu z termoplastické polymerní matrice. Jako základní matrice byl použit Akrylonitril butadien styren (ABS), do kterého byly přidány v daném hmotnostním procentu nanočástice ve tvaru nanotrubic. Zkušební vzorky byly vyrobeny na vstřikovací stroji Arburg. Mechanické vlastnosti jsou hodnoceny pomocí tahové zkoušky. Pro vyhodnocení vodivosti elektrického náboje bylo zhotoveno měřicí zařízení, které odpovídá dané normě a bylo provedeno měření polymerního kompozitního materiálu s přidávanými nanoplňivy a čisté polymerní matrice. V závěru je zhodnocen a porovnán vliv uhlíkových nanotrubic na vlastnosti této matrice.

Klíčová slova: uhlíkové nanotrubičky, elektrická vodivost, nanokompozit, vstřikování

1. Úvod

Uhlíkové nanotrubičky se nyní často používají jako plniva v plastových kompozitech. Roste použití těchto kompozitů v aplikacích využívající elektrostatický výboj (ESD), v elektrovodivých (EC) komponentech, v součástkách, kde je zapotřebí elektromagnetické rušení (EMI) a radiofrekvenční rušení (RFI). Pro průmyslovou výrobu kompozitů s vodivými plnivými dominuje technologie vstřikování plastů způsobená rychlým růstem poptávky po elektronických a automobilových komponentech. Vzhledem k snadnému zpracování a zlepšené vlastnosti rozptylu tepla se polymerní nanokompozity s uhlíkovými nanotrubicemi (CNT) stávají atraktivní pro výrobu automobilových dílů v těsné blízkosti tepelného zdroje, jako je například motor, pro části, které by generovaly vysokou úroveň tepla, nebo elektrické energie na počítači [1]. Uhlíkové nanotrubičky (CNT) jsou protáhlé systémy, jejichž stěny jsou tvořeny atomy uhlíku (podobně jako sférické fullereny) s průměrem od 1 do 100 nanometrů a délkou až 100 μm . Ty se dále dělí na jedno-stěnné (SWCNT) nebo více-stěnné (MWCNT). Nanotrubičky byly vyrobeny v poměru délka: průměr - 132000000:1, což je mnohem vyšší poměr, než u kteréhokoliv jiného materiálu. Tyto válcovité uhlíkové molekuly mají speciální vlastnosti, které jsou velmi důležité pro nanotechnologie (elektrické, optické, atd.). Zejména vzhledem k jejich tepelné vodivosti, mechanickým a elektrickým vlastnostem našli použití jako plnivo pro různé konstrukční materiály [2]. Vzhledem k poměrně nízkému hmotnostnímu poměru, běžně za použití zlomku běžných vodivých plniv (např 2% hmot. podílu CNT oproti 10% hmot. podílu vodivých sazí), mohou polymery udržet vyšší míru mechanických vlastností a esteticky příjemný povrch. Pro aplikace vyžadující velmi vysokou vodivost, by mohli polymerní nanokompozity s CNT změnit návrhy konektorů, prepínačů, senzorů, pohonů, měničů, řídicích modulů, superkondenzátorů, baterií a tranzistorů [1]. V této práci jsou použity více-stěnné uhlíkové nanotrubičky v ABS a je zkoumán vliv na mechanické vlastnosti pomocí tahové zkoušky. Dále bylo provedeno měření vodivosti elektrického náboje na zařízení zhotoveném podle normy pro hodnocení elektrických vlastností plastových dílů.

2. Materiál a experiment

V této práci byl jako hlavní kompozitní polymerní matrice použit Akrylonitril butadien styren (ABS) od společnosti Nanocyl (Sambreville, Belgie) s obchodním názvem Plasticyl ABS

1501. Termoplastický polymer Plasticyl ABS 1501 je určen pro aplikace vyžadující vynikající elektrickou vodivost a velmi dobré elektrostatické vlastnosti. Byl zvolen 1, 2, 5 % hmotnostní podíl nanočástic ve tvaru více stěnných nanotrubic (MWCNT) rovněž od firmy Nanocyl. Tyto hodnoty byly zvoleny proto, že již od nízkého podílu je zaručena dobrá vodivost těchto nanokompozitů.

2.1. Vstřikovací proces a parametry

Pro vstřikování byl použit standardní vstřikovací stroj sloupové konstrukce ARBURG 270S 400-100. Doporučené technologické parametry pro vstřikování zkušebních těles musely zajistit jednak výrobu vzorků a jednak nesmělo dojít k degradaci struktury nanotrubic. Hlavně s ohledem na teplotní a smykové namáhání bylo rozhodující nastavit parametry plastikace a parametry vstřikování. Pro temperaci vstřikovací formy byl použit agregát TA3. Teplota taveniny byla 260° C. Vstřikovací rychlost byla 30 cm³/s a velikost dotlaku 520 bar. Doba dotlaku byla 35s. Vzhledem k tomu, že index toku taveniny (MFI) kompozitů s MWCNT byl výrazně nižší, než u čisté matrice, museli se upravit vstřikovací parametry (zvýšit vstřikovací tlak, dotlak, teplota,...) viz tab. 1.

Tabulka 1 : Vstřikovací parametry

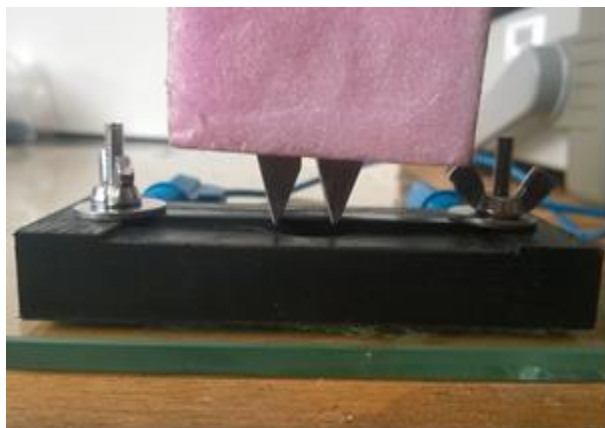
Teplota tavicí komory (°C)					Vstřikovací rychlost	Dotlak	Teplota formy
Zóna 5	Zóna 4	Zóna 3	Zóna 2	Zóna 1	(cm ³ /s)	bar	(°C)
260	255	255	245	230	30	520	60

2.2. Tahová zkouška

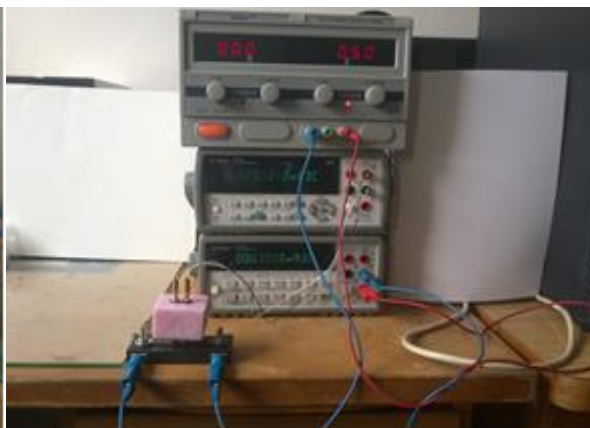
Měření mechanických vlastností zkušebních vzorků bylo provedeno na trhačím stroji Hounsfield H10KT pro měření energie až do 10 (kJ). Postup měření byl v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1, 2. Měření probíhalo až do přetrhu zkušebního vzorku. Rychlost posuvu byla 50 (mm/min).

2.3. Objemová resistivita

Měření odporu bylo provedeno pomocí normy ČSN EN ISO 3915. Tato norma je vhodná pro měření odporu plastových dílů. Na zkušebních vzorcích byl měřen objemový odpor na zařízení sestávajícího z potenciometrických elektrod a upínacího zařízení, viz obr. 1, a měřicího zařízení. Tyto elektrody jsou vyrobeny z nerezové oceli a odpovídají dané normě. Upínací zařízení je vyrobené z materiálu s vysokým odporem a přenosových desek rovněž z nerezové oceli. Měřicí zařízení se skládá z napájecího zdroje, voltmetru a ampérmetru, viz obr. 2. Jako zdroj napájení byl použit Hadex G855, jako voltmetr byl použit digitální multimetr Agilent 34411A a jako ampérmetr byl použit digitální multimetr Agilent 34401A. Vzdálenost mezi potenciometrickými elektrodami je dána normou a je 1 cm. Měření byla prováděna při napětí $U = 5 \text{ V}$ pro všechny vzorky. Teplota byla 22 ° C a relativní vlhkost vzduchu v místnosti byla 55%. Měření bylo prováděno vždy na 10 vzorcích.



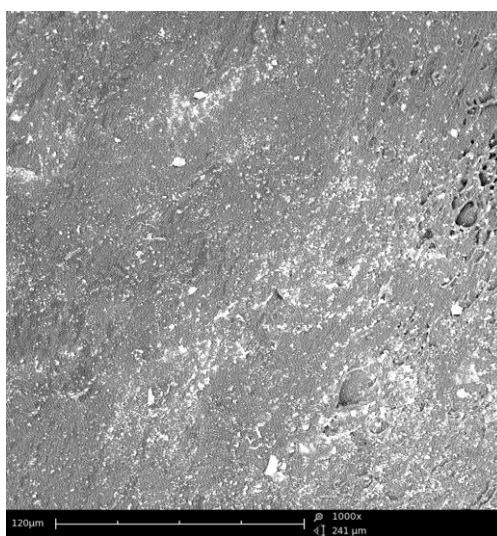
Obrázek 1: Dielektrické elektrody



Obrázek 2: Měřicí zařízení

3. Zhodnocení a diskuze

Zkušební vzorky byly vstříkovány z granulátu Plasticyl ABS 1501 a byl měřen objemový odpor na zařízení zhotoveném podle dané normy. Při zpracování kompozitu jsme předpokládali, že foliace uhlíkových nanotrubic je rovnoměrná tak, jak je uvedeno v [3 - 7]. Na snímku z elektronového mikroskopu (obr. 3) můžeme vidět zlom zkušební vzorku s 5 % hm. podílem MWCNT po tahové zkoušce, kde je vidět rovnoměrné rozmístění uhlíkových nanotrubic.



Obrázek 3: Snímek lomu ABS po tahové zkoušce

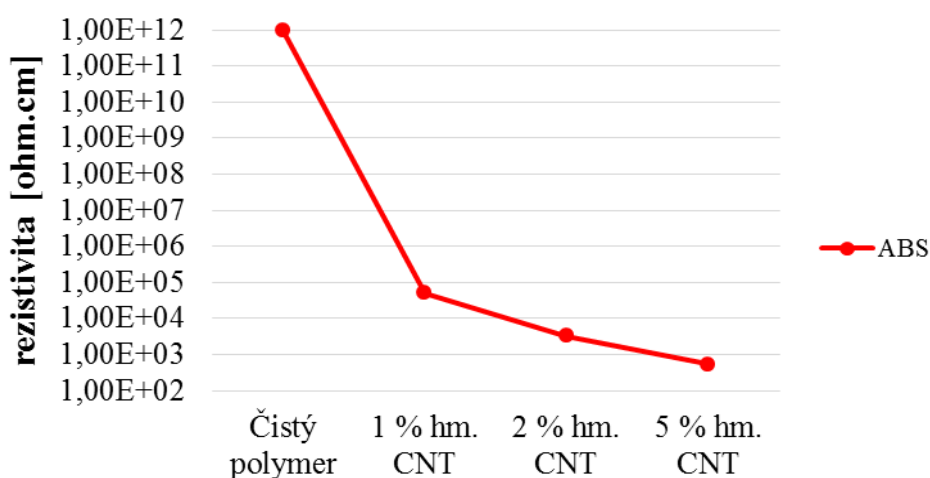
U tohoto nanokompozitu klesl objemový tok taveniny (MVR) z 36 cm³/10min pro čistý materiál na 1cm³/10min pro ABS s 5% MWCNT. Musel být navýšen vstříkovací tlak a dotlak. Došlo pouze k nepatrnému navýšení vstříkovací teploty oproti doporučení výrobce čisté polymerní matrice a to o 10 °C. Upravené technologické parametry pro výrobu testovacích vzorků byly vyzkoušeny a byly vybrány z několika zkušebních variant technologických parametrů. Procesní parametry byly stejné pro všechny polymerní směsi, aby se mohli získané výsledky porovnat.

Na 1, 2, 5 % hm. poměru MWCNT v polymerních směsích vyrobených z předsměsi Plasticyl ABS1501 byl měřen měrný odpor. Měření objemového odporu nám ukázalo, jak dobrý materiál je vodič elektrického náboje. Měření byla prováděna na 10 vzorcích z každé

polymerní směsi. Výsledné hodnoty měrného odporu můžeme vidět v tabulce 2 a na obrázku 4.

Tabulka 2: Výsledný objemový měrný odpor

Objemový měrný elektrický odpor [ohm.cm] - ČSN EN ISO 3915				
	Čistý polymer	1 % hm. CNT	2 % hm. CNT	5 % hm. CNT
Objemový odpor	1.00E+12	5.14E+04	3.32E+03	5.28E+02
Směr. odchylka	1.00E+02	7.76E+03	3.17E+02	6.34E+01



Obrázek 4: Objemový měrný elektrický odpor

Výsledky vzorků polymerních směsí s MWCNT ukazují, že tento kompozit je vodivý, a že je to dobrý vodič elektrického náboje. Již od tak malého 2 % hm. podílu MWCNT vykazuje nanokompozit velmi dobré vodivé vlastnosti, které by mohli být využity pro stínící, či jiné elektronické aplikace. Tyto výsledky také ukazují, že došlo za těchto technologických parametrů k homogenní disperzi MWCNT a došlo k vytvoření vodivostní sítě. Výsledky ABS bez přidaných nanoplniva nejsou na tomto zařízení zaznamenány, protože základní polymerní matrice má vyšší odpor, než je zařízení schopno měřit. Výsledné hodnoty jsou dány výrobcem polymerní matrice. Výsledná hodnota objemového odporu čistého ABS je $1,10E+12$ Ohm.cm, což nemůže být využito jako vodič elektrického náboje.

Výsledné hodnoty tahové zkoušky můžeme vidět v tabulce 3. Pevnost v tahu ABS bez uhlíkových nanotrubiček jako plniva je 40,12 MPa, s 1% hmotn. poměrem CNT je 45,28 MPa, 2% hm. poměrem CNT je 46,24 MPa a s 5% hmotn. poměrem CNT je 46,25 MPa. Rychlost byla 50 mm / min. Postup měření byl v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1, 2. Zvýšení Youngova modulu je v tomto případě z 2532 MPa na 3888 MPa, což je výrazný nárůst. Z výsledků vidíme zvýšení pevnosti v tahu a youngova modulu, ale také snížení tažnosti, což vede ke zvýšení tvrdosti a křehkosti výsledného kompozitu. Vzhledem k neustále se snižujícím nákladům na CNT se v blízké době bude jevit možné použití těchto plniv pro zlepšení mechanických vlastností.

Tabulka 3: Výsledné hodnoty tahové zkoušky

Akrylonitrile butadien styren	Čistý polymer	1 % hm. CNT	2 % hm. CNT	5 % hm. CNT
Pevnost v tahu [Mpa]	40.12	45.28	46.24	46.25
Modul pružnosti v tahu [Mpa]	2532,314	2882,695	3377,025	3888,561

4. Závěr

Vývoj kompozitů z termoplastických polymerních matic a uhlíkových nanotrubic je neustále se vyvíjející proces, který je ovlivněn rozšířením počtu možností použití nejen díky vynikajícím elektrickým vlastnostem těchto kompozitů. Tyto vlastnosti a aplikační potenciál je ovlivňován nejen druhem a formou nanotrubiček, jejich hmotnostním procentuálním poměrem, ale také typem a druhem polymerní matrice. Velmi důležité je také zvolení vhodných technologických parametrů. Výsledky testů ukazují zvýšení mechanických vlastností pevnosti v tahu. V souvislosti se snižujícími náklady na výrobu CNT je pravděpodobné budoucí využití těchto nanoplňiv na zlepšení mechanických vlastností kompozitních materiálů. Měření elektrického objemového odporu nám ukázalo, jak dobrý materiál je vodič elektrického náboje. Výsledné vzorky polymerních směsí s MWCNT ukazuje, že tento nanokompozit je vodivý a je schopný vodit elektrický náboj. Již od 2% hmotnostního podílu nanotrubic je schopný dobře vodit elektrostatický náboj. Tyto vlastnosti umožňují široké využití tohoto kompozitu, jako jsou například aplikace, které vyžadují vynikající elektrickou vodivost a v aplikacích využívající elektrostatický výboj (ESD), v elektro-vodivých (EC) komponentech, v součástkách, kde je zapotřebí elektromagnetické rušení (EMI), či v stínících součástkách radiofrekvenčního rušení (RFI). Vliv změny procesních parametrů bude zkoumáno v blízké budoucnosti.

Poděkování

Tato práce je napsaná za podpory projektu SGS 21005

Literatura

- [1] LEW, CY., DEWAGHE, C., CLAES, M. Injection moulding of polymer-carbon nanotube composites, *Polymer-Carbon Nanotube Composites- Preparation, Properties and Applications*. Chapter 6, Cambridge, 2011, ISBN: 978-1-84569-761-7
- [2] X. WANG and coll., Fabrication of Ultralong and Electrically Uniform Single-Walled Carbon Nanotubes on Clean Substrates, *Nano Letters* 9 (9), Beijing, 2009, DOI: 10.1021/nl901260b
- [3] LENFELD, P., VÁCHA, J., Evaluation of plastication and injection molding influence on the morphology of polyamide with carbon nanotubes. *The 28th International conference of polymer processing society (PPS-28)*, Pattaya, Thailand, 2012
- [4] PÖTSCHKE, P. and coll., A novel strategy to incorporate carbon nanotubes into thermoplastic matrices. *Macromolecular rapid communication*, Weinheim, 2008, ISSN: 1521-3927
- [5] CHANDRA, A. and coll., Effect of injection molding parameters on the electrical conductivity of polycarbonate/carbon nanotube nanocomposites. *Antec 2007 Plastics: Annual Technical Conference Proceedings*, 2007, ISBN: 978-0-9753707-5-9

- [6] PRASHANTHA, K., SOULESTIN, J., Masterbatch-based multi-walled carbon nanotube filled polypropylene nanocomposites: Assessment of rheological and mechanical properties. *Composites science and technology* 69, 2007, ISSN: 0266-3538
- [7] SO, H.H, CHO J. W., SAHOO J.G., Effect of carbon nanotubes on mechanical and electrical properties of polyamide/carbon nanotubes nanocomposites. *European Polymer Journal* 43, 2007, ISSN: 0014-3057

NEDESTRUKTIVNÍ TOPOGRAFIE STĚN DUTÝCH LOPATEK PLYNOVÝCH TURBÍN

Bc. David Vaněk

Sekce - STROJÍRENSTVÍ

Fakulta strojní, 3. ročník

Magisterský studijní program – MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Předkládaná práce se zabývá nedestruktivním měřením tloušťky stěn dutých turbínových lopatek zhotovených z žárovečných slitin niklu První brněnskou strojírnou Velká Bíteš. Stanovení tloušťky stěn probíhalo třemi metodami a to metodou ultrazvukovou, metodou vířivých proudů a metodou magnetické skvrny, jejichž výsledky byly porovnány jak vzájemně, tak i s hodnotami naměřenými metrologickými metodami. Předkládaná práce rovněž obsahuje diskuzi výsledků, doporučení nejvhodnější metody a náměty pro další výzkum.

Klíčová slova: Nedestruktivní měření tloušťky stěny, ultrazvuková metoda, metoda vířivých proudů, metoda magnetické skvrny, turbínové lopatky, žárovečné slitiny niklu.

1 Úvod

Současný trend ve zvyšování požadavků na kvalitu výrobků je důvodem ke stálému rozvoji technik a způsobů kontroly. Kontrola je nezbytnou součástí výrobního procesu a spolu s bezchybnou výrobou bývá zárukou požadovaných provozních a bezpečnostních vlastností výrobků, jako jsou jakost, spolehlivost a dlouhodobá životnost.

Metody kontroly se dělí na dvě základní odvětví a to na metody destruktivní a nedestruktivní. U metod destruktivních dochází k nevratnému poškození výrobku, což především u kusové či malosériové výroby bývá nepřijatelné. Nedestruktivní metody zkoušení oplývají nespornou výhodou, že k poškození zkoušeného výrobku nedochází. Nedestruktivní metody nacházejí uplatnění ve strukturokopii, defektoskopii, ale i při měření tlouštěk vrstev a stěn. Dodržení předepsané tloušťky stěny výrobku je jedním z důležitých faktorů, který rozhoduje o shodnosti či neshodnosti výrobku. Práce pojednává o měření tlouštěk stěn turbínových lopatek, což jsou velice mechanicky i tepelně namáhané součásti lopatkových strojů. Zeslabení stěn u takto exponovaných výrobků by mohlo značně ovlivnit jejich pevnostní vlastnosti a bezchybný provoz. A právě k odhalování neshodných výrobků v průběhu výroby jako prevence slouží nedestruktivní metody zkoušení materiálu, jejichž hlavním úkolem je tak předcházet případným haváriím, a tím vzniklým škodám finančním, nehledě na případné ohrožení lidského zdraví, či dokonce životů.

Prezentovaná práce vznikla na základě požadavku výrobce turbínových lopatek, společnosti První brněnská strojírna Velká Bíteš, a.s.

V teoretické části prezentované práce jsou stručně představeny metody nedestruktivního zkoušení se zaměřením na nedestruktivní metody měření tlouštěk, kterými se práce zabývá. Navazující experimentální část představuje použité metody a postupy zkoušení, použité přístroje, zjištěné výsledky a jejich diskuzi.

2 Základní přehled metod nedestruktivního zkoušení

Nedestruktivní zkoušení materiálu (NDT) je často používaný pojem spadající do oboru zkoušení materiálových vlastností. Základním dělením obecných metod zkoušení materiálu je dělení na metody destruktivní a metody nedestruktivní. Mezi metody destruktivní řadíme všechny metody, při nichž dojde k poškození daného vzorku a tudíž jeho znehodnocení pro další použití.

Nedestruktivní zkoušení materiálu zahrnuje metody používané pro zkoušení určitého produktu nebo materiálu nebo systému, aniž by se narušila jejich budoucí použitelnost nebo ovlivnila schopnost plnit předpokládanou funkci.

Základními obory nedestruktivního zkoušení jsou defektoskopie a strukturoskopie. Strukturoskopie se zabývá složením daného materiálu, zatímco defektoskopie je obor zabývající se odhalováním povrchových a podpovrchových defektů materiálu. Metody používané pro zjišťování povrchových defektů jsou metody vizuální a kapilární. Metody magnetické a magnetoinduktivní, spolu s testováním vířivými proudy mohou být používány jak pro hledání povrchových, tak i podpovrchových defektů. Metody ultrazvukové a prozařovací se používají k detekci vnitřních vad.

Práce je zaměřena na nedestruktivní metody měření tloušťky stěn dutých lopatek plynových turbín, a proto zde budou přiblíženy pouze ty metody, jež v této problematice nalézají své uplatnění. V současné době se zmíněné měření provádí téměř výhradně metodami ultrazvukovými. Dále námi použité metody jsou metoda vířivých proudů a metoda magnetické skvrny.

2.1 Zkoušky ultrazvukem

Zvuk generován nad hranicí lidské slyšitelnosti (obvykle 20 kHz) je nazýván ultrazvuk. Rozsah frekvencí používaných v nedestruktivním bývá od 100 kHz do 50 MHz. Ultrazvuk je pro nedestruktivní metody testování užitečný svojí podstatně kratší vlnovou délkou, než má zvuk slyšitelný. Z toho plyne schopnost vlnění se odrážet i od velmi malých povrchů, jakými jsou právě defekty uvnitř materiálu. Ultrazvukové vlnění putuje ve formě vlny, podobně jako se pohybuje světelné vlny. Na rozdíl od světelných vln, které se mohou pohybovat i ve vakuu, ultrazvukové vlnění vyžaduje ke svému pohybu elastické prostředí ať už kapalné či pevné. Základními parametry takového vlnění jsou vlnová délka λ a perioda T .

Počet cyklů během jedné sekundy je označován jako frekvence a její jednotkou je Hertz (Hz). 1 Hz představuje 1 cyklus za sekundu.

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad [\text{m}] \quad (2)$$

Rychlost šíření vlny je konstantní v ideálně homogenním materiálu, při dané teplotě a tlaku.

Pohyb vlny je umožněn kmitavým pohybem částic elastického prostředí okolo jejich rovnovážných poloh. Pohyb vln se přenáší soudržnými silami částic z jedné částice na částice okolní. Takovýto vzruch je popsán vlnovou rovnicí [1].

$$a(t) = A_0 \cdot \sin \omega \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right) \quad [\text{m}] \quad (3)$$

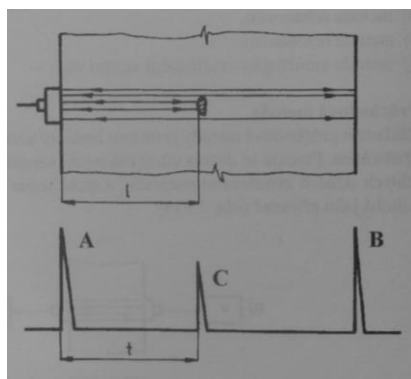
Šíření vlny může být různé v závislosti na směru kmitání částic a dělíme je na vlnění podélné, příčné, povrchové a deskové. Ultrazvuková defektoskopie zpravidla využívá vln podélných a příčných.

Druh šíření vlny, elastické vlastnosti prostředí a rozměrový poměr vlnové délky a prostředí jsou rozhodující faktory ovlivňující rychlost šíření ultrazvukových vln v materiálu. U podélného vlnění mají navíc vliv na rychlost šíření i tvar a druh zkoušeného výrobku. Velikostní poměr vlnové délky a prostředí hraje výraznou roli při rozlišitelnosti jednotlivých vad. Vlnová délka se musí volit s přihlédnutím k faktu, že ultrazvukem lze prokazovat jen takový defekt, jehož příčné rozměry kolmé na směr šíření vlnění jsou větší, než polovina délky vlny. Není-li toto splněno, vada není zjištělná z důvodu ohybu ultrazvukových vln. V průběhu šíření ultrazvukového vlnění pružným homogenním prostředím dochází k jeho zeslabování. S narůstající vzdáleností od zdroje tudíž klesá intenzita vlnění i amplituda kmitů. Důvodem toho je neustálé rozdělování energie vlny do stále většího prostoru, jakož i útlum v materiálu. Útlum v materiálu může být způsoben absorpcí, což je pohlcování ultrazvukového vlnění průchodem látkou způsobené vnitřním třením kmitajících částic, kde dochází k ztrátě mechanické části mechanické energie přeměnou na energii tepelnou. Dalším mechanismem útlumu je rozptyl ultrazvukových vln v prostředí, především na jejich rozhraní. Větší útlum mají materiály, u nichž se vlnová délka blíží rozměru zrn. Hrubozrnější materiály mají tedy větší útlum, než mají materiály jemnozrné. Útlum ultrazvuku v materiálu je charakterizován koeficientem útlumu α [dB/mm].

Metody ultrazvukových zkoušek se dělí na metodu průchodovou, odrazovou, rezonanční a metodu umožňující zviditelnění vnitřních vad. Diplomová práce je zaměřena na měření tlouštěk stěn, k čemuž se užívá téměř výhradně metody odrazové. Z tohoto důvodu je nadále popsána pouze tato metoda.

Odrazová metoda si vystačí s přístupem ke zkoumanému předmětu pouze z jedné strany, v čemž má nespornou výhodu oproti metodě průchodové, což jí řadí na post nejpoužívanější ultrazvukové metody. Princip metody spočívá ve vysílání krátkých ultrazvukových impulzů do kontrolovaného předmětu. Tyto impulzy se odrážejí nazpět od protilehlého povrchu i vnitřních vad a vracejí se zpět do sondy, které jsou v případě sond dvouměničových současně vysílačem i přijímačem.

Výsledek měření je zobrazován na displeji přístroje ve formě ech. Počáteční echo je záznamem impulzu vstupujícího do materiálu, koncové echo je záznamem signálu navraceného. Případné echo odražené od vnitřního defektu se nachází mezi echem počátečním a koncovým.



Obr. 1 Princip odrazové metody

Měření tloušťky ultrazvukem je poměrně častá aplikace ultrazvukových metod a je možné ji zkoušet na klasických ultrazvukových defektoskopech, ale i na speciálních ultrazvukových tloušťkoměrech. Měření většinou probíhá s piezoelektrickými měniči s frekvencemi 0,5 MHz -20 MHz. Pro hrubozrnné materiály a materiály s velkým útlumem je však zapotřebí volit nižší frekvence.

Vyšší frekvence jsou naopak použitelné pro měření tenkostěnných materiálů s minimálním útlumem. Ultrazvukové měření tloušťky je založeno na měření času, který potřebuje signál na překonání dráhy od sondy k protilehlému povrchu a zpět. Za předpokladu konstantní rychlosti šíření rychlosti zvuku v materiálu vypočteme tloušťku následovně:

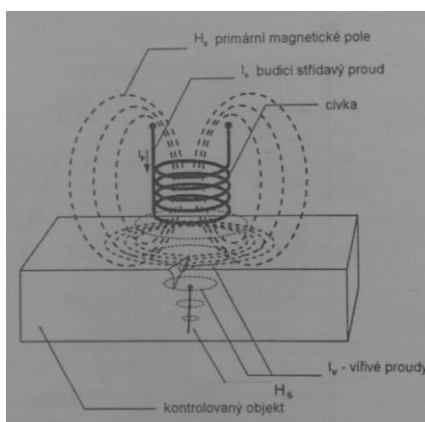
$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad [\text{m}] \quad (4)$$

2.2 Metoda vířivých proudů

Metoda vířivých proudů využívá střídavého magnetického pole ke stanovení fyzikálních vlastností materiálu. Zkoušený předmět je magnetován střídavým proudem procházející cívkou a vytváří se tak časově proměnné magnetické pole. Toto magnetické pole indukuje ve zkoušeném předmětu elektromagnetickou sílu a vznikají tak proudy, které nazýváme proudy vířivými. Základem metody vířivých proudů je závislost hustoty a rozložení indukovaných vířivých proudů na fyzikálních vlastnostech a geometrii magnetovaného tělesa. Struktura materiálu určuje fyzikální vlastnosti zastoupené elektrickou vodivostí a permeabilitou, zatímco případná existence vad určuje geometrii. Vířivé proudy ovlivňují svými magnetickými účinky původní magnetické pole budící, které je po vektorovém součtu obou polí zeslabeno, čímž je dáno magnetické pole výsledné. Napětí indukované tímto výsledným magnetickým polem je parametr, dle kterého je měření vyhodnocováno.

U metody vířivých proudů rozlišujeme 2 metody měření: metody s průchozí cívkou a metody s příložnou cívkou.

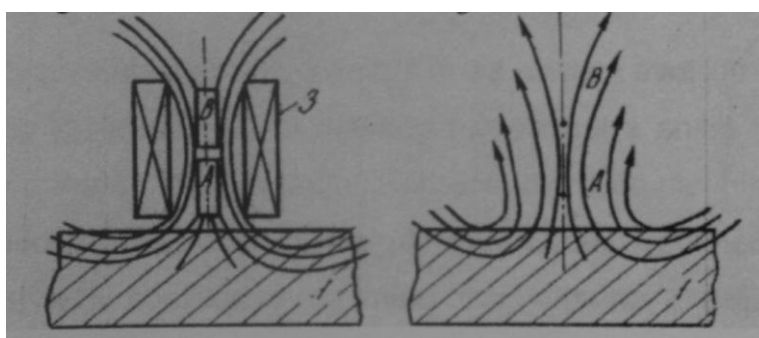
Metoda s příložnou cívkou se zaměřuje na kontrolu velkých a tvarově složitých výrobků. V tomto případě se cívka napájená střídavým proudem přikládá ke zkoušenému tělesu radiálně a osa budícího magnetického pole směřuje kolmo na zkoušený povrch. Magnetické pole vířivých proudů svým působením ovlivňuje vlastnosti příložné cívky a způsobuje změnu její impedance. Tato metoda je vhodná pro zjišťování vad materiálu, měření vodivosti, ale i měření tloušťky elektricky nevodivých vrstev na elektricky vodivém podkladu.



Obr. 2 Princip příložné cívky

2.3 Metoda magnetické skvrny

Metoda magnetické skvrny, neboli metoda magnetického bodového pólu, je metoda spadající do magnetických strukturoskopických metod. Metoda spočívá v souvislosti mezi magnetickými vlastnostmi, konkrétně remanentní intenzitou a strukturně mechanickým stavem materiálu. Metoda magnetické skvrny pracuje s tzv. doménami, což je elementární oblast materiálu se shodně orientovanými atomárními magnetickými dipóly. Není-li materiál vystaven vnějšímu magnetickému poli, materiál se na makroskopické úrovni jeví jako demagnetizován. Důvodem jsou rozdílně orientované magnetické domény, jejichž výsledný magnetický moment je z makroskopického pohledu nulový. Přítomnost vnějšího magnetického pole H_0 způsobí místní skokovou změnu orientace domén a vzniká tak vlastní magnetické pole zmagnetizovaného místa H_r . Po zrušení vnějšího magnetického pole brání některým doménám v návratu do původních poloh překážky ve struktuře, např. dislokace, a materiál si uchovává své magnetické vlastnosti, čímž vzniká remanentní polarizace I_r .



Obr. 3 Měření metodou magnetické skvrny. Vlevo magnetizace, vpravo měření, kde 1 je stěna feromagnetika, 3 je magnetizační cívka, A a B je snímač H_r .

Princip metody spočívá v měření intenzity zbytkového pole H_r pod čelem Hallovi či Försterovi sondy. Hodnota H_r se následně zobrazí na displeji přístroje. Demagnetizační činitel N vypovídá o vnějších i strukturních geometrických poměrech rozhraní feromagnetika. Vliv jednotlivých zrn na výslednou hodnotu H_r je závislý na stínícím účinku a na jejich vzdálenosti od snímače. S hloubkou průniku magnetizačního pole klesá vliv jednotlivých zrn na H_r . Nastavení strukturoskopu se provádí podle magneticky tvrdého etalonu nebo normálu intenzity pole H .

3 Experiment

Experimentální část práce vychází z podmětu První brněnské strojírny Velká Bíteš, a.s., která si na katedře materiálu, fakulty strojní, Technické univerzity v Liberci objednala měření profilu dutin a tloušťky stěn turbínových lopatek ultrazvukem. Jedná se o tři turbínové lopatky vyrobené přesným litím na vytavitelný model z žáropevných slitiny niklu. Měření ultrazvukem probíhalo ultrazvukovým defektoskopem Dio 562. Pro potřeby této práce bylo zadání objednavatele rozšířeno o metodu vířivých proudů využitím přístroje Nortec 1000, o pokus s tloušťkoměrem NDT1 K5 a strukturoskopem Domena B3.b.

Materiály lopatek jsou v našem případě ze slitin niklu a jsou paramagnetické. Níže zobrazené přístroje NDT1 K5 a DOMENA B3.b však měří tloušťku stěny lopatky na základě vzdálenosti čela sondy od feromagnetického materiálu. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí vytvořit feromagnetický podklad. Feromagnetické vrstvy materiálu byly vytvořeny sypkými médii, kterými byly vyplněny dutiny měřených lopatek.



Obr. 4, 5, 6 Vzorky lopatek plynových turbín zhotovených z žárovevných slitin niklu

Lopatka 02 Inconel 713 LC	Lopatka T40 MAR-M 247	Lopatka 05 Inconel 713 LC
-------------------------------------	---------------------------------	-------------------------------------

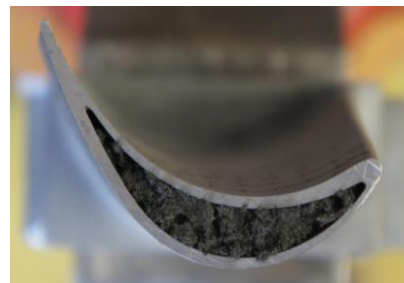
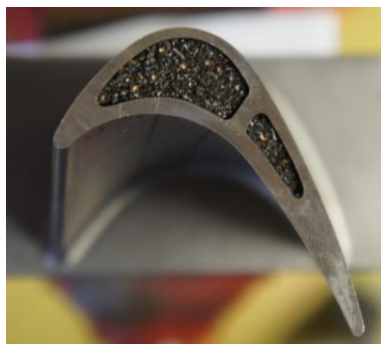
Tab. 1 Chemické složení materiálu Inconel 713 LC, naměřeno XRF spektrometrem Bas Delta

Vzorek	Cr	Ni	Mo	Fe	Co	Nb	Ti	W	Ta	Al	Shoda
02	11,13	73,86	3,853	0,159	0,116	1,467	0,668			8,74	

Tab.2 Chemické složení materiálu MAR-M 247, naměřeno XRF spektrometrem Bas Delta

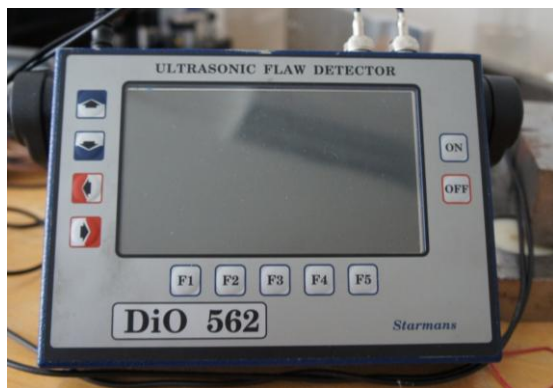
Vzorek	Cr	Ni	Mo	Fe	Co	Nb	Ti	W	Ta	Al	Shoda
T40	7,77	61,17	0,639	0,213	10,6		0,788	10,84	2,03	5,96	MarM247

Jako feromagnetická média byly použity ocelové tryskací broky (kuličky), drobné špony z litiny 422425 vzniklé při broušení za sucha a nakonec velice jemné špony (brusná pěna) z oceli 13 240.6 získané jako separát z magnetického separátoru (dále jen pěna).



Obr. 7, 8, 9 Pomocná feromagnetická média

Ocelové kuličky	Litinové špony	Brusná pěna
-----------------	----------------	-------------



Obr. 10 Ultrazvukový defektoskop Dio 562



Obr. 11 Defektoskop Nortec 1000



Obr. 12 Tloušťkoměr NDT1 K5



Obr. 13 Strukturoskop Domena B3.b

Použité měřicí přístroje

4 Výsledky a diskuze výsledků

Naměřené výsledky byly získány pomocí tří metod – metodou ultrazvukovou, metodou vířivých proudů a metodou magnetické skvrny. Experiment prokázal možnost měření tlouštěk turbínových lopatek všemi metodami avšak s rozdílnou úspěšností a aplikovatelností. Všechny metody používají ruční sondy a měření s těmito sondami probíhalo pouze s ručním přikládáním. Z použitých sond je velikostně vhodná sonda pouze použitá sonda ultrazvuková. Sondy ostatních použitých metod jsou velikostně nevhodné pro měření dutých povrchů. Např. sonda přístroje Nortec 1000 má průměr dosedací plochy 8 mm, čímž mohly vznikat nepřesnosti způsobené nedoléháním celé plochy kontaktu sondy na zkoumaný povrch. Pro měření dutých ploch turbínových lopatek by byly zapotřebí sondy bodové. Další nepřesnosti do měření byly pravděpodobně vneseny již zmíněným ručním přikládáním sond ke zkoušené lopatce, kde i přes veškerou snahu nebylo v mnohých případech možné zaručit kolmost sondy k povrchu. Možný návrh řešení pro tento poznatek by mohlo být použití robotického ramena, které by dle zadaného profilu tvaru lopatky kopíroval povrch se sondou vždy v kolmé poloze na měřené místo.

Na zkoušených lopatkách bylo nalezeno i několik míst, které bylo možné změřit metrologickými způsoby (měřicí středisko Zeiss v Tedom Jablonec, popř. posuvné měřítko). V těchto měřených bodech byly porovnány naměřené hodnoty nedestruktivními metodami s hodnotami naměřenými mechanickým způsobem.

Tab. 3 Naměřené hodnoty u lopatky 02

Lopatka 02	průměr naměřených odchylek	
Použ. přístroj+médium	Relativní chyba	Absolutní chyba
Ultrazvuk Dio 562	2,25%	0,03 mm
NDT 1 -kuličky	4,73%	0,12 mm
NDT 1 -špony	5,69%	0,14 mm
Domena-kuličky	33,86%	0,85 mm
Domena-špony	6,92%	0,17 mm

Tab. 4 Naměřené hodnoty u lopatky T40

Lopatka T40	průměr naměřených odchylek	
Použ. přístroj+médium	Relativní chyba	Absolutní chyba
NDT 1 -kuličky	5,61%	0,108 mm
NDT 1 -špony	3,85%	0,052 mm
Domena-kuličky	31,14%	0,89 mm
Domena-špony	32,84%	0,89 mm

Tab. 5 Naměřené hodnoty u lopatky 05

Lopatka 05	průměr naměřených odchylek	
Použ. přístroj+médium	Relativní chyba	Absolutní chyba
NDT 1 -kuličky	9,47%	0,17 mm
NDT 1 -špony	6,54%	0,12 mm
NDT1 - pěna	5,46%	0,11 mm
Domena-kuličky	28,46%	0,55 mm
Domena-špony	22,15%	0,40 mm
Domena-pěna	28,92%	0,21 mm

Jako první byla použita metoda ultrazvuková prostřednictvím defektoskopu DIO 562 a bodové sondy Olympus Parametric V260-RM. Ultrazvuková metoda je běžně používána pro měření tloušťek materiálů, především oceli. Měření ocelových vzorků je poměrně snadné a i kalibrační měřky jsou z oceli zhotoveny. Při měření Inconelu jsme se potýkali s vyšším útlumem, než je tomu u oceli. Měření daných turbínových lopatek ze slitin niklu se vyznačovalo zhoršenou odečitelností údajů z displeje z důvodu většího útlumu v těchto slitinách, což dokládá např. nepřítomnost opakovaných ech. Získaná echa navíc nejsou tak výrazná, jako tomu je u oceli, což rovněž stěžuje odečítání na displeji, jelikož počáteční hrana echa není tak jednoznačně vertikální. Další možné zkreslení výsledků může zapříčinit přechod signálu ze sondy do vzorku a zpět. Použitá sonda má plastovou předsádku, která je s piezoelektrickými kontakty (krystalem) sondy vodivě spojena pomocí imerze (gelu), která postupem času vysychá. Tato imerzní tekutina má však přibližně čtyřikrát menší rychlost zvuku, než má zkoušený materiál. Výsledky ultrazvukové metody u lopatky 02 odhalily nezanedbatelný rozptyl naměřených hodnot. Průměr odchylek jednotlivých hodnot u této metody vychází 2,25 %, avšak v tomto případě se nejedná o příliš vypovídající hodnotu. Směrodatná odchylka měření je 14,83 % a maximální zjištěná odchylka je až 20,59 %, což odpovídá absolutní odchylce o 0,504 mm.

Další metodou použitou při zpracovávání práce byla metoda vířivých proudů. Metodu vířivých proudů využívají dva námi použité přístroje - defektoskop Nortec 1000 a tloušťkoměr NDT1 K5.

Při měření přístrojem Nortec 1000 nedostáváme konečnou hodnotu v milimetrech. Odečítání výsledků probíhá v dílcích rastru displeje přístroje. Naměřené hodnoty se porovnávají s hodnotou, která byla naměřena na místě vzorku s dostatečnou tloušťkou materiálu. Takové místo označujeme jako nekonečně silné. Měření přístrojem Nortec 1000 jsme prováděli u lopatek 02 a 05 s frekvencemi 2 a 5 kHz. U lopatky 05 jsme zjistili při frekvenci 2 kHz závislost mezi hodnotami naměřených přístrojem a skutečnou tloušťkou stěny lopatky. Zjištěná závislost spočívá v mírném poklesu hodnoty odečtených dílků rastu přístroje při nárůstu skutečné tloušťky stěny lopatky. Měření na tentýž lopatce, avšak při frekvenci 5 kHz tuto skutečnost potvrdilo, dokonce je zmíněná závislost mnohem zřetelnější. Při měření u lopatky 02 jsme se potýkali s malým počtem bodů se známým skutečným rozměrem a tudíž z těchto výsledků nelze vyvozovat směrodatné závěry. Získané výsledky u této lopatky však naznačují opačnou závislost, než je tomu u lopatky 05. Měření přístrojem Nortec 1000 je také závislé na zakřivení povrchu, což dokazuje pokus s ocelovými válečky různých průměrů, které vykazovali výrazně odlišné výsledky při různých zakřivení stěn [1]. Přesnou geometrii měřených lopatek však neznáme, proto pokus s rozdílem hodnot na různě zakřivených površích není zahrnut do konečných výsledků měření touto metodou. Měření s přístrojem Nortec 1000 je teoreticky nejjednodušší, protože není zapotřebí žádné imerzní kapaliny ani médií vkládaných do dutin lopatky.

Druhým použitým přístrojem, využívající metodu vířivých proudů je tloušťkoměr NDT1 K5. Tento přístroj je primárně určen k měření tlouštěk povlaků a vrstev na podkladu. Domnívám se, že použití tohoto přístroje k měření tloušťky stěn je poměrně originálním nápadem. Pro náš pokus jsme využili magneto-indukční sondu, která je určena k měření dielektrických a vodivých neferomagnetických povlaků na feromagnetickém podkladu. Feromagnetický „podklad“ jsme vytvořili vyplněním chladicích dutin pomocnými feromagnetickými médii. Použita byla tři média, s kterými byl pokus úspěšný. Jako média byly použity tryskácké broky (kuličky), jemné litinové špony a velice jemné špony z oceli označované námi jako „pěna“. Média se vyznačovala rozdílnou obtížností manipulace i naměřenými hodnotami. Pro každé médium byla sestavena kalibrační křivka, avšak kalibrační křivky byly sestaveny pomocí plastových kalibračních měrek. Kalibrační křivky získané pro měření přístrojem NDT1 jsou lineární. Pro zlepšení vypovídající hodnoty kalibrační křivky by zajisté bylo vhodnější mít podobnou sadu kalibračních měrek zhotovenou přímo z materiálu zkoušeného vzorku, v našem případě tedy z konkrétních slitin niklu. Na naměřenou hodnotu měla vliv tloušťka měřené lopatky, ale i tloušťka feromagnetického média uvnitř lopatky, která je výsledkem tvarově složitě vnitřní dutiny lopatky, jež je médiem vyplněna. Přístrojem NDT1 bylo provedeno měření na všech lopatkách. Výsledky naměřené touto metodou se zdají být jako nejspolehlivější ze všech použitých metod. Průměr odchylek hodnot jednotlivých metod od skutečného rozměru se u této metody pohybuje v rozmezí od 3,85 do 14,61% a směrodatné odchylky vykazují hodnoty od 4,15 do 13,31%. Jako nejspolehlivější médium vyšly litinové špony, u nichž se průměr odchylek jednotlivých metod pohybuje v rozmezí od 3,85 do 6,54% z čehož po převedení na absolutní odchylky vycházejí od 0,052 do 0,115 mm.

Měření metodou magnetické skvrny jsme prováděli na přístroji Domena B3.b. U této metody bylo využito metody magnetické skvrny a zároveň efektu oddálení od feromagnetika, k čemuž bylo opět nutné opatřit dutiny lopatek feromagnetickými médii stejnými, jako v případě měření předchozím přístrojem NDT1 K5. Pro měření přístrojem Domena byly rovněž sestaveny kalibrační křivky na jednotlivých médiích, kde v tomto případě se jedná o exponenciální závislost. Kalibrační křivky byly opět získány pomocí sady plastových kalibračních měrek přikládaných na jednotlivá média, kde měření na každé měrce proběhlo vždy dvakrát. Nadále bylo zapotřebí korigovat naměřené hodnoty dle úbytku či nárůstu hodnoty magnetizace během jednotlivých sad měření a zjištěna byla vždy změřením etalonu

na začátku a na konci jednotlivých sad měření. Tento úbytek, či přírůstek je způsoben zahříváním sondy. Další vliv na měření mohly mít i vibrace vnesené do ručně držené sondy při stisku tlačítka start, které je na sondě umístěno. Rovněž u této metody má na výslednou hodnotu naměřenou přístrojem Domena vliv nejen tloušťka stěny lopatky, nýbrž i množství (tloušťka) feromagnetické podkladové vrstvy. Závislost naměřené hodnoty magnetizace na tloušťce feromagnetického podkladu je následující. Čím menší je tloušťka feromagnetického podkladu, tím větší hodnotu magnetizace přístroj naměří a naopak. To je způsobeno tím, že elektrická energie vložená do magnetického impulsu se soustřeďuje do čím dál menšího objemu feromagnetika a vytvoří se tak silnější permanentní magnet.

Zaznamenané výsledky přístrojem Domena nejsou příliš uspokojivé. Průměr odchylek se pohybuje od 6,92 do 33,86 %, což odpovídá absolutním odchylkám od 0,174 do 0,847 mm. Směrodatné odchylky se pohybují od 16,66 do 48,61 % a největší naměřená odchylka byla zaznamenána dokonce 84,07 %, což odpovídá absolutní odchylce 2,22 mm! Obecně se měření s přístrojem Domena vyznačuje velkým rozptylem naměřených hodnot.

Interpretace výsledků získaných měření nedestruktivními metodami bohužel není snadná. Přístroje většinou neudávají konečný výsledek, který je následně nutno získat korekcemi a výpočty. I přes opakovaná měření se ve výsledcích mnohdy vyskytují i hodnoty, které se výrazně liší od naměřených hodnot získaných mechanickými způsoby měření. Největší zaznamenaná odchylka měření je 84,07 % u lopatky T40, měřeno přístrojem Domena, médium-kuličky. Dokazuje to nesnadnost prezentované problematiky, kdy za důvody můžeme považovat chybu lidského faktoru, obtížné dosahování kolmosti sond na povrch vzorku, v některých případech nedoléhání celého povrchu sondy na složité radiusy křivých povrchů stěn a v neposlední řadě i rozdílné tvary vnějšího profilu lopatky s profilem vnitřní dutiny a tudíž nerovnoběžnost normál těchto profilů.

5 Závěr

Prezentovaná práce je zaměřena na stanovení tloušťky stěn dutých lopatek plynových turbín ze žáropevných Ni slitin a porovnání výsledků několika metod (UT, ET, MT). V případě dodaných vzorků turbínových lopatek se však jedná tzv. superslitiny Ni, konkrétně Inconel 713 LC u lopatek 02 a 05 a MAR-M 247 v případě lopatky T40.

V teoretické části jsou představeny metody nedestruktivního zkoušení. Experimentální část práce představuje měřené vzorky, pomocná feromagnetická média a výsledky měření, které jsme získali pomocí tří metod – metodou ultrazvukovou, metodou vířivých proudů a metodou magnetické skvrny. Měření probíhalo pomocí čtyř přístrojů a to defektoskopu Dio 562, Nortec 1000, NDT1 K5 a Domena B3.

Experiment práce prokázal možnost měření tlouštěk turbínových lopatek všemi metodami, avšak s rozdílnou přesností a použitelností. Jako metoda s nejlepšími výsledky se jeví měření s tloušťkoměrem NDT1 K5. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití litinových špon jako pomocného feromagnetického média. V této kombinaci přístroje a média bylo dosaženo průměru odchylek jednotlivých měření od 3,85 do 6,54 %, absolutní odchylky vycházejí od 0,052 do 0,115 mm a směrodatné odchylky od 4,66 do 9,35 %.

Před případnou konkrétní aplikací daných metod by byl nezbytný aplikační vývoj, který by stanovil přesné podmínky měření, zajistil by přesné polohování sondy a sestavil korekční křivky.

6 Literatura

- [1] VANĚK, David. *NEDESTRUKTIVNÍ TOPOGRAFIE STĚN DUTÝCH LOPATEK PLYNOVÝCH TURBÍN*. Liberec, 2015. Diplomová práce.

Název	Studentská vědecká a odborná činnost 2015 - Strojírenství
Autor	kolektiv autorů
Vydavatel	Technická univerzita v Liberci
Určeno pro	studenty
Schváleno	Rektorátem TUL dne 25.5.2015, čj. RE 31/15
Vyšlo	v květnu 2015
Vydání	1.
Počet stran	108
Tiskárna	Vysokoškolský podnik Liberec, spol. s r.o.
Číslo publikace	55-031-15

ISBN 978-80-7494-209-9