



Analýza magnetických akumulátorů kinetické energie.

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Jana Svobodová**
Vedoucí práce: Ing. Jan Valtera, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

Analysis of magnetic accumulators of kinetic energy.

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering
Author: **Jana Svobodová**
Supervisor: Ing. Jan Valtera, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jana Svobodová**
Osobní číslo: **S13000187**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Analýza magnetických akumulátorů kinetické energie.**
Zadávací katedra: **Katedra textilních a jednoúčelových strojů**

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

1. Proveďte rešerši známých magnetických systémů v konstrukci strojů.
2. Proveďte citlivostní analýzu vybraných rozměrů modelu magnetického akumulátoru.
3. Proveďte magneto-dynamickou analýzu akumulátoru při průchodu duralové rozváděcí tyče.
4. Experimentálně ověřte vliv vířivých proudů na funkci akumulátoru.

Rozsah grafických prací: **výkresová dokumentace**
Rozsah pracovní zprávy: **25 stran formát A4**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

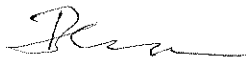
- [1]CAMPBELL, P.: Permanent Magnet Materials and Their Application. Cambridge: Reprint, 1991. ISBN 9780521566889.
[2]Manuál komerčního softwaru ANSYS Maxwell.
[3]VALTERA, Jan. Optimalizace systému rozváděcí tyče rotorových dopřádacích strojů. Liberec, 2013. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra textilních a jednoúčelových strojů.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Valtera, Ph.D.**
Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Datum zadání bakalářské práce: **10. listopadu 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **10. února 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 10. listopadu 2015

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na analýzu magnetických akumulátorů kinetické energie vyvinutých pro centrální rozváděcí systém příze rotorových dopřadacích strojů. Centrální rozváděcí systém zajišťuje pomocí přímočarého vratného pohybu rozváděcí tyče přesné vedení příze při jejím navíjení na výstupní cívku. Při tomto pohybu dochází k vysokému namáhání rozváděcí tyče a podélnému kmitání. Magnetický akumulátor akumuluje kinetickou energii v koncových úvratích rozváděcího pohybu a tím pomáhá snížit dynamické síly na rozváděcí tyč. Cílem této práce je provést analýzu stacionárního a nestacionárního magnetického pole akumulátoru v různých uspořádáních. Následně pak navrhnout geometrii nového pólového nástavce pro navýšení magnetické síly v koncových polohách rozváděcího pohybu.

Pro tyto účely byl v programu FEMM 4.2 vytvořen model, pomocí kterého byla provedena kvazistatická analýza. Při této analýze byl prováděn návrh nového pólového nástavce, který dosahuje vyšší magnetické síly než původní pólový nástavec a tím snižuje potřebný počet akumulátorů na rozváděcím systému. V programu Ansys Maxwell byl vytvořen model, pomocí kterého byla provedena magneto-dynamická analýza akumulátoru při průchodu duralové rozváděcí tyče. V této analýze byla zjišťována velikost účinků od vířivých proudů při průchodu duralové rozváděcí tyče akumulátorem.

Výsledky z kvazistatické i magneto-dynamické analýzy byly následně experimentálně ověřeny. Výsledky z měření se shodovaly s hodnotami ze simulací a verifikovaly tak vytvořené modely magnetických akumulátorů různých uspořádání.

Výsledkem práce je ověřený model magnetického akumulátoru pro magneto-statické a magneto-dynamické analýzy. Dále je výsledkem geometrie pólového nástavce, se kterým dochází k téměř dvojnásobné magnetické odpudivé síle a díky tomu se počet akumulátorů na dopřadacím stroji může snížit až o polovinu. V poslední části byl analyzován vliv vířivých proudů při pohybu magnetických těles na stroji a zhodnoceno jejich případné využití.

Klíčová slova

Magnetický akumulátor, rotorový dopřadací stroj, rozváděcí tyč, pólový nástavec, magnetická síla

Abstract

This thesis focuses on an analysis of magnetic accumulators of kinetic energy that were developed for the central traversing system of yarn on rotor spinning machines. By means of a reciprocally moved traversing rod, the central traversing system provides precise guiding of yarn during its winding up on the output bobbin. During this motion the traversing rod is exposed to high stress and longitudinal vibration. Magnetic accumulators accumulate kinetic energy in the reversal points of the reciprocating movement and thus helps to reduce dynamic forces of traversing rod. The aim of this work is to analyse static and dynamic magnetic field of magnetic accumulator in various layouts. Based on that the goal is to design geometry of a new pole piece for magnetic accumulator in order to increase the magnetic force in the end position of the traversing movement.

For these purposes, a model in the program FEMM 4.2 was created and quasi-static analyses were performed. Results of these analyses were used for the proposal of a new pole piece, which enables higher maximal magnetic force compared the original pole piece and therefore reduces the number of accumulators to the traversing system. The model for magnetic-dynamic analysis was created in the program Ansys Maxwell. Using this model, the eddy currents effects of duralumin rod passing through the accumulator on the magnetic field were investigated.

The results of quasi-static and magnetic-dynamic analyses were verified experimentally. The results of measurements and simulations were consistent and verified the created models of magnetic accumulator in different configurations.

The result of this is the experimentally validated model of magnetic accumulator for the quasi-static and the magnetic-dynamic analysis. Furthermore, there was designed a more powerful pole piece with almost doubled maximal magnetic repulsive force, that enables to reduce the number of used accumulators to about half. In the last part the influence of eddy currents in the movement of the magnetic objects of the machine was analysed and their potential use was discussed.

Keywords

Magnetic accumulator, rotor spinning machine, traversing rod, a pole piece, magnetic force

Obsah

Seznam použitých značek	9
1 Úvod	10
2 Magnetické systémy v konstrukci strojů	11
2.1 Rešerše vybraných magnetických systémů	11
2.1.1 Magnetické spojky	11
2.1.2 Magnetická ložiska	14
2.2 Rešerše systémů pro akumulaci energie v úvratích rozváděcího systému	16
2.2.1 Pružinový akumulátor	16
2.2.2 Magnetický akumulátor s posuvnými permanentními magnety	18
2.2.3 Magneto-mechanický akumulátor	19
2.2.4 Magnetický akumulátor	21
3 Model magnetického akumulátoru	24
3.1 Model v programu FEMM	24
3.2 Model v programu Ansys Maxwell	25
3.3 Materiálové vlastnosti	26
3.4 Okrajové podmínky	27
3.5 Parametry sítě	28
4 Citlivostní analýza magnetického akumulátoru	29
4.1 Návrh upínky	30
4.2 Návrh pólového nástavce	31

4.2.1	Varianta s možností upnutí vodiče příze na upínku	31
4.2.2	Varianta bez možnosti upnutí vodiče příze na upínku	35
5	Magneto-dynamická analýza akumulátoru při průchodu duralové tyče	38
5.1	Vířivé proudy.....	38
5.2	Vliv vířivých proudů	39
6	Měření	42
6.1	Experimentální ověření kvazistatické analýzy	43
6.1.1	Konstrukční řešení přípravků pro kvazistatické měření.....	43
6.1.2	Kvazistatické měření	45
6.1.3	Původní pólový nástavec.....	45
6.1.4	Výsledný pólový nástavec.....	47
6.2	Experimentální ověření magneto-dynamické analýzy.....	48
6.2.1	Konstrukční řešení přípravků pro dynamické měření	48
6.2.2	Dynamické měření	49
6.2.3	Původní pólový nástavec.....	50
6.2.4	Výsledný pólový nástavec.....	52
6.2.5	Varianta s ochrannou trubicí	53
	Závěr.....	54
	Literatura	55
	Seznam příloh.....	56

Seznam použitých značek

RT	rozdávěcí tyč
d [mm]	vnitřní průměr rozvávěcí tyče
D [mm]	vnější průměr rozvávěcí tyče
d ₂ [mm]	vnitřní průměr trubky
D ₂ [mm]	vnější průměr trubky
h [mm]	výška
BH max [MGOe]	hustota energie
μ _r [-]	relativní permeabilita
σ [S/m]	konduktivita látky
ρ [kg/m ³]	hustota
M [A/m]	magnetizace
G [S]	elektrická vodivost
S [m ²]	obsah průřezu vodiče
l [m]	délka vodiče

1 Úvod

Tato práce navazuje na výzkum rozváděcího systému s magnetickým akumulátorem pro rotorové dopřádací stroje.

Rotorový dopřádací stroj je textilní stroj, který z pramenu vláken vytváří přízi. Stroj je složen ze sekcí, které dále obsahují pracovní jednotky. Pracovní jednotky jsou umístěny sériově vedle sebe a tvoří společně sekce. Pracovní jednotka obsahuje uložený vstupní materiál, spřádací jednotku a navíjecí ústrojí včetně výstupní cívky. Stroj je pak následně sestavován spojením daného počtu sekcí do série podle požadavků zákazníka, přičemž veškeré pohony jsou umístěny ve skříni pohonů umístěné na jednom konci stroje. V současné době je snahou navýšit rychlost rozváděcího pohybu a počet sekcí dopřádacího stroje. Například dopřádací stroj BT923 a jeho nástupce s označením R40 obsahuje více než 20 sekcí s pracovní délkou až 47 m.

Při navíjení vzniká na výstupní cívce divoké křížové vinutí. Aby se zajistilo divoké křížové vinutí na výsledné cívce, je zapotřebí přízi rovnoměrně rozvádět po cívce z jednoho kraje na druhý. Tento přímočarý vratný pohyb dále nazýváme jako rozváděcí pohyb. Rozváděcí pohyb se skládá ze základního rozváděcího pohybu se zdvihem např. 148 mm a z přidruženého pohybu rozmazávání se zdvihem např. 4 mm. Efekt hromadění příze je eliminován pomocí přidruženého pohybu označovaného v textilní terminologii jako tzv. rozmazávání krajů. Výsledným pohybem rozváděcí tyče je tedy přímočarý vratný pohyb s proměnnou úvratí.

Pro přenos požadovaného rozváděcího pohybu od centrálního rozváděcího mechanismu k jednotkám celého stroje se využívá rozváděcí tyč, která je sériově spojena z tyčí délky 2 350 mm do celkové sestavy délky stroje. U části blíže k rozváděcímu mechanismu je umístěna rozváděcí tyč z vysokopevnostního uhlíkového kompozitu a u vzdálenějších sekcí se používají slitiny hliníku. Při rozváděcím pohybu vznikají na rozváděcí tyči vysoké dynamické síly a dochází k výrazným podélným deformacím a kmitání. Pro nové výkonnější stroje je mez pevnosti tyči na hranici dovoleného namáhání. Proto se hledají způsoby snížení dynamického namáhání tyče. Jedním z řešení je akumulace kinetické energie v úvratích rozváděcího pohybu. Pro akumulaci dynamických sil v úvratích přímočarého vratného pohybu s proměnnou polohou úvratě se může používat magnetický akumulátor. [4]

2 Magnetické systémy v konstrukci strojů

2.1 Rešerše vybraných magnetických systémů

V konstrukci strojů se používají různé magnetické prvky. V bakalářské práci jsou uvedeny dvě skupiny magnetických prvků. První skupinou jsou prvky, které vykonávají rotační pohyb. Do této skupiny byly vybrány magnetické spojky a ložiska. Ve druhé skupině jsou uvedeny systémy akumulace energie v úvratích přímočaré vratného pohybu, které jsou podrobněji popsány v kapitole 2.2. Další magnetické systémy jsou např. magnetická soukolí, senzory, snímače a krokové motory.

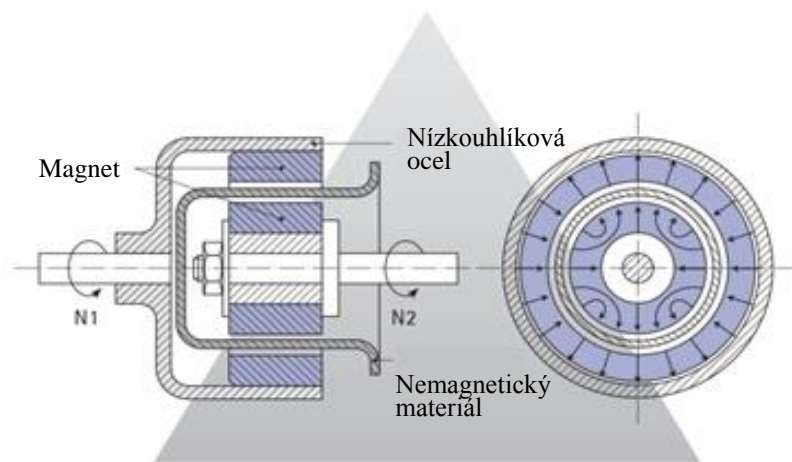
2.1.1 Magnetické spojky

Magnetická spojka je zařízení, které je schopné přenášet síly bez fyzického kontaktu. Proto pracují bez opotřebení a za podmínek normálního používání mají téměř neomezenou životnost. Přitažlivé a odpudivé magnetické síly jsou využívány k přenosu lineárního nebo rotačního pohybu. V nejjednodušším případě se magnetická spojka skládá ze dvou částí: hnací a hnané. Hnací část je připojena k hnacímu stroji (motoru). Díky magnetické indukci, hnaná část reaguje na hnací část, což vede k přenosu mechanické energie. Tento přenos má několik výhod. První výhodou je izolace komponent, díky které se minimalizují mechanické vibrace a umožňuje vložit mechanickou zábranu mezi hnací a hnanou část. Druhá výhodou je, že umožňuje axiální, radiální a úhlové vychýlení mezi hnací a hnanou částí. Další výhody jsou ochrana proti přetížení, měkké a bezúdržbové přenášení točivého momentu a regulace otáček.

Magnetické spojky se dělí na tři části v závislosti na použití: synchronní, s vířivými proudy a hysterezní. Dále se dělí podle konstrukce na kotoučové a soustředné.

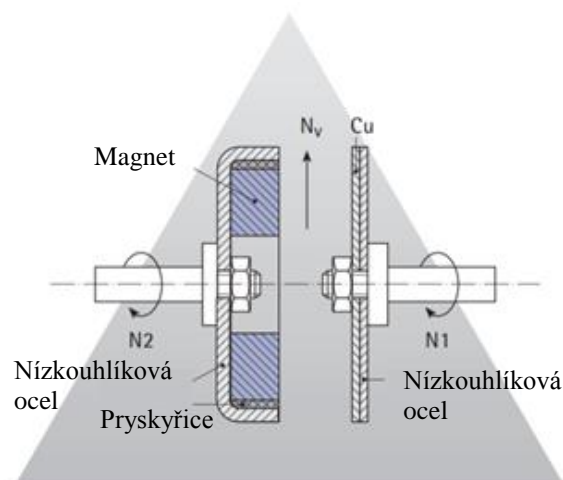
Synchronní spojky přenáší točivý moment v poměru 1:1 z hnací na hnanou část. Na každé z částí jsou umístěny naproti sobě stejné magnetické póly. Stejně magnetické póly se vzájemně odpuzují, zatímco opačné se přitahují. Díky tomu se vytváří magnetické pole. Hnaná část se začíná roztáčet až do doby, kdy se začne magnetické pole překrývat. Velikost výsledné síly závisí nejen na množství překrytí, ale také na vlastnostech magnetického materiálu a velikosti vzduchové mezery. Při určité velikosti vzduchové mezery je dosaženo maximálního přenosu momentu. Synchronní spojka je schopna přenést vysoký točivý

moment, ale je omezena poměrem přenosu 1:1. Používá se na přístroje, které vyžadují přímé spojení bez skluzu během provozu. Na obrázku 1 je ukázka synchronní soustředné spojky.



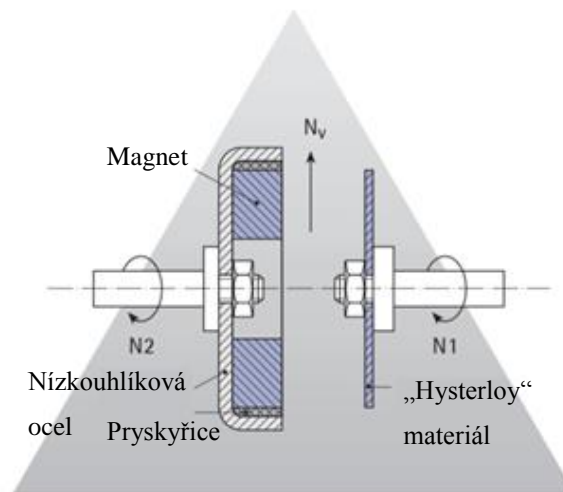
Obrázek 1: Synchronní soustředná spojka, dle [1]

Spojka s vířivými proudy je asynchronní verze, která spoléhá na nesoulad rychlosti mezi hnací a hnanou částí za vzniku síly. Pole se střídavými pólovými permanentními magnety je umístěno na hnací nebo hnanou část. Druhá z částí je z elektricky vodivého materiálu. Nejdříve se utváří relativní rychlost mezi hnací a hnanou částí. Přenosný moment se zvyšuje s otáčkami za minutu. Při zvyšování otáček se část z vodivého materiálu zahřívá v důsledku rozvoje vířivých proudů, což způsobuje prudký pokles dosažitelného točivého momentu. Výhodou této spojky je rychlostní nesoulad mezi hnací a hnanou částí. Nevýhodou je snížení točivého momentu a potřeba chlazení. Na obrázku 2 je ukázka kotoučové spojky s vířivými proudy.



Obrázek 2: Kotoučová spojka s vířivými proudy, dle [1]

Hysterezní spojka je kombinací synchronní a spojky s vířivými proudy. Obvykle se používá v asynchronním stavu, ale může být využita i v synchronním. Řada střídavých pólových permanentních magnetů je umístěna buď na hnanou nebo na hnací část a druhá část je z materiálu „Hysterloy“. „Hysterloy“ materiál je konstruován tak, aby zlepšil hysterezní ztráty. Dále se lze snadno zmagnetizovat a odmagnetizovat. Na rozdíl od spojky s vířivými proudy, kde je energie z magnetického pole převedena na proudící elektrický proud a teplo, tato spojka využívá magnetickou energii na převod magnetického stavu „Hysterloy“ materiálu od severního k jižnímu pólu. Výhodou této spojky je minimální ohřev během asynchronního stavu. Nevýhodou je přenos malých hodnot točivých momentů a omezená velikost spojky z „Hysterloy“ materiálu. Na obrázku 3 je ukázka kotoučové hysterezní spojky. [1]



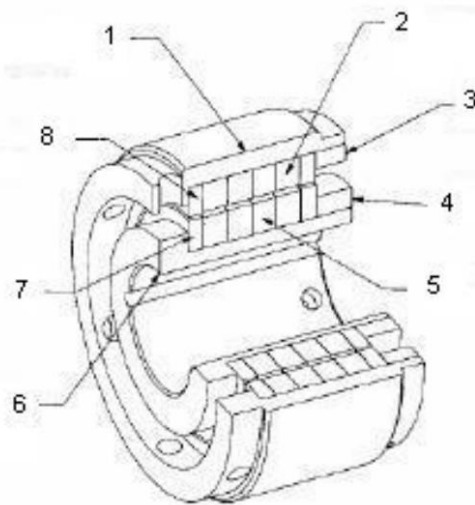
Obrázek 3: Kotoučová hysterezní spojka, dle [1]

2.1.2 Magnetická ložiska

U magnetických ložisek nedochází k žádnému mechanickému tření a opotřebení pohybujících se dílů, díky tomu se tyto ložiska nemusí mazat. Používají se ve strojních součástech, které pracují ve vakuu, při vysokých a nízkých teplotách, nebo v prostředí s agresivními kapalinami. Magnetická ložiska pracují na principu magnetické levitace, která způsobuje, že nedochází ke kontaktu mezi pohyblivými a nepohyblivými částmi. U některých typů ložisek je nutné dodávat elektrickou energii, proto mají větší provozní náklady než klasické typy ložisek.

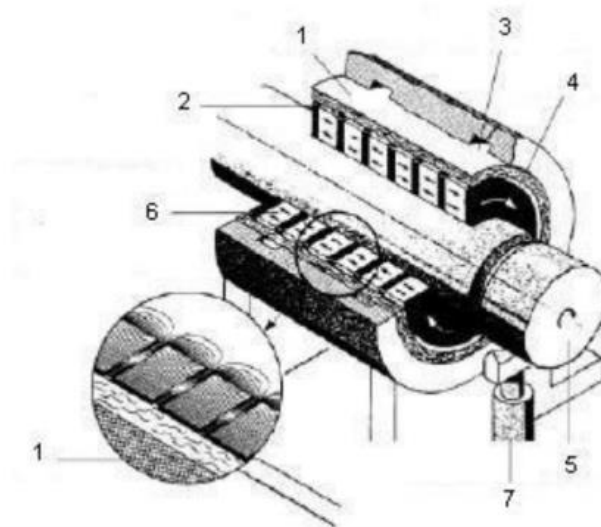
Magnetická ložiska dělíme na aktivní a pasivní. Pasivní ložiska nepotřebují pro svou činnost elektrickou energii, protože neobsahují žádné elektrické řídicí členy ani elektromagnety. Dále se pasivní ložiska dělí na ložiska s permanentními magnety a na ložiska s vysokoteplotními supravodiči.

Ložiska s permanentními magnety jsou nejjednodušší a nejlevnější ze všech, ale ještě nenašly široké uplatnění z důvodu nízké tuhosti a tlumení. Levitaci zajišťují přitažlivé nebo odpudivé síly nebo jejich kombinace. Ložisko s permanentními magnety (viz obrázek 4) se skládá z nerotujícího pouzdra 1, který tvoří obal ložiska. To je zalisováno do rámu. Pomocí rotujícího pouzdra 6 se upíná ložisko na čep hřídele. Permanentní magnety jsou uloženy ve statorové části 2 a v rotorové části 5. Z každé boční strany jsou umístěny nevodivá pouzdra 7 a 8. Ložisko je axiálně zajištěno prstencovými kroužky 3 a 4, které jsou nalisovány do pouzder statoru a rotoru.



Obrázek 4: Ložisko s permanentními magnety, dle [3]

Ložiska s vysokoteplotním supravodičem využívají principu odpudivé síly mezi supravodičem a permanentním magnetem. Označují se zkratkou HTS (HighTemperatureSuperconductor). HTS mají tu vlastnost, že ze svého objemu vytlačují magnetické pole. Pokud se supravodič vloží do prostředí s magnetickým polem, vzniká odpudivá síla. Supravodivost materiálu se projevuje až při nízkých teplotách kolem -150°C . Proto se tyto materiály musí chladit např. tekutým dusíkem. Výhodami jsou jednoduchost, nízká cena, spolehlivost a malá zástavba. Velkou nevýhodou je nutnost neustálého chlazení supravodičů, což může mít za následek křehnutí materiálu a možnost vzniku trhlin. Na obrázku 5 je zobrazeno radiální magnetické ložisko HTS. Na čepu hřídele 5 jsou upevněny permanentní magnety 6. Jednotlivé magnetické prstence odděluje železná podložka 2. Statorové pole obsahuje kanálky 3 pro proudění tekutého dusíku, který ochlazuje vysokoteplotní supravodiče 1. Vzduchová mezera 4 mezi supravodičem a rotorovými permanentními magnety zajišťuje bezkontaktní chod. Zvedací zařízení 7 se nachází pod čepem hřídele.



Obrázek 5: Radiální magnetické ložisko HTS, dle [3]

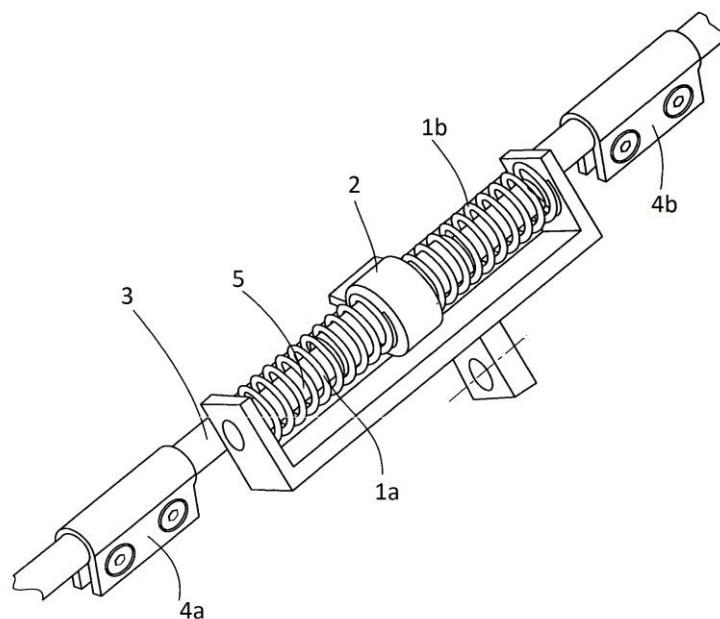
Aktivní ložiska potřebují pro svou činnost elektrickou energii. Tyto ložiska se označují zkratkou AMB (ActiveMagneticBearing). Funkce je stejná jako běžné elektromotory. Ve statoru je umístěno pole cívek, ve kterých vzniká pomocí elektrického proudu magnetické pole, které přitahuje rotor z feromagnetického materiálu. Mezi rotorem a státorem se nalézá vzduchová mezera. Výhody těchto ložisek je vysoce přesné uložení, tlumení vibrací, řízení velikosti vzduchové mezery, vysoká únosnost a nastavitelná tuhost. Nevýhody jsou vysoká cena, nižší spolehlivost, větší rozměr, regulační obvod a zahřívání ložisek. Ložiska ABM se používají ve výkonných setrvačnicích a turbínách. [2]

2.2 Rešerše systémů pro akumulaci energie v úvratích rozváděcího systému

V následujících kapitolách jsou popsány vybrané způsoby akumulace energie v úvratích rozváděcího pohybu rotorového dopřádacího stroje. V prvním případě se jedná o pružinový akumulátor, který je konstrukčně jednoduchý a má pružné mechanické dorazy. Dále jsou popsány akumulátory s permanentními magnety, které se díky vysoké účinnosti magnetických prvků mohou používat na bezkontaktní akumulaci kinetické energie.

2.2.1 Pružinový akumulátor

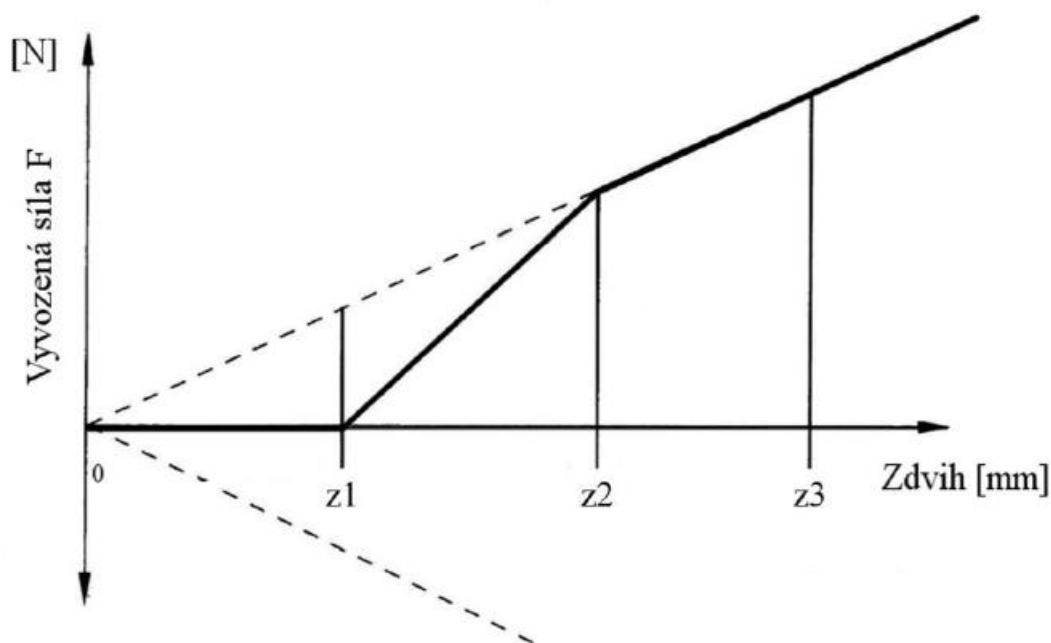
Pružinový akumulátor je popsán v patentovém spisu číslo WO 2008/058605 [5] a zobrazen na obrázku 6. Na rozváděcí tyči 3 jsou umístěny unašeče 4a a 4b rozváděcího ústrojí. Pružinový systém má dva předepjaté pružinové prvky 1a a 1b a mezi nimi je umístěn doraz 2. Pružinové prvky jsou konstruované jako vinuté tlačné pružiny. Rozměry pružin umožňují dostatečně dlouhý zdvih a díky tomu lze snadno regulovat tuhost akumulátoru.



Obrázek 6: Pružinový akumulátor, dle [5]

Během spřádacího procesu je doraz 2, který je umístěn posuvně volně na vodícím rámu 5, rozváděn střídavě jednotlivými unašeči, které jsou uloženy na rozváděcí tyči. Na vodícím rámu jsou umístěné předepjaté pružinové prvky, které jsou uspořádány tak, že doraz je vycentrován ve své středové pozici pružinového systému. Při pohybu rozváděcí tyče dochází ke kontaktu unašečů s dorazem, který se vychyluje ze své středové pozice $z1$. V první fázi dochází ke stlačování jedné pružiny $1a$ a uvolňování druhé $1b$, kdy síla narůstá s dvojnásobnou tuhostí. V druhé fázi, po stlačení $z2$ je pružina $1b$ zcela uvolněna a na akumulaci energie se podílí pouze pružina $1a$.

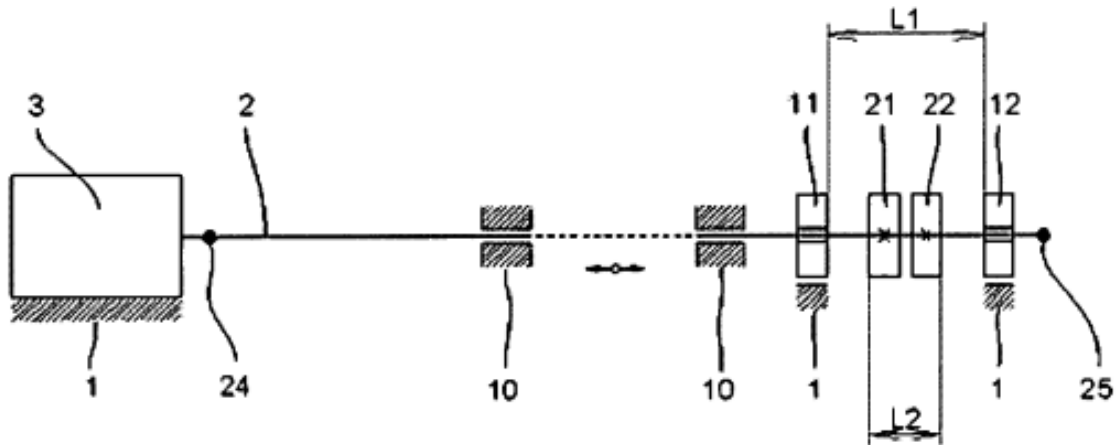
Na obrázku 7 je zobrazena pracovní charakteristika pružinového akumulátoru. Pružinový systém vykazuje lineární pružinovou charakteristiku s jednou částí strmější a druhou plošší. V první části je tuhost zhruba dvakrát větší než tuhost druhé části. Pracovní bod $z1$ znázorňuje počátek oblasti s razantním nárůstem dynamické síly. Vlivem změny polohy úvratě je nárůst vyvozené síly akumulátoru v důsledku rozmazávání krajů eliminován pracovní charakteristikou s nižší tuhostí v intervalu od $z2$ do $z3$. Během pohybu rozváděcí tyče do úvratě se kinetická energie akumuluje prostřednictvím energie pružnosti pružin a vydávána zpět při urychlování rozváděcí tyče směrem z úvratě pohybu. [5]



Obrázek 7: Pracovní charakteristika pružinového akumulátoru, dle [5]

2.2.2 Magnetický akumulátor s posuvnými permanentními magnety

Další řešení využívá bezkontaktní akumulaci odpudivých sil permanentních magnetů. Uvedené zařízení je popsáno v patentovém spisu číslo EP 2 562 112 A1 [7] a zobrazeno na obrázku 8.

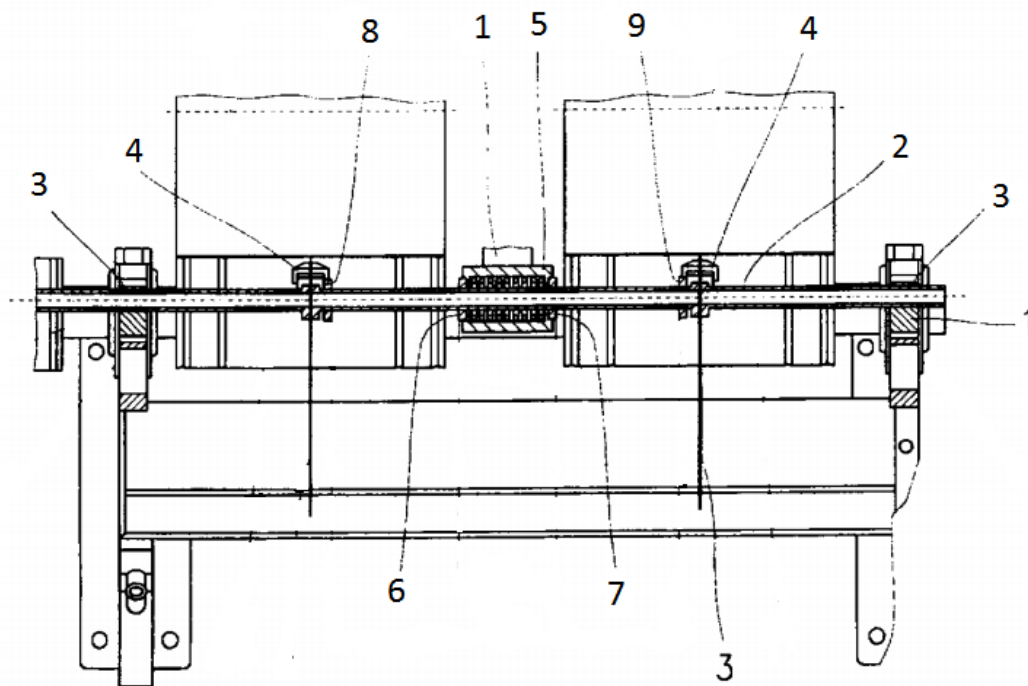


Obrázek 8: Schéma magnetického akumulátoru s posuvnými permanentními magnety, dle [7]

V rámu 1 dopřádacího stroje je rozváděcí tyč 2 upevněna pomocí vedení 10. Rozváděcí tyč je poháněna pomocí mechanismu, které je umístěno v rozváděcí krabici 3. Na volném konci rozváděcí tyče jsou umístěny pohyblivé magnety 21 a 22, které jsou pevně upevněny na rozváděcí tyči. K rámu stroje jsou pevně umístěny magnety 11 a 12, které mají tvar disku se středovým otvorem a jsou souosé s rozváděcí tyčí. Rozváděcí tyč prochází volně magnety 11 a 12. Pohyblivý magnet 21/22 a pevný magnet 11/12 tvoří magnetickou dvojici. Magnetické dvojice jsou k sobě orientovány svými souhlasnými póly, takže se odpuzují. Při přibližování magnetických dvojic k sobě dochází k nárůstu jejich odpudivé síly. Tím dochází k akumulaci kinetické energie do energie magnetického pole. Při reverzaci a opětovném urychlování směrem z úvratě se potenciální energie magnetických pružin transformuje do pohybu rozváděcí tyče. Nevýhoda magnetického akumulátoru spočívá v proměnné deformaci rozváděcí tyče při různých rychlostech rozvádění a nutnosti použití dalšího pohonu pro posuv magnetů. [7]

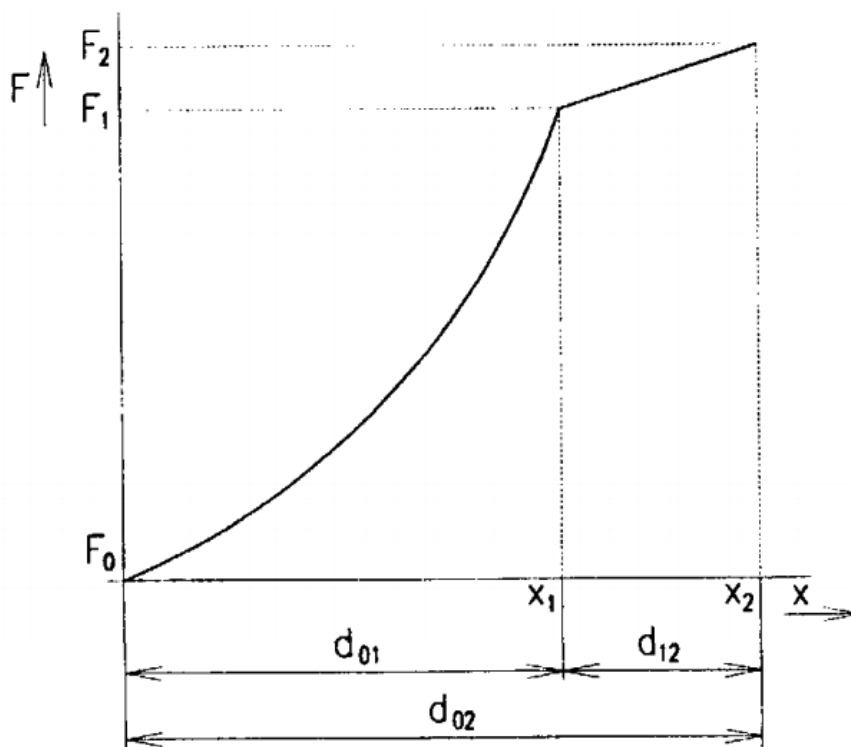
2.2.3 Magneto-mechanický akumulátor

Dalším řešením je magneto-mechanický akumulátor, který umožňuje akumulaci kinetické energie rozváděcí tyče při jejím intenzivním brzdění směrem do úvratě pohybu. Řešení je popsáno v patentovém spisu číslo 303 167 (viz obrázek 9). Přenos kinetické energie rozváděcí tyče do akumulátoru je realizován bezkontaktně pomocí magnetické pružiny. Dále obsahuje alespoň dvě magnetické dvojice tvořené opačnými póly magnetů uspořádaných proti sobě na rámu stroje 1 a rozváděcí tyče 2. Magnetické dvojice se skládají z alespoň jednoho pohyblivého magnetu 8 a 9 a dvou pevných magnetů 6 a 7.

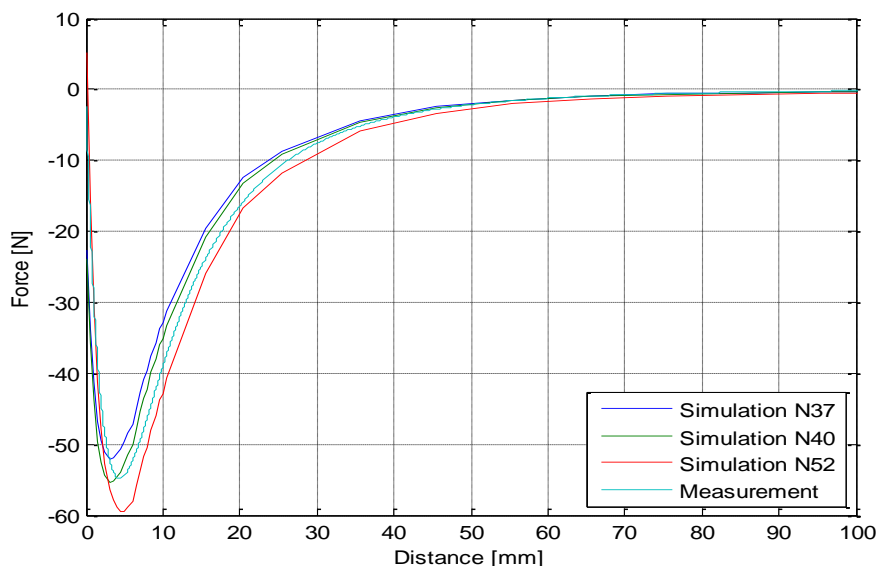


Obrázek 9: Dvojice sousedících pracovních míst textilního stroje s jednou pružinou, dle [6]

V každé sekci je na rozváděcí tyči umístěn vodič příze 4. Mezi každými dvěma sekcemi je umístěno souose k rámu válcové pouzdro 5, ve které je uložena tlačná šroubovitě vinutá pružina. Na válcové pouzdro jsou z obou stran umístěné prstencové permanentní magnety 6 a 7, které jsou orientovány k sobě opačnými póly. Na vodiči příze jsou umístěny magnety 8 a 9, které jsou pohyblivé vůči rozváděcí tyči a jsou přivráceny souhlasným pólem k permanentním magnetům. Při pohybu rozváděcí tyče směrem do pravé úvratě, se magnety 6 a 8 vzájemně přibližují. Tento pohyb je zobrazen na obrázku 10. V první fázi pohybu rozváděcí tyče progresivně roste odpudivá síla vzájemně se odpuzujících magnetů 6 a 8. Po vykonání dráhy d_{01} se dosáhne hodnoty předpětí pružiny F_1 . Ve druhé fázi se magnety vzájemně prakticky nepřibližují, ale vzhledem k relativně nízké tuhosti tlačné pružiny se začne stlačovat pružina a posunuje se válcové pouzdro. Odpudivá síla roste na dráze d_{12} lineárně a pozvolně. Během stlačování pružiny narůstá síla jen minimálně a proto i výsledná mezera mezi magnety 6 a 8 se zmenšuje jen nepatrně. [6]



Obrázek 10: Závislost průběhu odpudivé síly magnetů a síly tlačné pružiny před dosažením úvrati vratného pohybu rozváděcí tyče, dle [6]



Obrázek 12: Průběh odpudivé magnetické síly při různých materiálech magnetických prvků, dle [8]

Maximum odpudivé síly závisí na mnoha faktorech. Prvním podstatným faktorem je materiál magnetických prvků (viz obrázek 12). Dalším jsou tvar a materiál pólového nástavce. Nejvhodnější materiál na použití pólového nástavce je dle [10] ocel s označením 12 013. Při použití konstrukční běžné oceli s označením 11 373 dojde ke snížení přídržné síly o 6% než s ocelí 12 013, jak je zobrazeno v tabulce 1.

Tabulka 1: Závislost přídržné síly na druhu materiálu, dle [10]

Koeficient	Materiál
1	12 013 (technicky čisté železo)
0,94	11 373
0,82	11 343
0,75	11 500
0,7	11 700
0,6 – 0,3	Legované a nástrojové oceli

Permanentní magnety se vyrábí z různých materiálů. V současné době jsou nejsilnějšími komerčními permanentními magnety neodymové magnety. Tyto magnety jsou složeny z neodymu, železa a bóru, proto se pro ně používá zkratka NdFeB. Jsou až desetkrát silnější než klasické feritové magnety. Na obrázku 12 je ukázka průběhu magnetické odpudivé síly při použití různých materiálových tříd neodymových magnetů. Neodymový magnet s označením N52 je tvořen materiálem s největší hustotou energie (BH max) z uvedených materiálů v legendě, díky které je dosaženo vyšší magnetické síle oproti ostatním magnetům. Druhou skupinou permanentních magnetů jsou feritové (keramické) magnety, které jsou nejlevnějšími permanentními magnety. Základ feritu tvoří ve většině případů směs oxidů železa s uhličitánem barnatým nebo strontnatým. Poslední vybranou skupinou jsou samarium-kobaltové magnety SmCo. Jejich síla je téměř srovnatelná se silou neodymových magnetů, ale oproti neodymovým magnetům mají vyšší teplotní odolnost (cca o 100 °C) a přirozenou odolnost vůči korozi bez nutnosti použití povrchové úpravy. Magnety SmCo se dělí na dvě základní skupiny, podle poměru zastoupení samaria a kobaltu, na SmCo5 a Sm2Co17. V tabulce 2 jsou uvedeny vybrané druhy magnetů a jejich hustoty energií BH max. [12]

Tabulka 2: Vybrané druhy magnetů a jejich hustota energie BH max, dle [12]

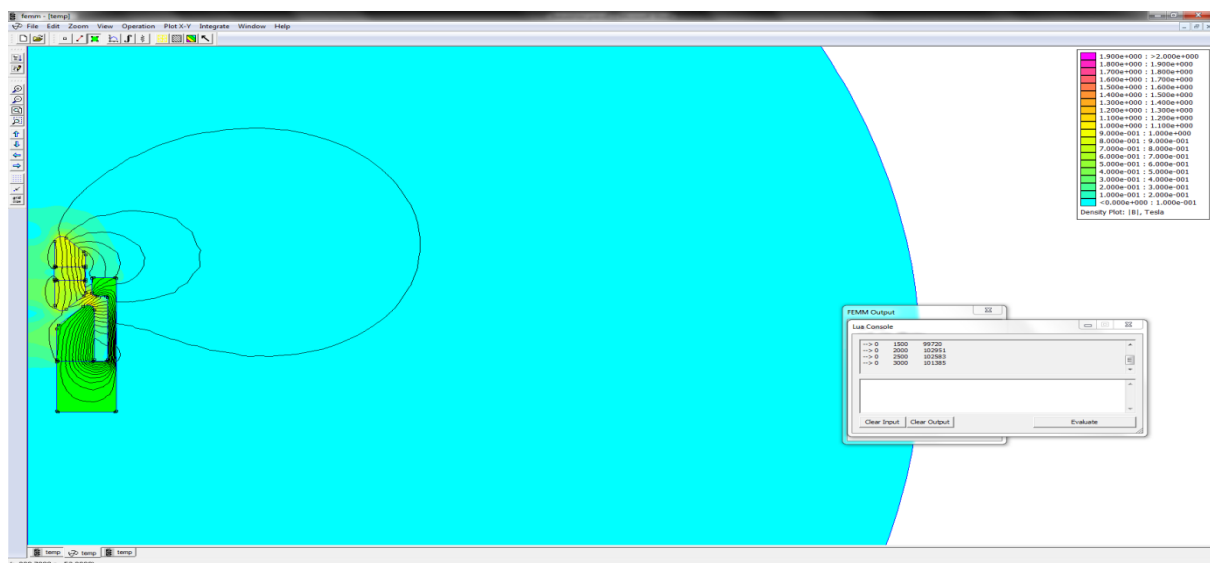
Druh magnetu	Označení materiálové třídy magnetu	Hustota energie (BH max) [MGOe]
NdFeB	N37	36-39
	N40	38-41
	N52	50-53
Feritový	MF23	2,5-3,2
	MF38	4,6-5,1
SmCo5	NMM-24-1:5	22-24
Sm2Co17	NMM-30-2:17	28-30

3 Model magnetického akumulátoru

Pro získání výsledků z analýzy stacionárního a nestacionárního magnetického pole s možností editace materiálových vlastností, byl vytvořen model magnetického akumulátoru. Kvazistatická analýza se provádí za účelem návržení nového pólového nástavce a dynamická za účelem ověření vlivu vířivých proudů na průběh odpudivé síly magnetického akumulátoru. Při návrhu nového pólového nástavce je cílem získat maximální sílu při zadaných podmínkách. První podmínkou je, aby maximum výsledné síly bylo co nejdále od kontaktu magnetu rámu s magnetem tyče. Druhou podmínkou je dodržení maximálních dovolených rozměrů pólového nástavce.

3.1 Model v programu FEMM

Pro kvazistatickou analýzu byl zvolen model magnetického systému vytvořený v programu FEMM 4.2 [11]. Ukázka prostředí programu je zobrazena na obrázku 13. Analýza byla převedena na 2D úlohu z důvodu rotační symetrie ve vertikálním směru. V programu FEMM byla prováděna kvazistatická analýza, kde se analyzuje stacionární magnetické pole v každém kroku (změně vzdálenosti magnetů). Výsledkem analýzy je průběh celkové odpudivé síly magnetů. Pohyb byl prováděn od kontaktu (0 mm) do vzdálenosti 125,5 mm. Při této vzdálenosti už působí pouze zanedbatelná hodnota síly. Pohyb magnetů tyče byl volen v krocích, který byl závislý na vzdálenosti magnetů tyče od magnetů rámu: krok 0,5 mm v intervalu $\langle 0; 10,5 \rangle$ mm, 5 mm v intervalu $\langle 10,5; 25,5 \rangle$ mm a 10 mm v intervalu $\langle 25,5; 125,5 \rangle$ mm. Pro uvažované ovlivňované okolí magnetů byla volena koule s poloměrem 150 mm a materiálem vzduch.

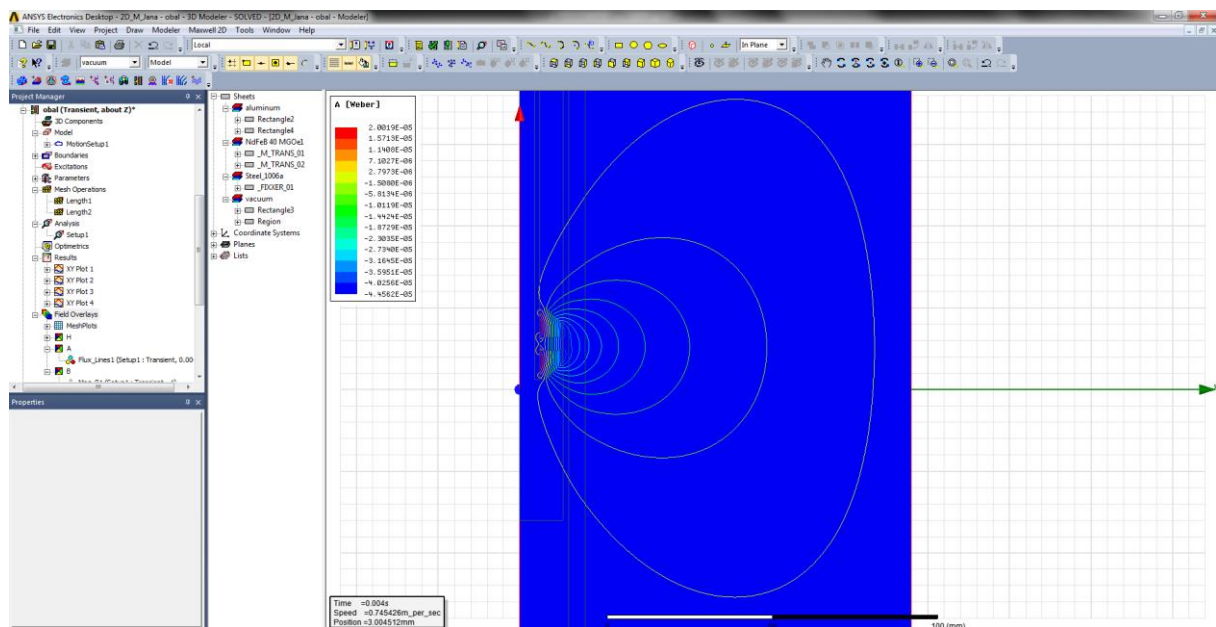


Obrázek 13: Prostředí programu FEMM 4.2 s výsledným pólovým nástavcem, dle [11]

3.2 Model v programu Ansys Maxwell

Pro dynamickou analýzu byl zvolen model magnetického systému vytvořený v programu Ansys Maxwell. Ukázka prostředí programu je zobrazena na obrázku 14. Geometrie byla vytvářena v programu Creo Parametric a do programu Ansys Maxwell byla importována ve formátu STEP. Z modelu byla vytvořena 2D úloha s rotační symetrií ve vertikálním směru (osa z). Okolí bylo voleno ve tvaru válce a materiálem vzduch.

V programu Ansys Maxwell byly použity dva typy modelů. První model byl vytvořen pro kvazistatickou analýzu z důvodu porovnání výsledků z programu FEMM. Druhý model byl vytvořen pro zjištění vlivu vířivých proudů při průchodu duralové rozváděcí tyče. Tento vliv se zjišťuje při dynamické analýze.



Obrázek 14: Prostředí programu Ansys Maxwell

3.3 Materiálové vlastnosti

Magnetický systém se skládá ze dvou magnetů tyče a jednoho magnetu rámu, které jsou ze stejného magnetického materiálu NdFeB 40 MGOe. Dále systém obsahuje upínku a pólový nástavec vyrobený z oceli 11 373 a rozváděcí tyč ze slitiny uhlíku AlMgSi 0,5. Materiálové vlastnosti byly používány z knihovny FEMM [11] a z Lexikonu technických materiálů [9]. Hodnoty materiálových vlastností, které byly použity pro analýzy, jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Materiálové vlastnosti použité pro simulace

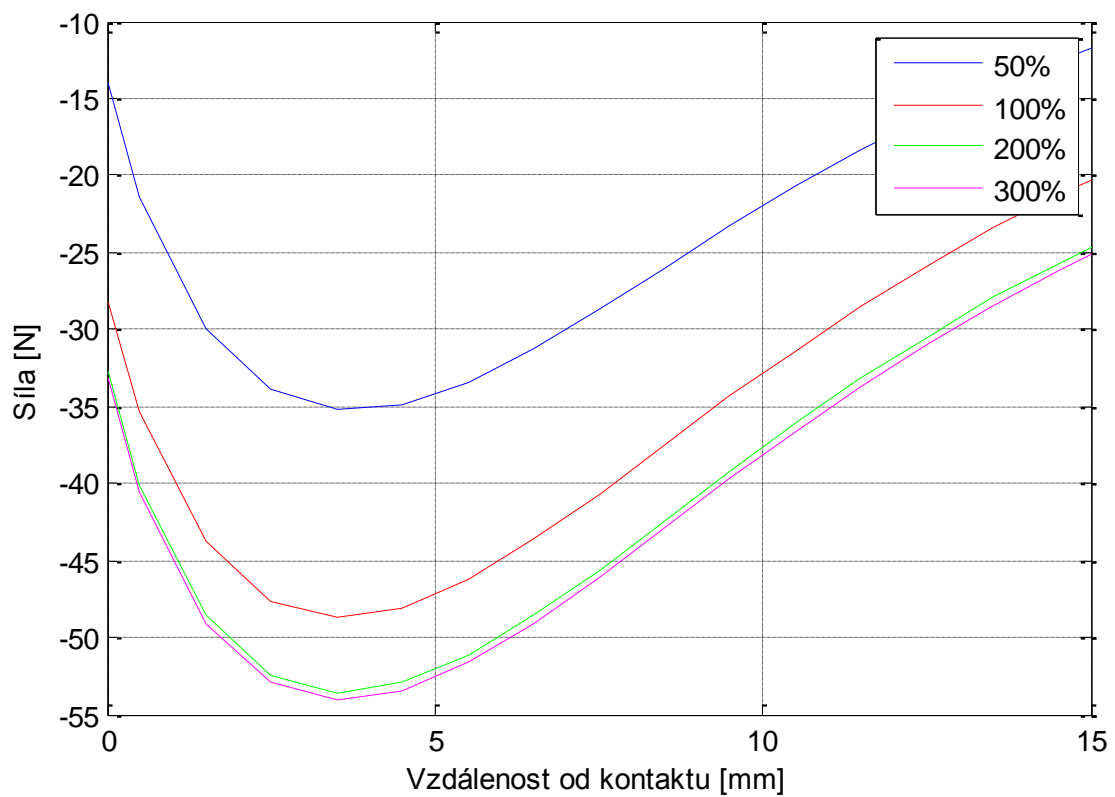
	NdFeB 40 MGOe	Ocel 11 373	AlMgSi 0,5	Polyamid 6
Relativní permeabilita [-]	1,049	1 404 / B-H křivka	1,004	13
Konduktivita [S/m]	667 000	5 800 000	36 000 000	-
Hustota [kg/m ³]	7 400	7 850	2 700	1 130
Magnetizace [A/m]	979 000	0	0	0

V tabulce je uveden i polyamid 6, který byl použit pro upínání sestavy do přípravku na měření, a v simulacích bylo ověřováno, jaký má vliv na velikost magnetické síly.

U oceli 11 373 lze relativní permeabilitu definovat dvěma způsoby. První je definování pomocí konstanty, kdy se jedná o lineární ocel. Druhý způsob je pomocí B-H křivky, kdy se jedná o nelineární ocel. B-H křivka vyjadřuje závislost hodnoty magnetické indukce B na měnící se hodnotě intenzity magnetického pole H. Pokud materiál ještě nebyl magnetován, nazývá se tato křivka magnetizační neboli křivka prvotní magnetizace. Pokud dochází k opakované a protisměrné magnetizaci daného feromagnetického materiálu mluvíme o hysterezní křivce.

3.4 Okrajové podmínky

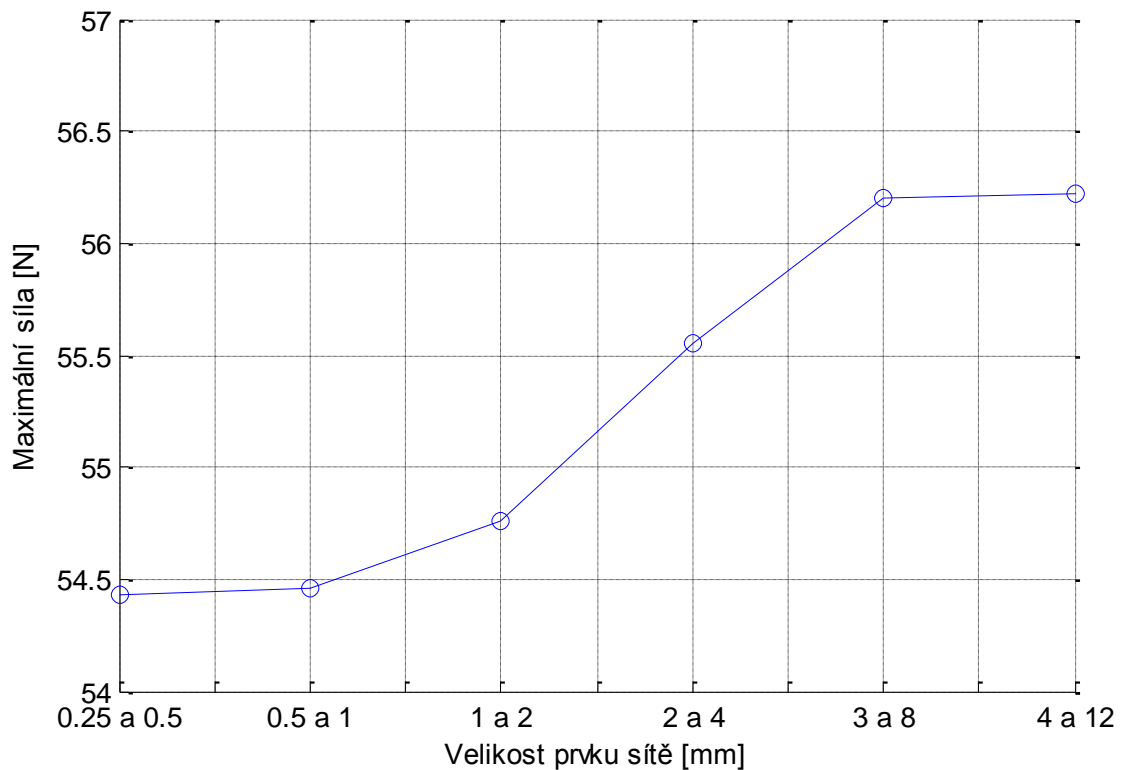
V programu Maxwell bylo voleno okolí jako procentní přírůstek k největšímu rozměru nakresleného tělesa. Nedostatečná velikost okolí může negativně zkreslit výsledky analýzy magnetického pole. Proto byly provedeny analýzy s různým navýšením rozměru tělesa okolí. Tyto změny jsou zobrazeny v obrázku 15. Při velikosti okolí 200% a 300% je rozdíl výsledného průběhu síly minimální, a proto byla volena 300% velikost okrajové podmínky okolí. Hodnota okrajové podmínky na vnější hranici okolí byla zvolena jako vektorový potenciál 0 weber/m.



Obrázek 15: Závislost změny okolí na průběhu síly

3.5 Parametry sítě

Velikost prvku sítě modelu byla volena ve dvou skupinách. Jednu skupinu tvoří prvky s velkou plochou (válcové vzduchové okolí), pro které byla volena větší velikost sítě. Druhou skupinu tvoří menší prvky (konstrukční prvky), pro které je volena jemnější síť z důvodu přesných výsledků analýz. Na obrázku 16 je ukázka změny velikosti sítě na maximální síle. Na ose x jsou popsány velikosti sítě. První číslo odpovídá konstrukčním prvkům a druhé válcovému okolí. Při velikosti sítě 4 mm a 12 mm je síla o 1,76 N vyšší než při velikosti 0,5 mm a 1 mm. Při změně sítě se výpočtový čas výrazně nemění. Pro další výpočty byla zvolena velikost sítě 0,5 mm a 1 mm, kterému odpovídá výpočtový čas cca 25 minut.

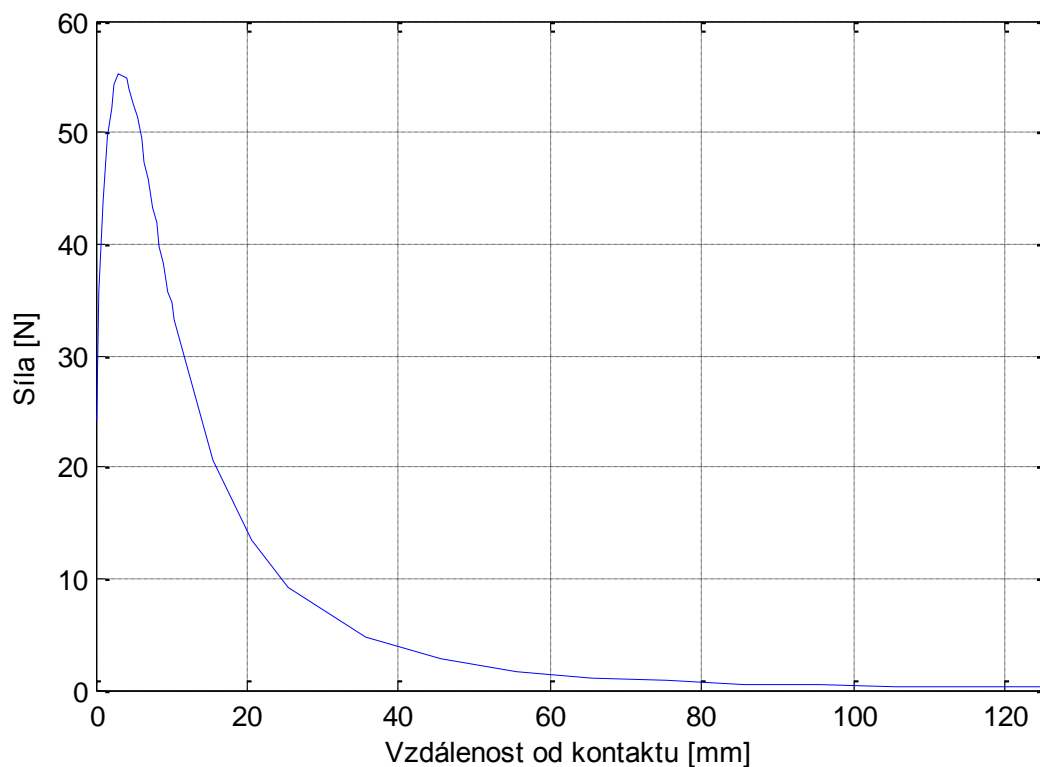


Obrázek 16: Závislost změny velikosti sítě na maximální síle

4 Citlivostní analýza magnetického akumulátoru

Cílem citlivostní analýzy bylo se pokusit navýšit magnetickou odpudivou sílu na co nejvyšší hodnotu a dosáhnout co největší vzdálenosti maxima od kontaktu. Upravovat bylo možné tvar upínky a pólového nástavce. Analýza byla prováděna v programu FEMM jako kvazistatická úloha.

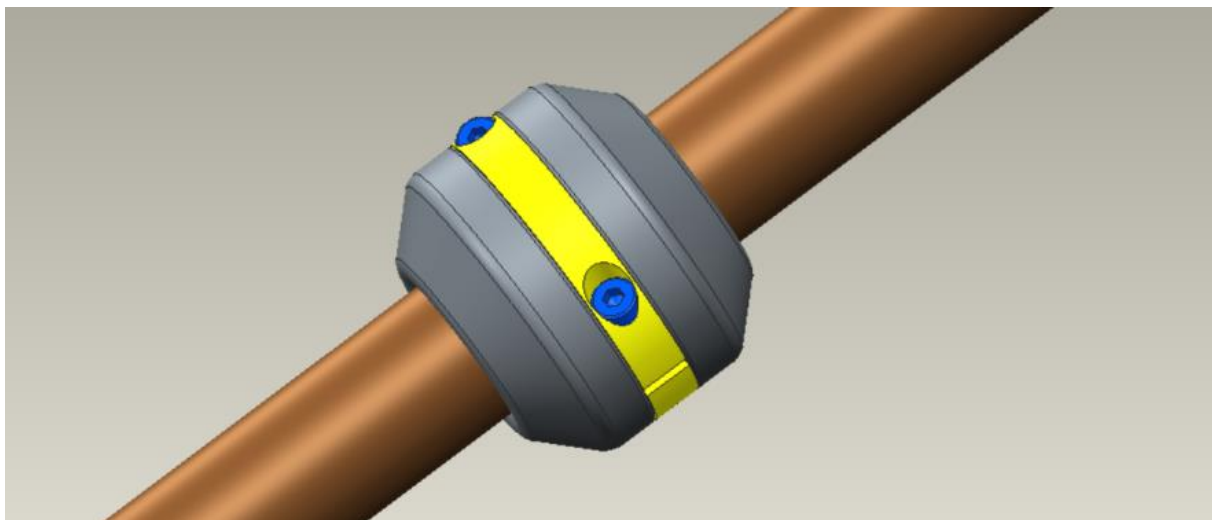
Původní varianta magnetického akumulátoru obsahovala upínku s rozměry: výška 4 mm, vnitřní průměr 12 mm a vnější průměr 26 mm a pólový nástavec s rozměry: výška 20 mm, vnitřní průměr 13 mm a vnější průměr 32 mm. Původní pólový nástavec dosahuje maximální síly 55,2 N a vzdálenost od kontaktu 3 mm. Průběh síly je zobrazen na obrázku 17.



Obrázek 17: Průběh síly při oddalování magnetů tyče s původním pólovým nástavcem

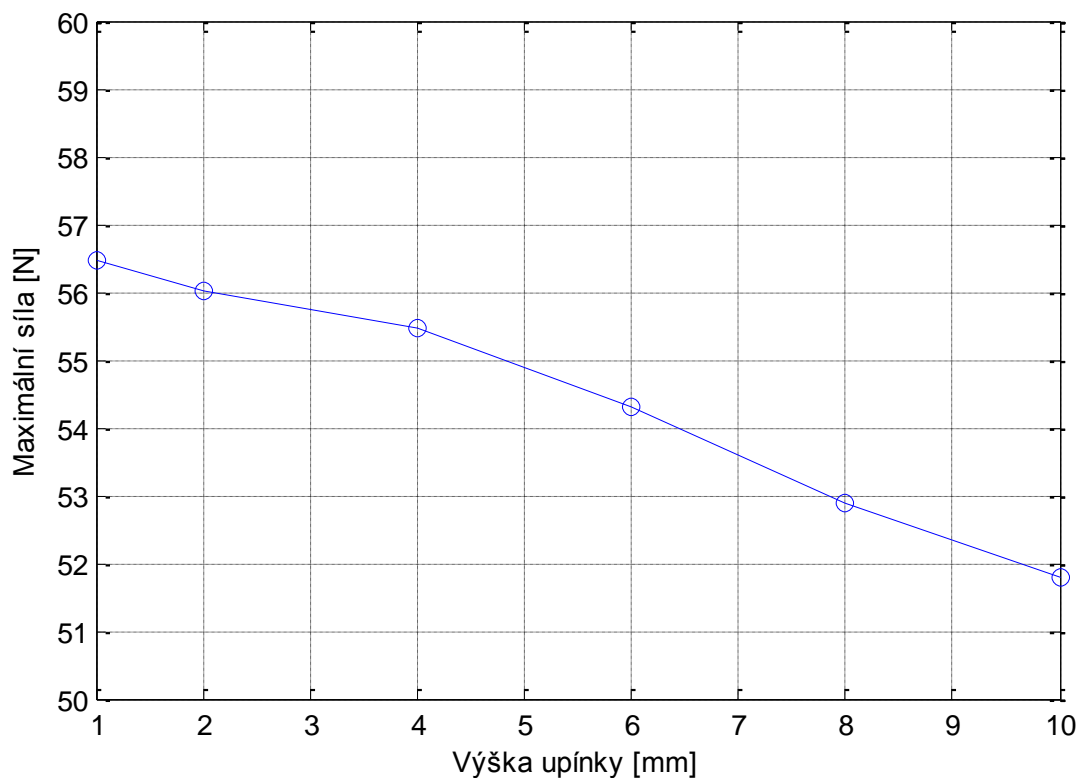
4.1 Návrh upínky

Pro upevnění magnetů tyče k rozváděcí tyči byl navržen ocelový upínací prvek z nízkouhlíkové oceli. Dělená upínka zajišťuje připevnění magnetů tyče v požadované pozici pomocí sevření obou polovin dvěma šrouby M2. Tato konstrukce je zobrazena na obrázku 18. Z důvodu konstrukce bylo možné měnit pouze výšku upínky. Minimální rozměr je 4 mm, který je dán z důvodu velikosti použitých šroubů.



Obrázek 18: 3D model upínky s magnety tyče

Simulace byla prováděna s původním pólovým nastavcem. Na obrázku 19 je vidět, že při zvětšování výšky upínky maximální síla klesá. Vzdálenost od kontaktu se při změně výšky upínky nemění. Proto bylo rozhodnuto ponechat stávající variantu, při které je maximální síla 55,2 N a vzdálenost od kontaktu 3 mm.



Obrázek 19: Závislost změny šířky upínky na maximální síle

4.2 Návrh pólového nástavce

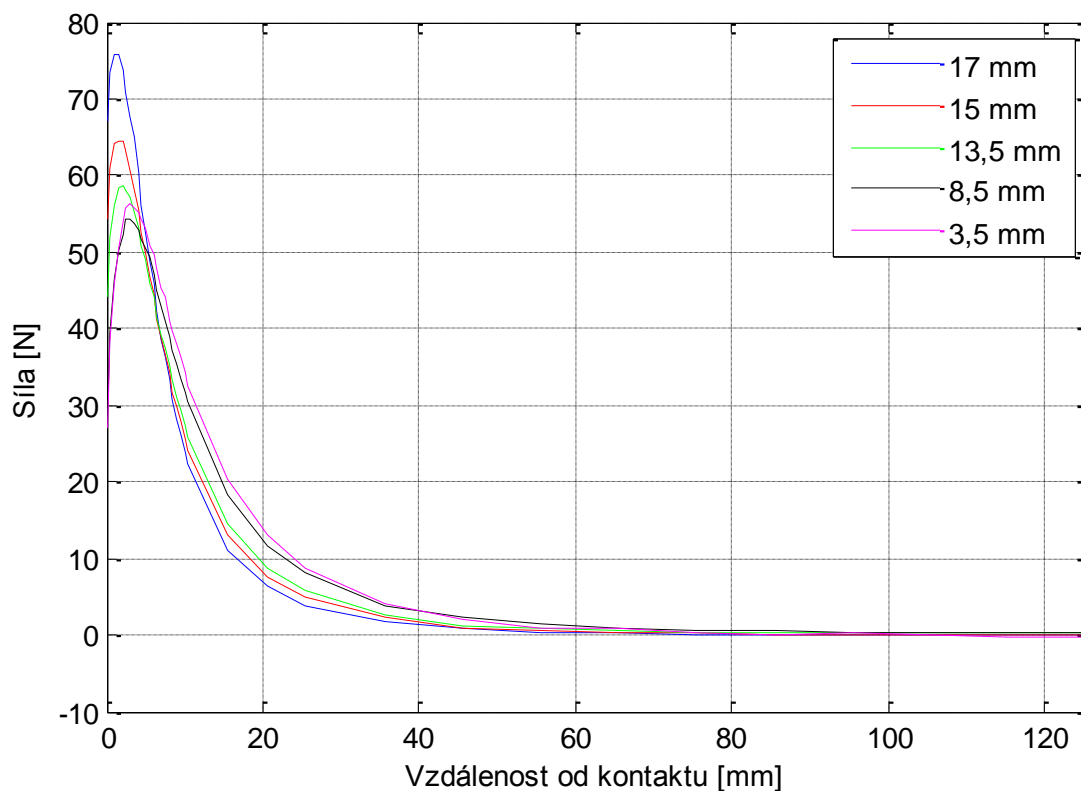
Při návrhu pólového nástavce bylo nutné respektovat podmínku maximálních dovolených rozměrů z důvodu případné zástavby stroje. Ty neměly překročit vnější průměr 40 mm a celkovou délku 55 mm. V první variantě návrhu byl zachován předpoklad umístění vodiče příze na upínku. U druhé varianty se již s připevněním vodiče příze na upínku nepočítá.

4.2.1 Varianta s možností upnutí vodiče příze na upínku

Při prvním kroku návrhu byl ponechán válcový tvar pólového nástavce a měnil se pouze vnější průměr a výška. Při konstantním vnějším průměru 30 mm byla měněna výška nástavce v intervalu $\langle 5; 35 \rangle$ mm. Při zvětšování výšky pólového nástavce síla přibližně lineárně rostla od 52,6 do 56,1 N. Další analýza pólového nástavce byla provedena při jeho konstantní výšce 20 mm při změně vnějšího průměru v intervalu $\langle 32; 40 \rangle$ mm. Při zvětšování průměru síla z původních 55,2 N vzrostla na 57,1 N.

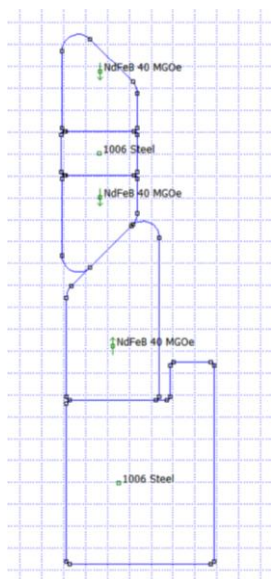
K nejvyšší magnetické odpudivé síle docházelo s rozměry pólového nástavce o rozměrech: vnější průměr 40 mm a výška 15 mm. Při těchto změnách se maximum vždy nacházelo ve vzdálenosti 3 mm od kontaktu.

Při druhém kroku návrhu pólového nástavce bylo navrženo na vnější části pólového nástavce osazení (viz obrázky 21 a 22), jehož geometrie byla analyzována v různých variantách. U prvního kroku úpravy byla při konstantní mezeře mezi magnetem a osazením 1 mm měněna výška osazení v intervalu <3,5; 17> mm.

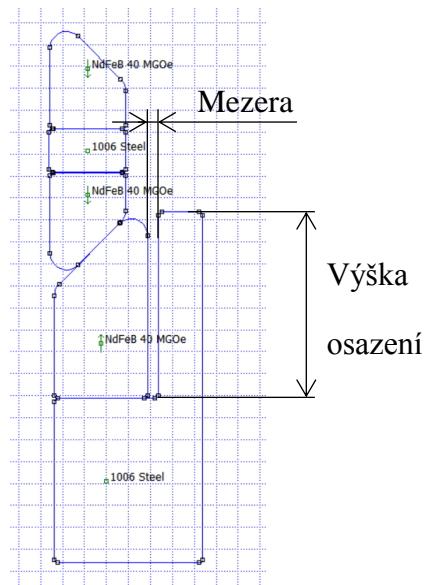


Obrázek 20: Průběh síly v závislosti na změně výšky osazení

Jak je vidět na obrázku 20, při velikosti osazení 17 mm je dosaženo největší hodnoty síly 75,9 N ve vzdálenosti 1,5 mm od kontaktu. Na obrázcích 21 a 22, je zobrazeno konstrukční řešení pólového nástavce s výškou osazení 3,5 mm a 17 mm.

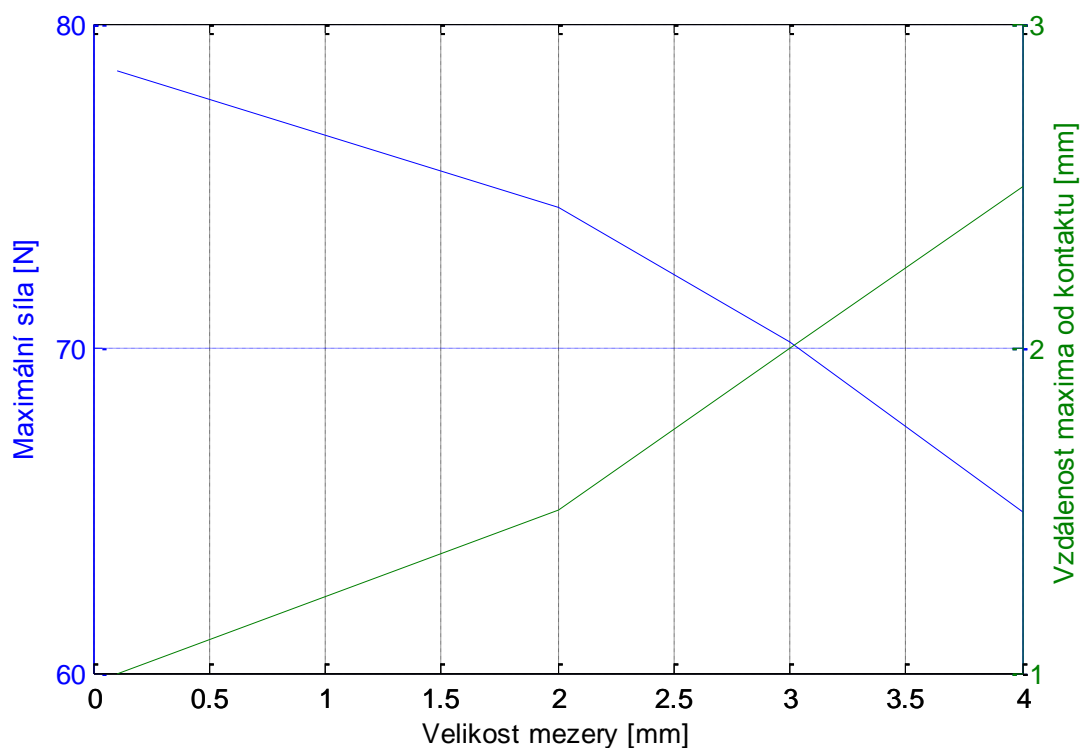


Obrázek 21: Pólový nástavec s výškou osazení 3,5 mm



Obrázek 22: Pólový nástavec s výškou osazení 17 mm

Dále byl zkoumán vliv mezery mezi magnetem rámu a osazením. Mezera byla měněna v intervalu $\langle 0,1; 4 \rangle$ mm. Velikost pólového nástavce měl rozměry: vnější průměr 40 mm, vnitřní průměr 13 mm, výška 15 mm a výška osazení 17 mm.



Obrázek 23: Závislost změny mezery na maximální síle a vzdálenosti maxima od kontaktu

Na obrázku 23 je vidět závislost maximální síly a její vzdálenosti od kontaktu při změně mezery mezi magnetem rámu a osazením. Pro návrh nového pólového nástavce, u kterého se počítalo s upnutím vodiče příze na upínku, byla zvolena velikost mezery 2 mm, z důvodu kompromisu maximální síly a vzdálenosti od kontaktu. Při rozměru mezery 2 mm dochází k maximální síle 74,3 N ve vzdálenosti 1,5 mm od kontaktu.

Dále byly analyzovány varianty se zkosením osazení z levé i z pravé strany. Při tomto zkosení výsledná síla klesala a poloha maxima byla konstantní. Další variantou návrhu bylo vytvoření osazení na spodní části pólového nástavce, což ale nemělo výrazný vliv na výslednou sílu. Tyto dvě změny maximální sílu nenavýšovaly ani neposouvaly vzdálenost maxima od kontaktu, a proto nebyly využity pro další návrhy pólového nástavce.

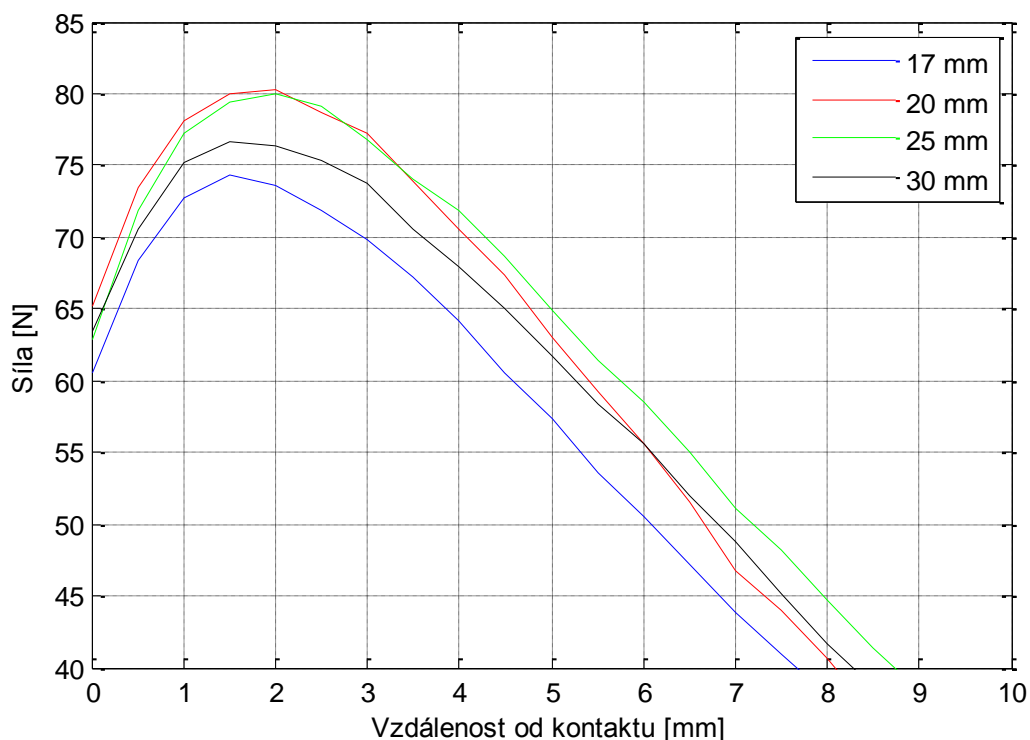
Z výsledků výše popsaných analýz byla vyhodnocena geometrie ve tvaru válce s osazením. Rozměry válce jsou: výška 15 mm, vnitřní průměr 13 mm a vnější průměr 40 mm a osazení: výška 17 mm a velikost mezery mezi magnetem rámu a osazením 2 mm. Při těchto zvolených parametrech je maximální síla 74,3 N při vzdálenosti 1,5 mm od kontaktu. Oproti původnímu návrhu byla síla navýšena o 19,1 N a síla se přiblížila o 1,5 mm blíže ke kontaktu.

4.2.2 Varianta bez možnosti upnutí vodiče příze na upínku

U druhé varianty se nepočítá s vodičem příze připevněným na upínce. Díky tomu lze využít prostor blíže k magnetům tyče a upínce. Z důvodu uložení rozváděcí tyče k rámu s radiální vůlí je nezbytné ponechat mezi magnety tyče a pólovým nástavcem mezeru v radiálním směru nejméně 1,5 mm tak, aby nemohlo docházet ke kontaktu magnetů tyče s pólovým nástavcem.

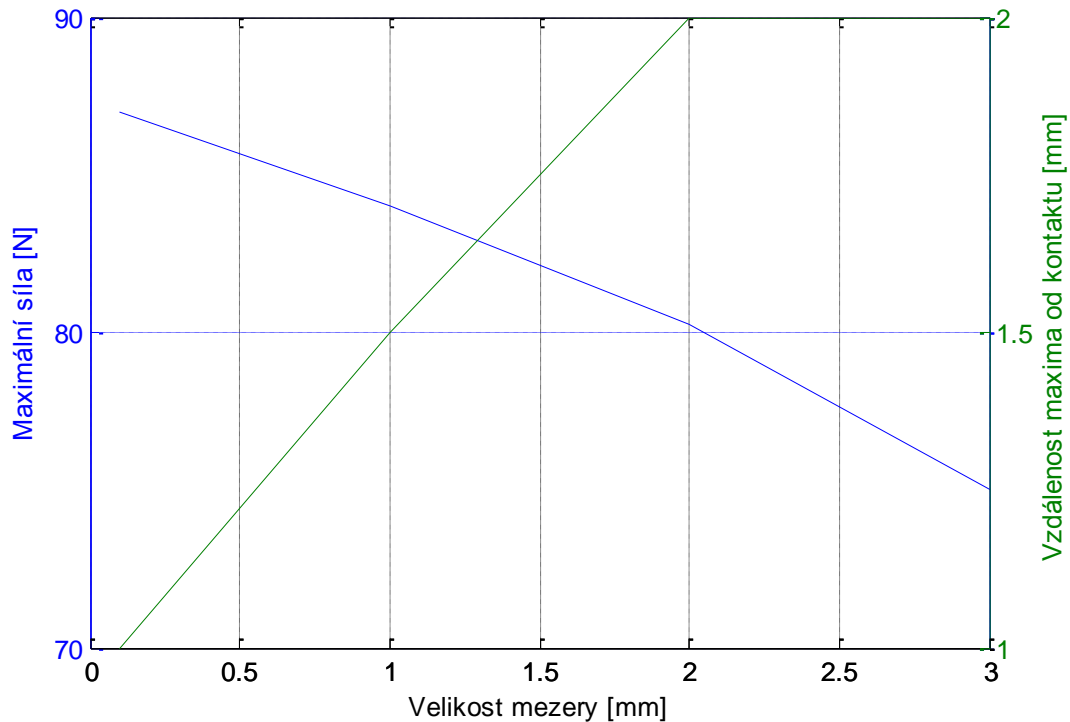
Tvar a rozměry nástavce byly ponechány stejné jako u předchozí varianty, tj.: výška 15 mm, vnitřní průměr 13 mm a vnější průměr 40 mm. V této části bylo upravováno pouze osazení pólového nástavce.

Nejdříve byla měněna výška osazení v intervalu $\langle 17; 30 \rangle$ mm při konstantní mezeře mezi osazením a magnetem rámu 2 mm. Na obrázku 24 lze vidět, že maximum síly nejdříve roste se zvyšující se výškou osazení, při výšce 20 až 25 mm je přibližně stejné a dále s větší výškou osazení už maximum klesá. Pro další analýzy byla vybrána výška osazení 20 mm.



Obrázek 24: Detail průběhu síly v závislosti na změně výšky osazení

Na základě výsledků z předchozí analýzy byla provedena analýza při výšce osazení 20 mm, kdy byla měněna mezera mezi magnetem rámu a osazením v intervalu $\langle 0,1; 3 \rangle$ mm. Jak je vidět na obrázku 25, při rostoucí mezeře síla klesá a vzdálenost od kontaktu roste.

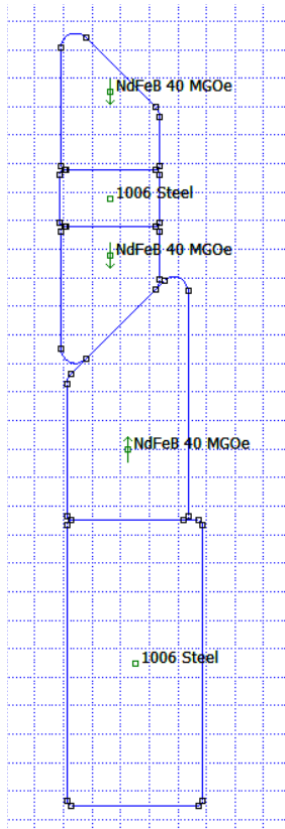


Obrázek 25: Závislost změny mezery na maximální síle a vzdálenosti maxima od kontaktu

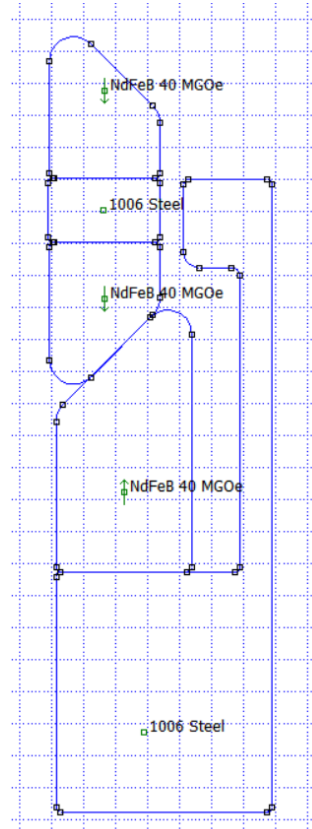
Na obrázku 27 je vidět geometrie pólového nástavce, která byla použita pro výsledný pólový nástavec. Při kvazistatické analýze s výsledným pólovým nástavcem dochází k maximální síle 103 N ve vzdálenosti 2 mm od kontaktu. Na osazení jsou radiusy 0,5 mm a 1 mm, které pomáhají navýšit sílu a oddálit ji od kontaktu.

Pro porovnání je na obrázku 26 zobrazena geometrie původního pólového nástavce. Při kvazistatické analýze s původním pólovým nástavcem dochází k maximální síle 55,2 N ve vzdálenosti 3 mm od kontaktu.

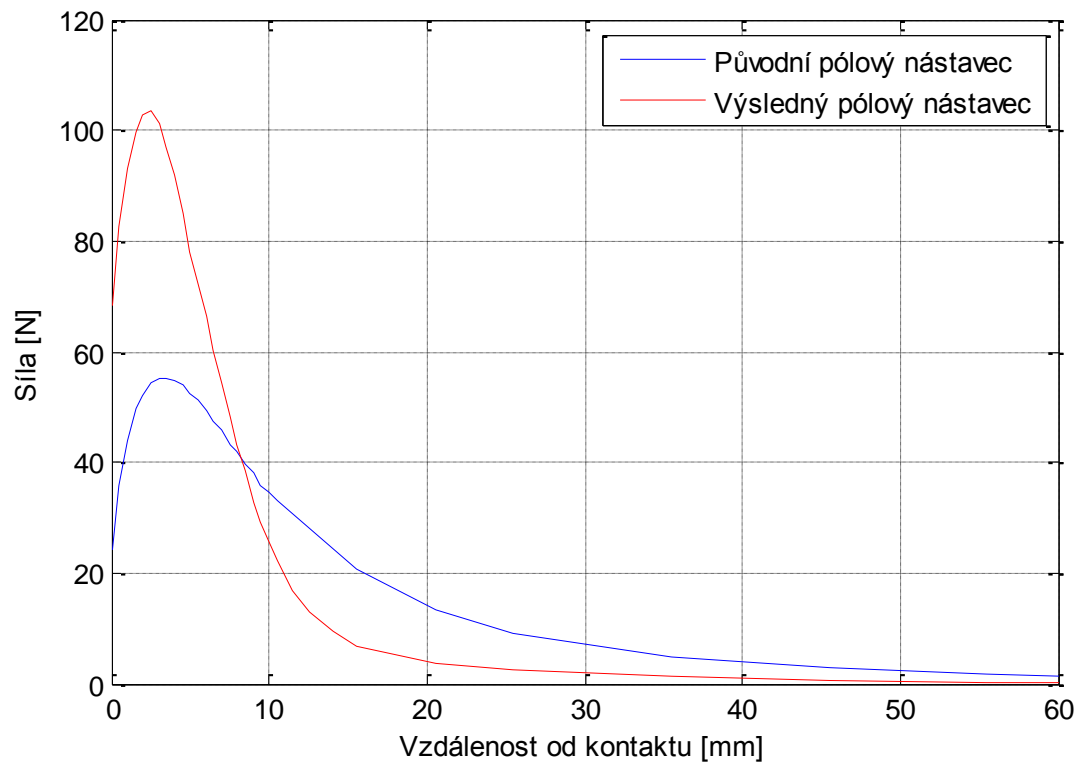
Na obrázku 28 je zobrazen průběh odpudivé magnetické síly s původním a výsledným pólovým nástavcem. Vzdálenost maxima od kontaktu se přiblížilo o 1 mm, ale maximální síla vzrostla o 47,8 N. Tomu odpovídá navýšení o 48 %.



Obrázek 26: Původní pólový nástavec



Obrázek 27: Výsledný pólový nástavec



Obrázek 28: Průběh síly s původním a výsledným pólovým nástavcem

5 Magneto-dynamická analýza akumulátoru při průchodu duralové tyče

Cílem magneto-dynamické analýzy bylo prověřit vliv vířivých proudů při průchodu duralové (elektricky vodivé) rozváděcí tyče magnetickým akumulátorem při rozváděcím přímočarém vratném pohybu. K rozváděcímu mechanismu, který zajišťuje rozváděcí zdvih 148 mm a rychlost přes 1 m/s, je připojena rozváděcí tyč. Při průchodu rozváděcí tyče magnetickým akumulátorem, se tak na tyči vytváří vířivé proudy, které svými magnetickými účinky působí proti rozváděcímu pohybu.

5.1 Vířivé proudy

Ve vodiči, který se pohybuje v magnetickém poli, se indukují napětí. Napětí vytvoří ve vodiči elementární indukované proudy, které se podobají miniaturním vířům, proto je nazýváme vířivé proudy. Podle objevitele se také nazývají Foucaultovy proudy. Vířivé proudy jsou proudy indukované, tak že se podle Lenzova zákona snaží zabránit změně, která je vyvolala. Vířivé proudy jsou přímo úměrné elektrické vodivosti materiálu a nejvíce brání ve změně materiálům s nejlepší elektrickou vodivostí. Jsou často nežádoucí, protože způsobují energetické ztráty.

Elektrická vodivost se vypočítá ze vztahu:

$$G = \sigma \frac{S}{l} \quad (1)$$

kde σ je konduktivita látky, S je obsah průřezu vodiče a l je délka vodiče. V tabulce 4 jsou uvedeny materiály s nejvyšší konduktivitou.

Tabulka 4: Materiály s nejvyšší konduktivitou

Materiál	Konduktivita při 0 °C [MS/m]
Stříbro	63
Měď	56
Zlato	46
Hliník	38

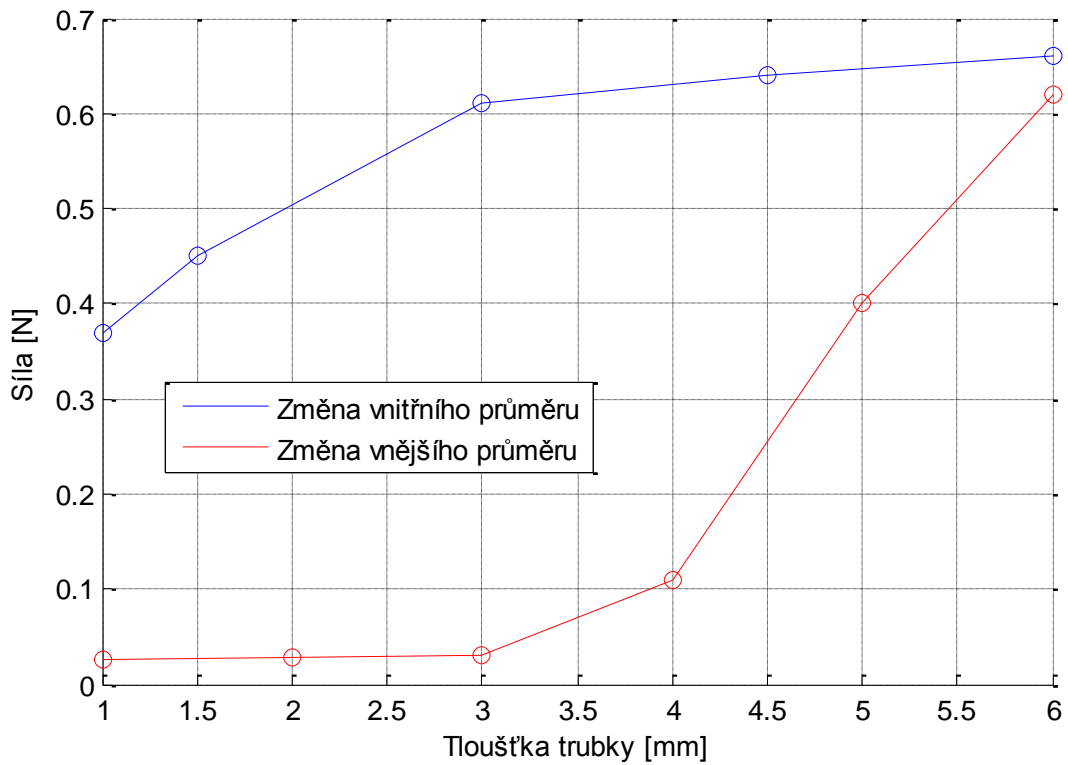
5.2 Vliv vířivých proudů

Velikost vlivu vířivých proudů závisí na rychlosti pohybu duralové rozváděcí tyče magnetickým akumulátorem. Na dopřádacím stroji se tyč pohybuje rychlostí přes 1 m/s. Pro simulace je proto dále použita rychlost 1 m/s.

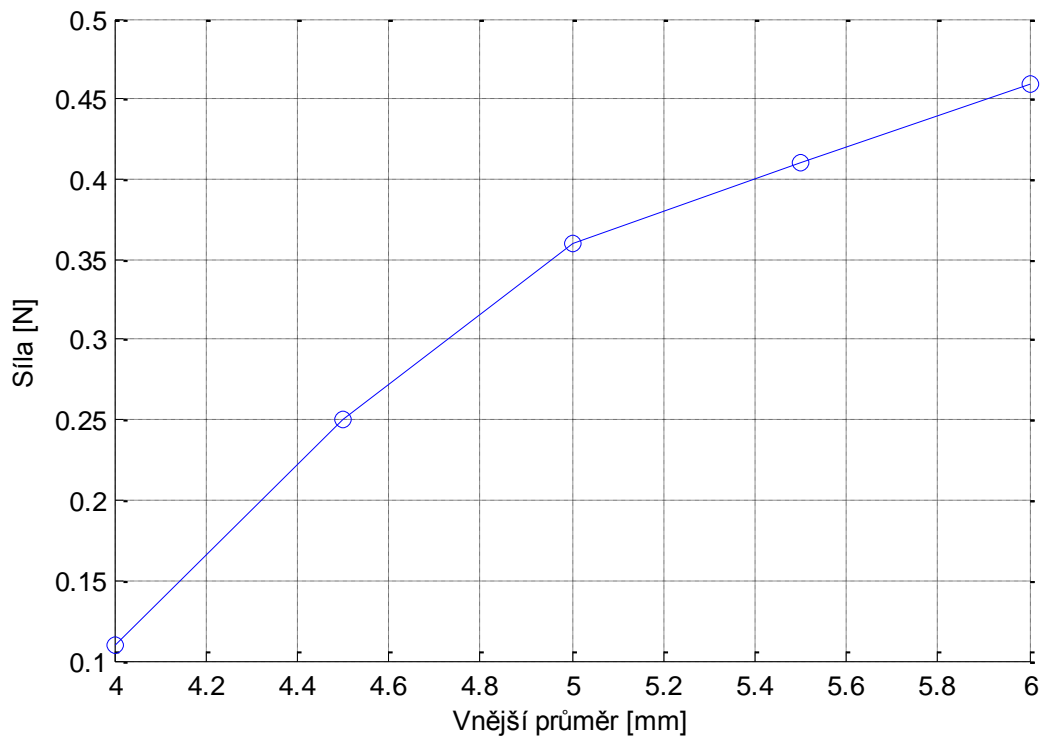
V původním návrhu je rozváděcí tyč z duralu s vnitřním průměrem $d = 9$ mm a vnějším $D = 12$ mm. Při rychlosti posuvu 1 m/s je velikost silových účinků od vířivých proudů s původním pólovým nastavcem 0,45 N a s výsledným pólovým nastavcem 0,31 N.

V následujícím odstavci jsou uvedeny změny pro původní pólový nastavec. Při první analýze byl měněn průměr d v intervalu $\langle 0; 10 \rangle$ mm při konstantní velikosti průměru $D = 12$ mm. Při této změně se vliv účinků od vířivých proudů zvětšuje s rostoucí tloušťkou trubky. U druhé analýzy byl měněn D v intervalu $\langle 0; 12 \rangle$ mm s konstantním $d = 0$ mm. U této změny se s rostoucí tloušťkou trubky vliv účinků od vířivých proudů zvětšuje razantněji než v předchozí analýze. Tyto dvě analýzy jsou zobrazeny na obrázku 29. Dále bylo zkoumáno, jak se bude chovat síla při konstantním průřezu tyče. Byl zvolen $d = 0$ mm a $D = 4$ mm. Z toho byl vypočítán průřez tyče a pro další analýzy byl dále volen D v rozsahu $\langle 4; 6 \rangle$ mm a dopočítáván d při konstantním průřezu. Při této změně výsledná síla roste, jak je uvedeno na obrázku 30.

Jelikož při pohybu rozváděcí tyče dochází k vysokým rychlostem, je zde i podstatná hmotnost rozváděcí tyče. Průměr D tyče je omezen maximálním rozměrem 12 mm. Jak je vidět na obrázku 29, při větším průměru D je velikost účinků od vířivých proudů vyšší. Proto byl zvolen průměr $D = 12$ mm. Průměr d byl zvolen 6 mm s ohledem na velikost účinků od vířivých proudů a hmotnosti rozváděcí tyče.



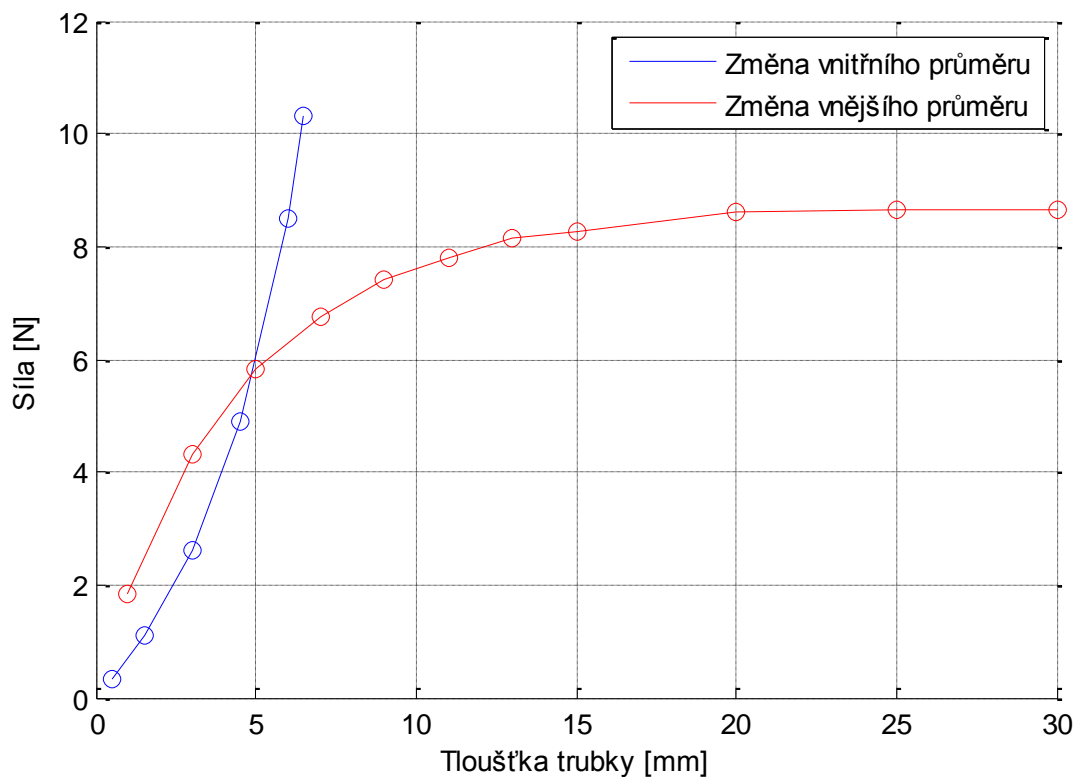
Obrázek 29: Závislost změny vnitřního a vnějšího průměru rozváděcí tyče na velikosti účinků od vířivých proudů



Obrázek 30: Závislost změny vnějšího průměru při konstantním průřezu rozváděcí tyče na velikosti účinků od vířivých proudů

V zatím uvedených případech se velikost účinků od vířivých proudů pohybovala do 1 N. V další části byla provedena dynamická analýza s vnější duralovou trubkou umístěnou souose okolo magnetů tyče. Konstrukčním předpokladem bylo, že by toto těleso sloužilo zároveň k bezpečnostnímu zakrytí posuvných magnetů tyče.

Při změně d_2 a konstantním $D_2 = 40$ mm se vliv účinků od vířivých proudů s rostoucí tloušťkou trubky zvětšuje. Když je měněn D_2 při $d_2 = 30$ mm, tak se vliv účinků od vířivých proudů s rostoucí tloušťkou parabolicky zvětšuje a od tloušťky trubky 20 mm je vliv vířivých proudů přibližně konstantní. Tyto změny jsou zobrazeny na obrázku 31.



Obrázek 31: Závislost změny vnitřního a vnějšího průměru trubky na velikosti účinků od vířivých proudů

Kdybychom sílu dále ještě chtěli navýšit, dala by se trubka vyrobit z materiálu s lepší elektrickou vodivostí. Například při použití mědi by síla vzrostla z 5,86 N na 8,81 N. To odpovídá navýšení síly o 35 %.

6 Měření

Cílem měření bylo ověřit správnost výsledků simulace. K měření bylo použito zařízení ElectroPuls E1000 od firmy Instron (viz *obrázek 32*) dostupné na pracovišti Katedry mechaniky, pružnosti a pevnosti Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci. Bylo měřeno dvěma způsoby, nejdříve kvazistaticky a následně dynamicky. Prověřovány byly magnetické akumulátory se dvěma různými pólovými nastavci, s původním (viz *obrázek 26*) a výsledným (viz *obrázek 27*).



Obrázek 32: Měřicí zařízení ElectroPuls E1000 od firmy Instron

6.1 Experimentální ověření kvazistatické analýzy

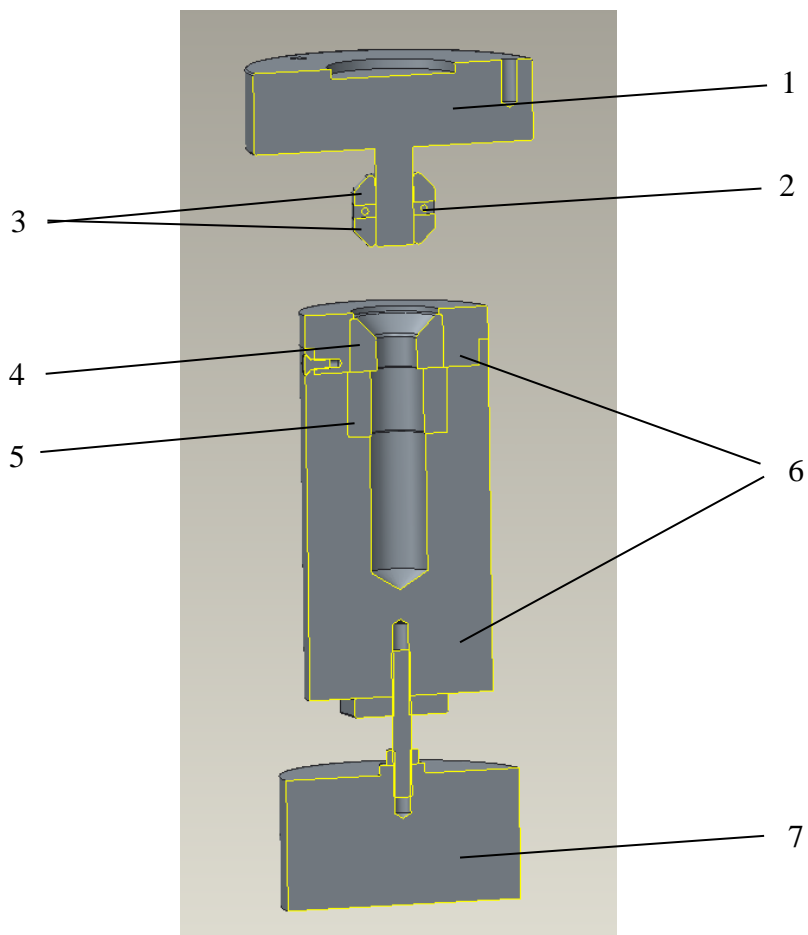
Cílem experimentálního ověření kvazistatické analýzy bylo ověřit správnost výsledků z programu FEMM 4.2 a z Ansys Maxwell. Pro měření byly navrženy přípravky, které zajišťovaly připevnění konstrukčních prvků k měřicímu přístroji a zajišťovali je ve správné pozici. Byl měřen průběh síly s původním i výsledným pólovým nástavcem.

6.1.1 Konstrukční řešení přípravků pro kvazistatické měření

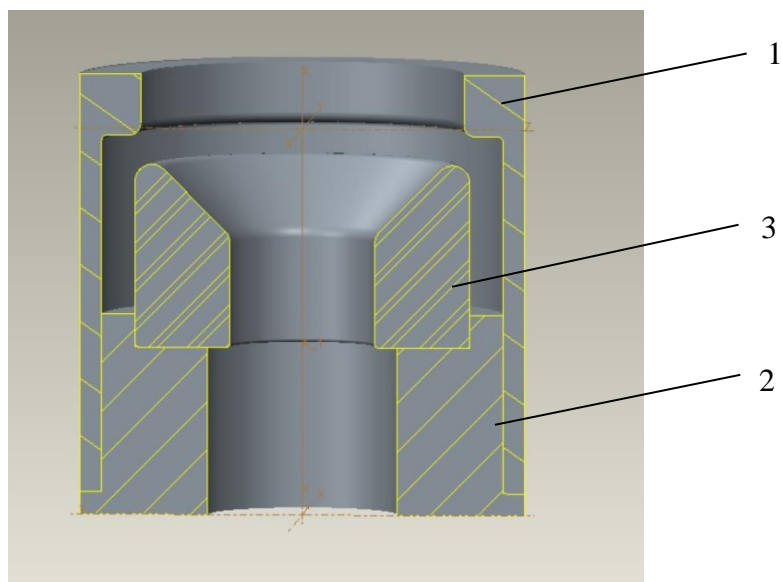
Na obrázku 33 je zobrazen sestava pro kvazistatické měření původního pólového nástavce. Do vrchní pohyblivé části stroje byl navrhnout univerzální upínací prvek 1, na který se pomocí upínky 2 připevnili magnety tyče 3. Upínací prvek byl vyroben z duralu, z důvodu minimálního ovlivnění magnetické síly při kvazistatickém měření.

Ve spodní části je umístěna měřící hlava 7. Na výběr byla měřící hlava s rozsahem do 1 kN a 5 kN. První zkušební měření bylo prováděno s větší 5 kN hlavou. Pro druhé měření, ze kterého byla použita data na vyhodnocení měření, byla použita 1 kN hlava. Menší hlava byla vybrána z toho důvodu, že má menší chybu v měření a její rozsah je dostatečně velký pro zkoumané prvky. K měřící hlavě je pomocí závitové tyče připevněn spodní upínací prvek 6. Spodní upínací prvek je z důvodu vložení magnetu rámu 4 a původního pólového nástavce 5 rozdělen na dvě části, které jsou spolu spojeny nerezovými šrouby. Spodní upínací prvek byl vyroben z polyamidu v různém provedení pro původní a výsledný pólový nástavec.

Konstrukční řešení výsledného pólového nástavce je zobrazeno na obrázku 34. Výsledný pólový nástavec musel být z výrobních a montážních důvodů vyroben ze dvou částí 1 a 2. Do výsledného pólového nástavce byl vložen magnet rámu 3. Dále musel být výsledný pólový nástavec opatřen osazeními. Jedno osazení bylo vytvořeno ve spodní části, aby se pólový nástavec ustavil ve správné poloze. Druhé osazení bylo vytvořeno v mezeře mezi magnetem a pólovým nástavcem z důvodu zajištění souosého uložení magnetu rámu vůči pólovému nástavci.



Obrázek 33: Sestava pro kvazistatické měření původního pólového nástavce



Obrázek 34: Konstrukční řešení výsledného pólového nástavce

6.1.2 Kvazistatické měření

Měřicí přístroj umožňuje měření se zdvihem maximálně 60 mm. Bylo snahou využít celý tento rozsah, protože jak je vidět na průbězích síly, například na obrázku 28, ve vzdálenosti 60 mm od kontaktu není hodnota síly zcela zanedbatelná.

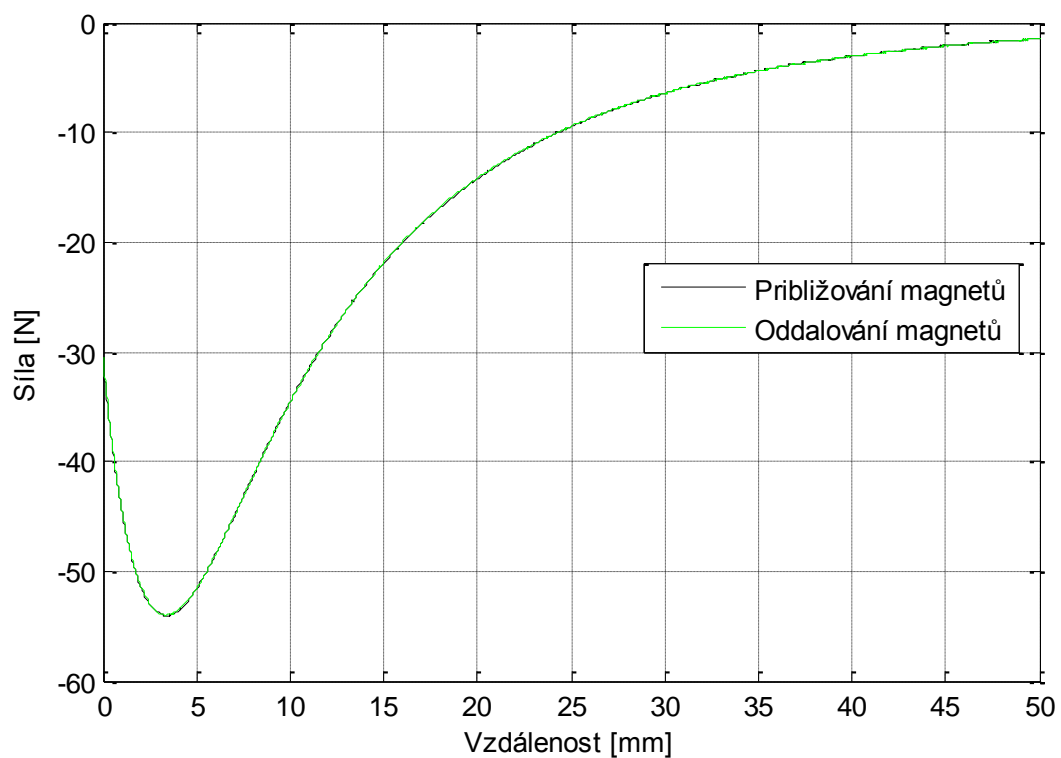
Při kvazistatickém měření se pomalu přibližovaly magnety tyče od vzdálenosti cca 57 mm až ke kontaktu magnetů tyče s magnetem rámu. Následně se magnety tyče oddalovaly. Tento měřený cyklus se třikrát opakoval. Síla byla měřena při přibližování i oddalování magnetů. Rychlost pohybu (2 mm/s) byla volena dostatečně pomalá tak, abychom výsledky z měření mohly považovat za odpovídající kvazistatickému měření.

6.1.3 Původní pólový nástavec

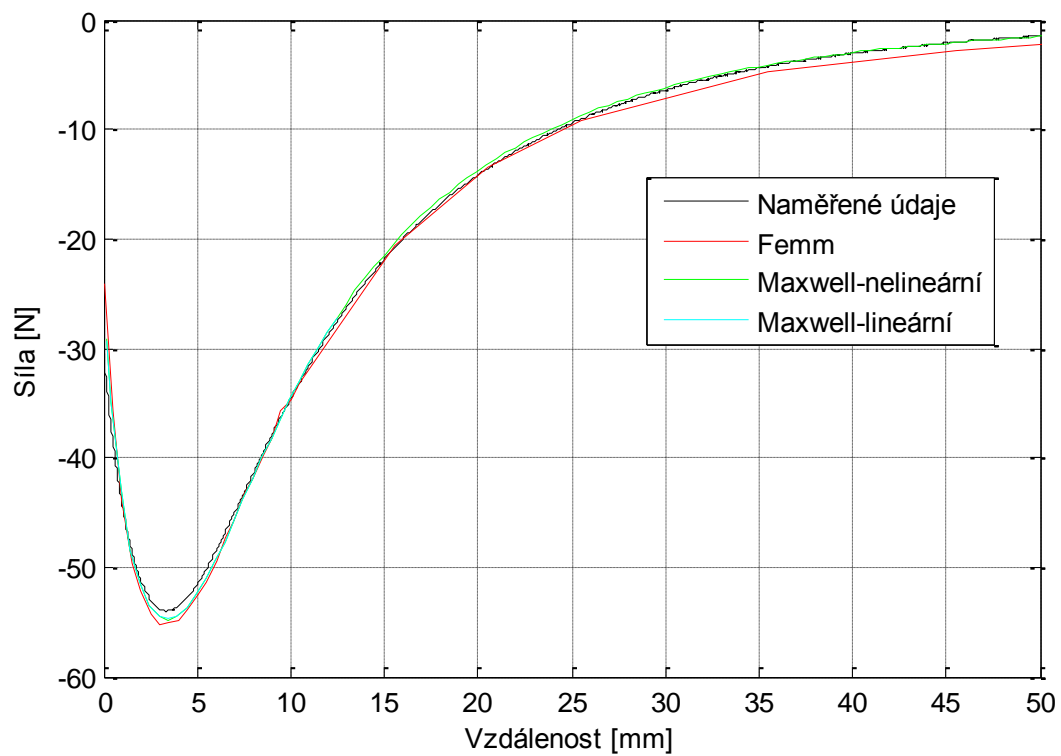
Při prvním měření byl do polyamidového přípravku vložen původní pólový nástavec. Sestava pro kvazistatické měření původního pólového nástavce je zobrazena na obrázku 33. Při měření byla snímána síla při přibližování i oddalování magnetů. Na průběh výsledné síly ale směr pohybu magnetů neměl vliv, což je zobrazeno na obrázku 35. Cyklus přibližování a oddalování byl proveden třikrát. Při těchto cyklech se průběh síly neměnil.

Na obrázku 36 jsou znázorněny průběhy sil při přibližování magnetů ke kontaktu. Pro porovnání jsou zde zobrazeny průběhy sil z měření, z programu Ansys Maxwell pro ocel s lineární a nelineární charakteristikou relativní permeability a z programu FEMM. Průběh sil ocele s nelineární a lineární charakteristikou se v tomto případě shodují. Hodnoty z programu FEMM se od naměřených dat nejvíce liší. K maximálnímu rozdílu naměřených dat od dat z programu FEMM dochází ve vzdálenosti 3 mm od kontaktu o velikosti 1,5 N. Rozdíl průběhu síly měření oproti simulaci může být způsoben nepřesným upnutím přípravku do měřicího stroje, nepřesnou výrobou konstrukčních prvků nebo ovlivněním od upínacích prvků (šrouby).

Z měření bylo získáno maximální magnetické odpudivé síly 54 N ve vzdálenosti 3,4 mm od kontaktu.



Obrázek 35: Průběh síly při oddalování a přibližování magnetů s původním pólovým nastavcem



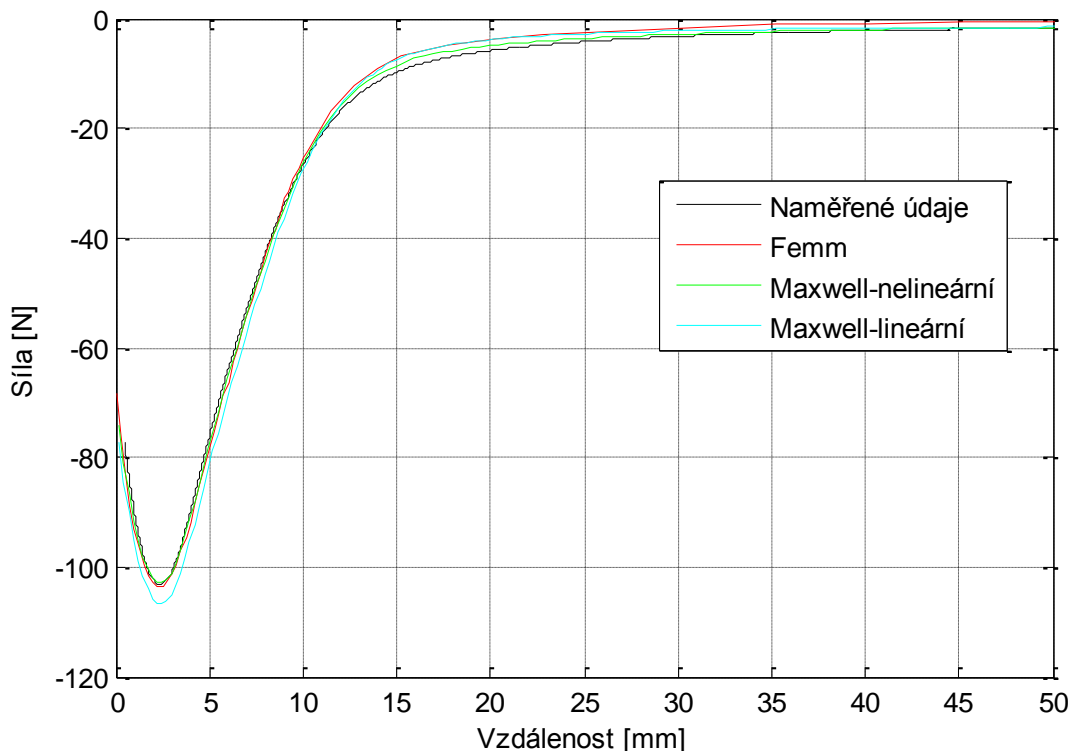
Obrázek 36: Průběhy sil s původním pólovým nastavcem

6.1.4 Výsledný pólový nástavec

Kvazistatické měření výsledného pólového nástavce probíhalo stejně jako u měření původního pólového nástavce. Rozdíl spočíval v tom, že k měřicí hlavě byl upnut polyamidový přípravek s výsledným pólovým nástavcem. Při měření výsledného pólového nástavce taktéž nebyl rozdíl v průběhu síly při přibližování a oddalování magnetů ani při opakovaném cyklu měření.

Na obrázku 37 jsou znázorněny průběhy sil při přibližování magnetů ke kontaktu. Pro porovnání jsou zde zobrazeny průběhy sil z měření, z programu Ansys Maxwell pro ocel s lineární a nelineární charakteristikou relativní permeability a z programu FEMM. Na obrázku lze vidět, že průběh síly pro lineární ocel se liší od oceli s nelineární charakteristikou. Rozdíl v průběhu magnetické odpudivé síly mezi lineární a nelineární ocelí se projevil až u výsledného pólového nástavce, kde objem materiálu pólového nástavce více ovlivňuje průběh síly. K naměřeným hodnotám se nejvíce přibližují hodnoty ze simulace Ansys Maxwell pro nelineární ocel.

Z měření bylo získáno maximální magnetické odpudivé síly 103,2 N ve vzdálenosti 2,4 mm od kontaktu.



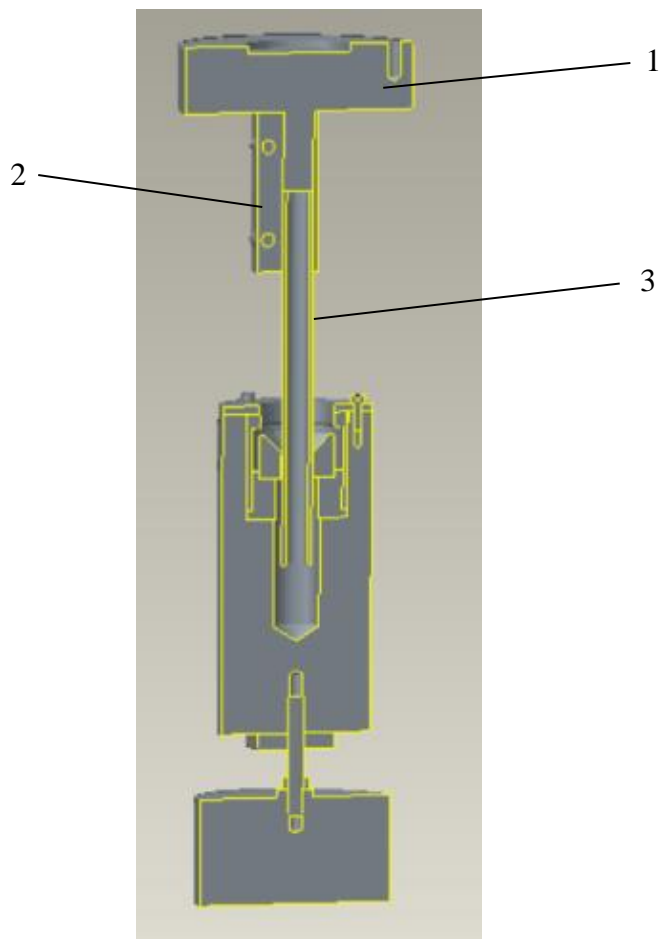
Obrázek 37: Průběhy sil s výsledným pólovým nástavcem

6.2 Experimentální ověření magneto-dynamické analýzy

Cílem experimentálního ověření magneto-dynamické analýzy bylo ověřit správnost výsledků z programu Ansys Maxwell. Pro měření byly použity stejné přípravky jako u kvazistatického měření. Byla měřena velikost účinků od vířivých proudů při průchodu duralové rozváděcí tyče při různých frekvencích pohybu rozváděcí tyče.

6.2.1 Konstrukční řešení přípravků pro dynamické měření

Při dynamickém měření byla k univerzálnímu upínacímu prvku 1 připevněna pomocí spojky 2 rozváděcí duralová tyč 3. Na obrázku 38 je zobrazena sestava pro dynamické měření výsledného pólového nástavce.

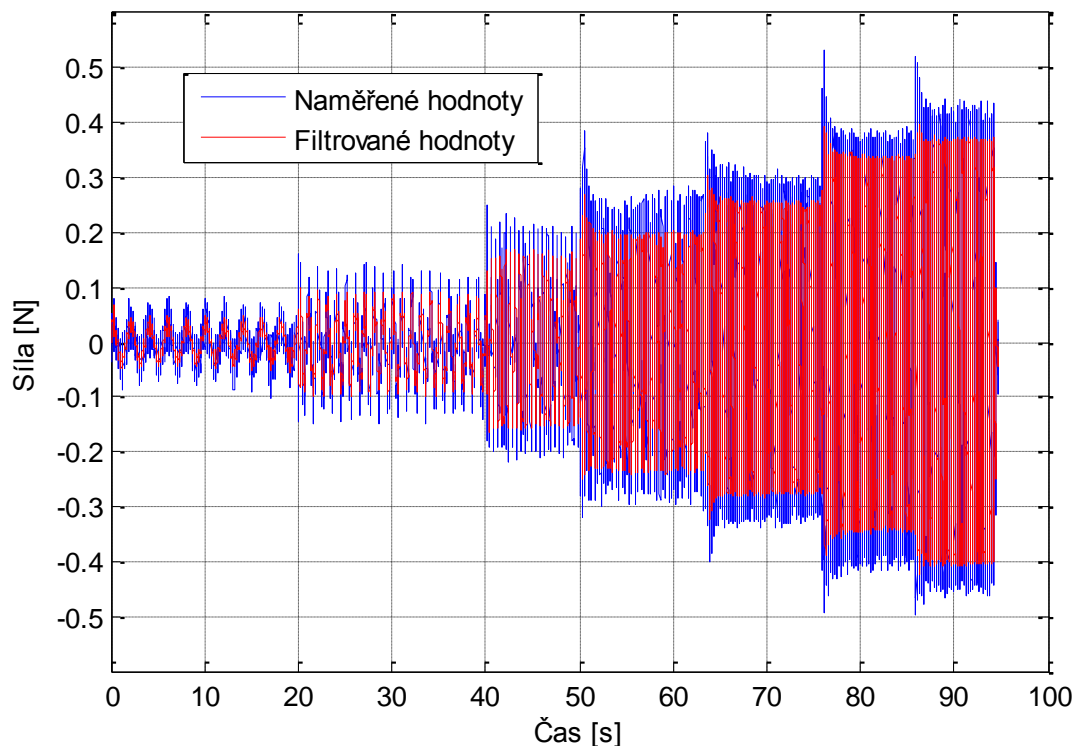


Obrázek 38: Sestava pro dynamické měření výsledného pólového nástavce

6.2.2 Dynamické měření

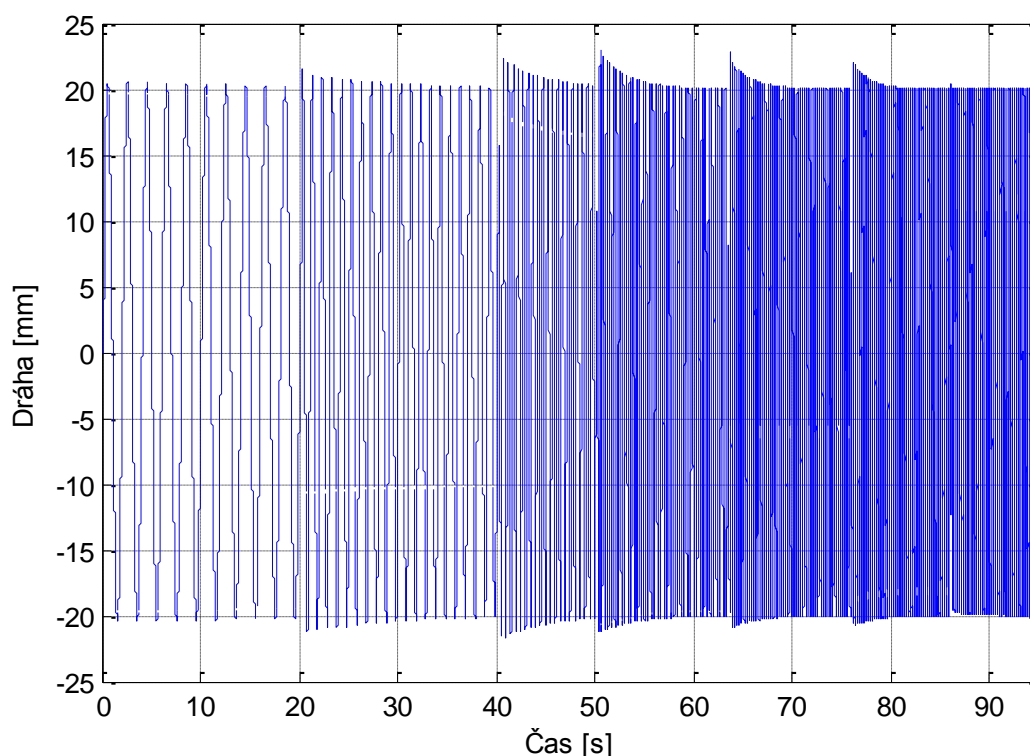
Při dynamickém měření bylo snahou se co nejvíce přiblížit provozní rychlosti rozváděcí tyče 1 m/s s frekvencí 3 Hz. Pro měření byla zvolena budící rychlost harmonickou funkcí polohy \sin , pro kterou bylo nutno zadat amplitudu pohybu a frekvenci. Z důvodu konstrukce měřících přípravků byla zvolena amplituda 20 mm. Kdybychom chtěli amplitudu navýšit, museli by se přípravky vyrobit s delším otvorem pro tyč. K tomu byla přiřazena frekvence pohybu v krocích 0,5, 1, 2, 3, 4, 5 a 6 Hz. Větší frekvenci už měřicí přístroj nedokázal spolehlivě realizovat. S amplitudou 20 mm a frekvencí 3 Hz bylo dosaženo maximální rychlosti 0,377 m/s.

Při měření vířivých proudů byly získány hodnoty sil okolo 0,5 N s původním pólovým nastavcem. Nejmenší měřicí hlava, která byla k dispozici, měla rozsah do 1 kN. Při měření takto malé síly docházelo k šumu hodnot, proto při zpracování dat v programu Matlab byl použit filtr hodnot o velikosti 20. Na obrázku 39 je porovnání průběhu síly u naměřených a filtrovaných dat.



Obrázek 39: Porovnání průběhu sil u naměřených a filtrovaných dat v závislosti na čase s původním pólovým nastavcem

Na obrázku 40 je zobrazena dráha, kterou vykonává vrchní pohyblivá část. Na vodorovné ose je znázorněn čas měření, který je dán frekvencí a počtem cyklů. Počet cyklů byl přiřazen postupně ke každé frekvenci následovně: 10, 20, 20, 40, 50, 50 a 50. Při vyšších frekvencích dochází na začátku každého cyklu k nedodržení amplitudy, které se projevilo i na naměřené výsledné síle. Tento jev je způsoben měřicím přístrojem a nelze odstranit.

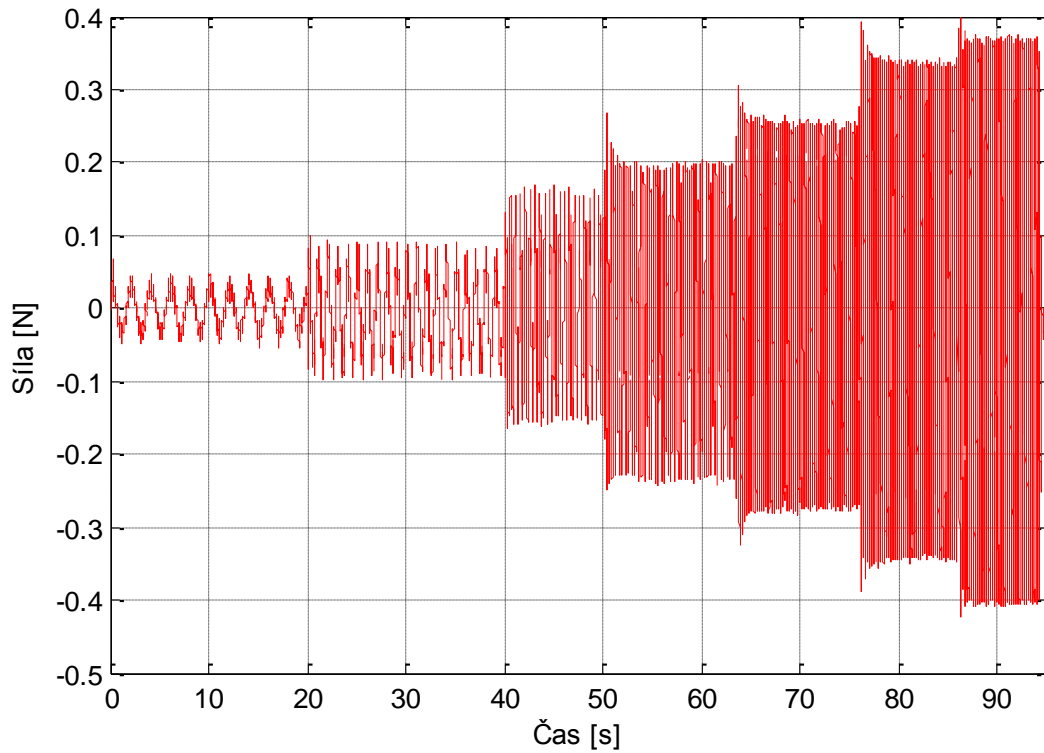


Obrázek 40: Průběh dráhy při měření vířivých proudů v závislosti na čase

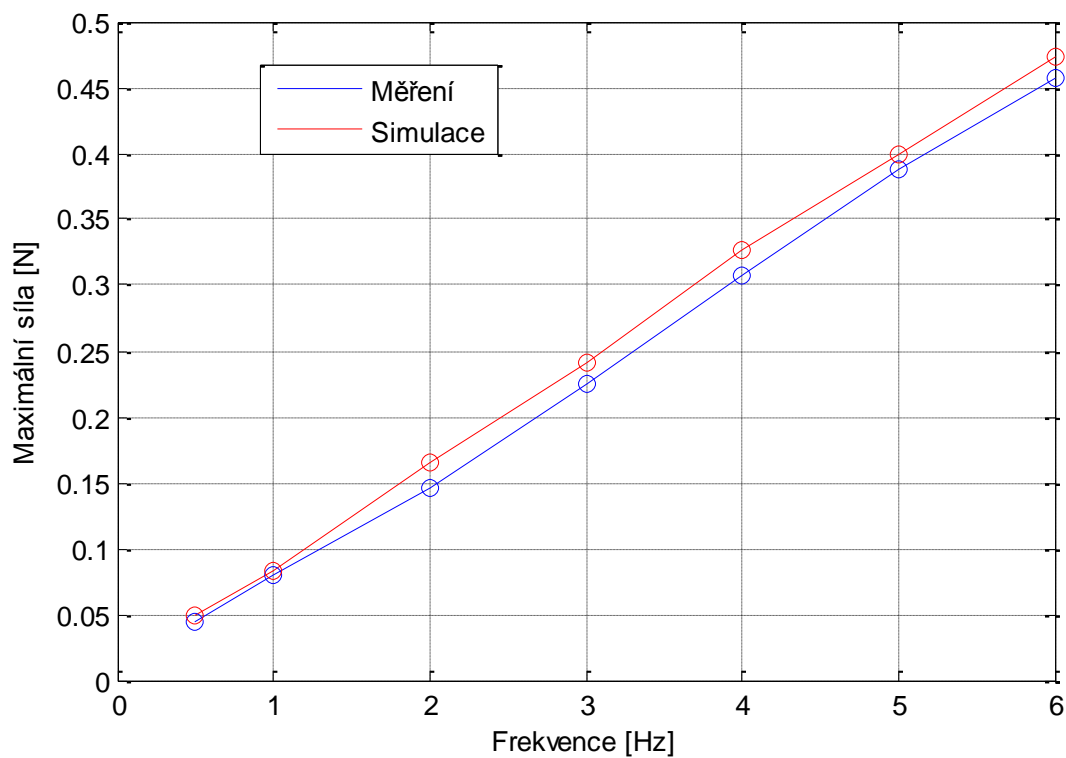
6.2.3 Původní pólový nástavec

K měřicí hlavě byl připevněn polyamidový přípravek s magnetem rámu a původním pólovým nástavcem. U této varianty byla měřena pouze rozváděcí tyč. Při upínání rozváděcí tyče bylo třeba zajistit její sousost se spodní částí přípravku, aby nedocházelo k mechanickému kontaktu a ovlivňování měření.

Na obrázku 41 je zobrazen průběh síly v závislosti na různých frekvencích. Při zvětšování frekvence dochází ke zvětšování rychlosti, které má za následek zvětšování síly od účinků vířivých proudů. To znamená, že velikost účinků od vířivých proudů je závislá na rychlosti rozváděcího pohybu.



Obrázek 41: Průběh síly od účinků vířivých proudů při původní variantě pólového nástavce v závislosti na čase



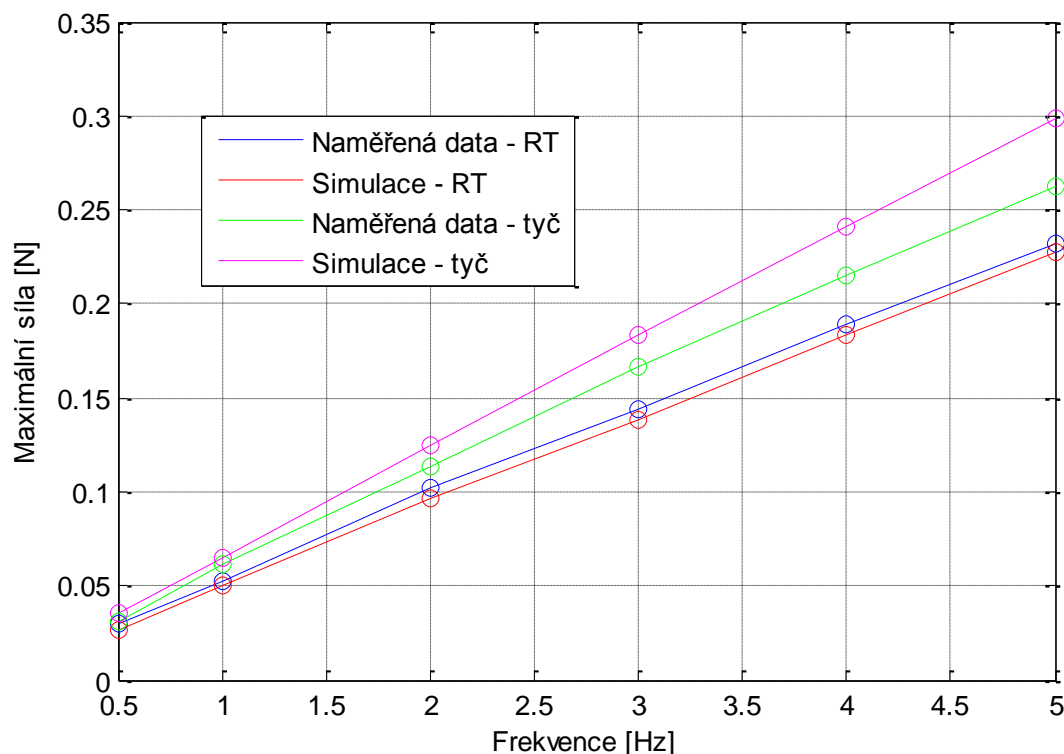
Obrázek 42: Maximální síly od účinků vířivých proudů při různých frekvencích u původní varianty

Na obrázku 41 je zobrazena závislost maximálních sil při různých frekvencích s původním pólovým nastavcem. Jsou zde znázorněny výsledky z měření a simulace Ansys Maxwell s použitím rozváděcí tyče. Závislost maximální síly na frekvenci je téměř lineární. Maximální odchylka simulace od měření činí 0,02 N. Tuto hodnotu můžeme považovat za zanedbatelnou.

6.2.4 Výsledný pólový nastavec

Při měření síly od účinků vířivých proudů výsledné varianty byl k měřicí hlavě připevněn polyamidový přípravek s magnetem a výsledným pólovým nastavcem. K vrchní pohyblivé části byla nejdříve připevněna rozváděcí tyč a poté duralová tyč.

Na obrázku 43 je zobrazena závislost maximálních sil při různých frekvencích s výsledným pólovým nastavcem. Jsou zde znázorněny výsledky z měření a simulace Ansys Maxwell pro duralovou a rozváděcí tyč. Výsledky z měření rozváděcí tyče můžeme považovat za shodné se simulací. Naproti tomu u duralové tyče rozdíl maximálních sil z měření a simulace s rostoucí frekvencí postupně narůstá.

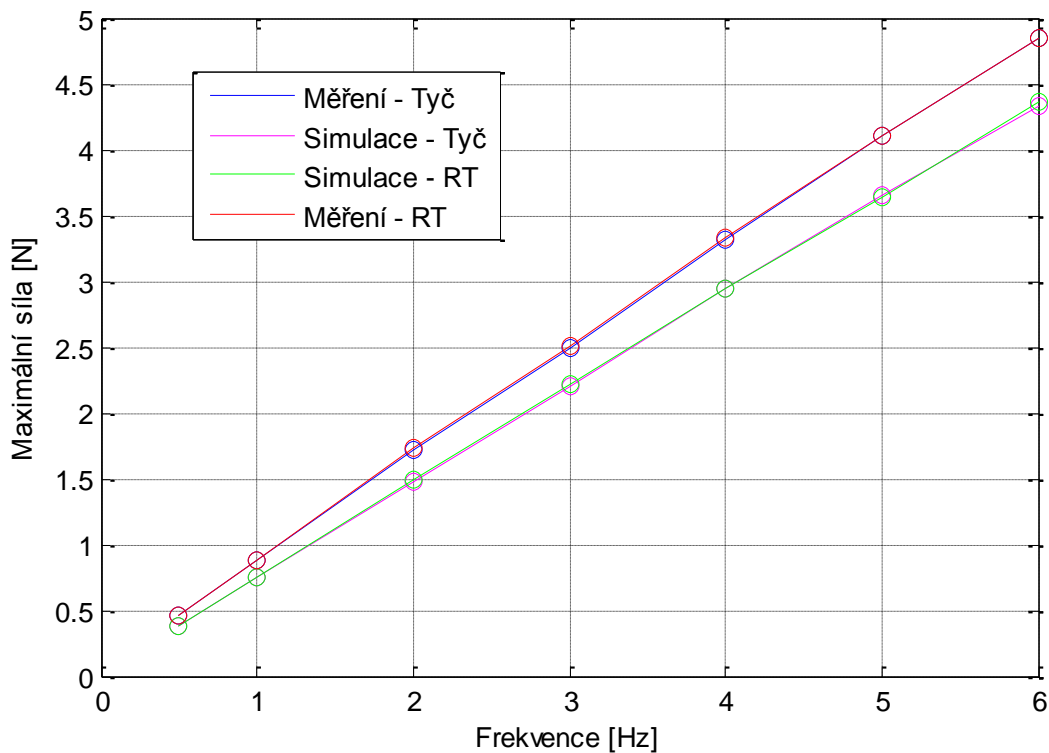


Obrázek 43: Maximální síly od vířivých proudů při různých frekvencích výsledné varianty pólového nastavce

6.2.5 Varianta s ochrannou trubkou

V této části měření byla místo polyamidového měřicího přípravku umístěna duralová trubka s vnitřním průměrem 30 mm a vnějším 40 mm. Předpokladem je, že by tato trubka sloužila jako kryt magnetického akumulátoru. K vrchní pohyblivé části byla v prvním kroku měření připevněna pomocí spojky duralová tyč s průměrem 12 mm. V druhém měření byla nahrazena duralová tyč rozváděcí tyčí a k ní byly připevněny magnety tyče upínkou.

Hodnoty maximálních sil při různých frekvencích jsou zobrazeny na obrázku 44. Jsou zde uvedeny výsledky z měření a simulace Ansys Maxwell pro duralovou a rozváděcí tyč. Hodnoty z měření duralové a rozváděcí tyče se shodují, totéž můžeme říct i o simulaci.



Obrázek 44: Maximální síly od účinků vířivých proudů při různých frekvencích varianty s ochrannou trubkou

S rostoucí frekvencí roste maximální síla účinků od vířivých proudů téměř lineárně. Rozdíl mezi naměřenými hodnotami a hodnotami ze simulace roste také lineárně. Tento rozdíl může být způsoben nepřesným výpočtem simulace, chybou měření nebo nepřesným zadáním materiálových vlastností do programu. Dále je z grafu vidět, že na velikost síly od vířivých proudů nemá vliv, zda je pro rozvádění použita duralová trubka nebo tyč.

Závěr

Hlavním cílem bakalářské práce bylo vytvořit model magnetických akumulátorů v původním a novém uspořádání a provést analýzy magnetického pole. Následně bylo cílem výsledky ověřit s měřením a navrhnout nový pólový nástavec, který přispěje k dosažení vyšší magnetické odpudivé síly magnetického akumulátoru a bude splňovat dovolené rozměrové parametry.

S původním pólovým nástavcem bylo dosaženo maximální síly 54 N ve vzdálenosti 3,4 mm od kontaktu. U výsledného pólového nástavce dochází k maximální síle 103,2 N ve vzdálenosti 2,4 mm od kontaktu. Změnou došlo k nárůstu síly o přibližně 48 %. Při nárůstu magnetické odpudivé síly o přibližně 48 % se dá říci, že počet magnetických akumulátorů na doprůdácím stroji se může zmenšit přibližně o polovinu.

Při zjišťování velikosti silových účinků od vířivých proudů bylo zjištěno, že při rychlosti 1 m/s dochází k síle u původního pólového nástavce hodnoty 0,45 N a s výsledným pólovým nástavcem pak hodnoty 0,31 N. Následně byla prověřena varianta akumulátoru s ochrannou trůbkou, která by sloužila pro zakrytování rozvůdčící tyče a magnetického akumulátoru. U této varianty dochází k silovým účinkům od vířivých proudů až 5 N. Velikost síly je lineárně závislá na rychlosti rozvůdění, což může být využito např. při tlumení podélného kmitání rozvůdčící tyče na doprůdácím stroji.

Výsledky ze simulací byly ověřeny experimentálně. Prováděly se dva typy měření pro ověření správnosti výsledků ze simulací. První měření bylo prováděno kvazistaticky, kdy se měřil průběh magnetické odpudivé síly při velmi pomalém přiblížování magnetů tyče k magnetu rámu. Druhé měření bylo dynamické, kdy se zjišťoval vliv účinků od vířivých proudů na akumulátor při průchodu duralové rozvůdčící tyče rychlostí až 0,75 m/s. Výsledky z měření se shodovaly s hodnotami ze simulací a verifikovaly tak vytvořené modely magnetických akumulátorů různých uspořádání. Tyto modely lze dále využít pro simulace pohybu magnetů a jejich optimalizaci.

Literatura

- [1] TRIDELTA MAGNETSYSTEME - Permanent Magnetic Couplings and Brakesfor Drive Technology [online],
URL: <http://tridelta.de/viomatrix/imgs/download/kupplungen-bremsen-gb.pdf>
[cit. 2015-12-11].
- [2] Aerostatická, aerodynamická a magnetická ložiska [online]. Brno, 2008.
URL: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=647 [cit. 2016-01-02]
- [3] KUMMETH, P., et al. *Development of superconducting magnetic bearings*. In Elsevier. Physica C., 2002. s. 372 – 376
- [4] VALTERA, J., *Optimalizace systému rozváděcí tyče rotorových doprůvacích strojů*. Liberec, 2013. 170s. Disertační práce na Strojní fakultě Technické univerzity v Liberci na Katedře textilních a jednoúčelových strojů
- [5] BUTSCHKO, S. *Cross-winding Device for a Textile Machine Which Produces Cross-wound Bobbins*. OERLIKON TEXTILE GMBH & CO KG, Butschko, S. 2008. Patentový spis. WO20008058605 (A1)
- [6] BERAN, J., Valtera, J. *Způsob a zařízení k rozvádění příze na textilních strojích*. Technická univerzita v Liberci, RIETER CZ s.r.o. 2011. Patentový spis. 303 167 (B6)
- [7] FOUNE, F., et al. *Device for Traversing of Yarn Wound-up on the Bobbin*. VUTS a.s., RIETER CZ s.r.o. European patent office: 2012. Patentový spis. EP2562112 (A1).
- [8] VALTERA, J., *Magnetický akumulátor kinetické energie v koncových polohách rozváděcího pohybu*. Liberec, 2013. 22s. ISSN TUL - MPO17260 -- 13/15/CZ -- CZ + Doprůvací stroje
- [9] FÜRbacher, I., MACEK, K., STEIDL. J. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: kovy, plasty, keramika, kompozity : základní dílo : aktuální stav říjen 2001 - včetně 13. doplňků*. Praha: Odborné nakladatelství technické literatury, c2001. ISBN 80-86229-02-5.
- [10] SINOMAG – Permanentní magnety – co je třeba vědět o magnetech [online],
URL: <http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/?c=o-magnetech-slovník> [cit. 2016-05-12].
- [11] Finite Element Method Magnetics [online],
URL: <http://www.femm.info/wiki/HomePage> [cit. 2016-05-12]
- [12] NEOMAG – Neodymové magnety [online], URL: <http://www.neomag.cz/cz/>
[cit. 2016-05-12]

Seznam příloh

Příloha **A** – Konstrukční návrh varianty s možností upnutí příze na upínce

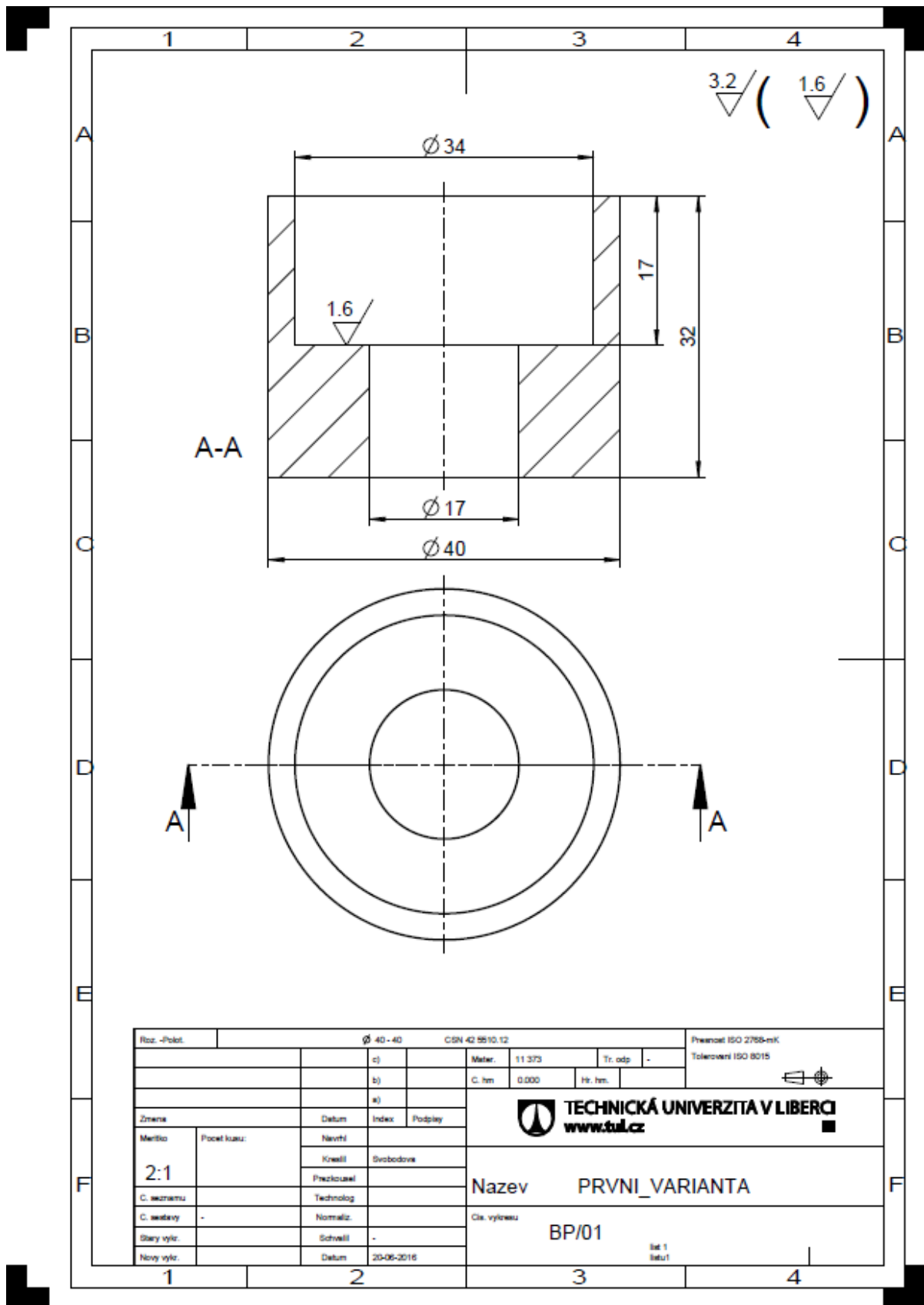
Příloha **B** – Konstrukční návrh výsledného pólového nástavce

Příloha **C** – Měření magnetického akumulátoru s pólovými nástavci

Příloha **D** – CD

Příloha A – Konstrukční návrh varianty s možností upnutí příze na upínce

A1 Výkres



Roz. - Polst.		Ø 40 - 40		CSN 42 5510.12		Přesnost ISO 2758-mK	
		c)		Mater.		Tr. odp. -	
		b)		C. hm. 0,000		Hr. hm.	
		a)				Tolerovani ISO 8015	
Změna		Datum		Index		Podpis	
Měřko		Počet kousk.		Nevrh			
2:1				Kreslil		Svobodova	
C. seznamu				Přezkoušel			
C. sestavy		-		Technolog			
Starý vylr.				Normaliz.			
Nový vylr.				Schválil		-	
		Datum		20-06-2016			
				Cis. výkresu		BP/01	
						list 1 z 1	

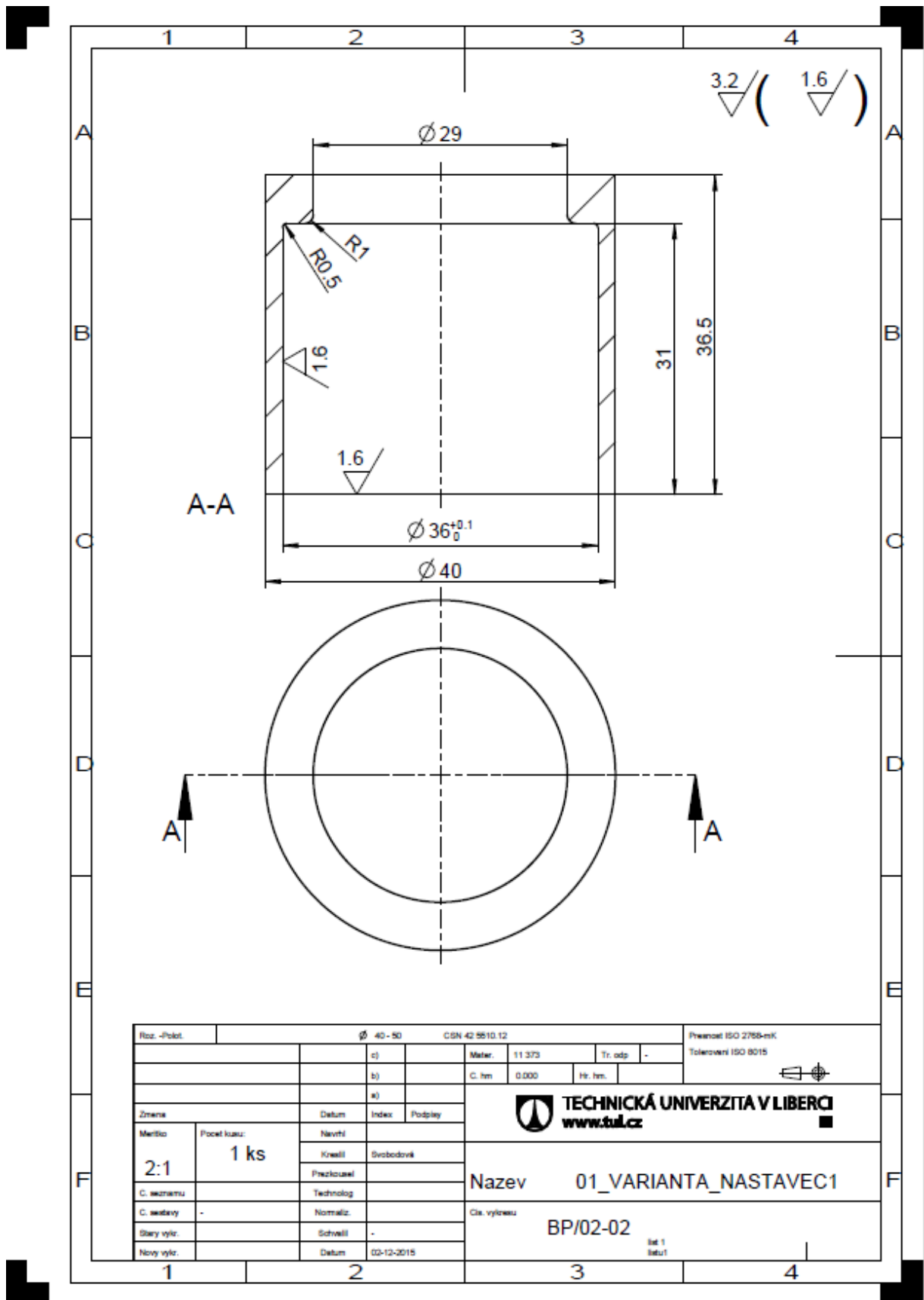
Výkres

Příloha B – Konstrukční návrh výsledného pólového nástavce

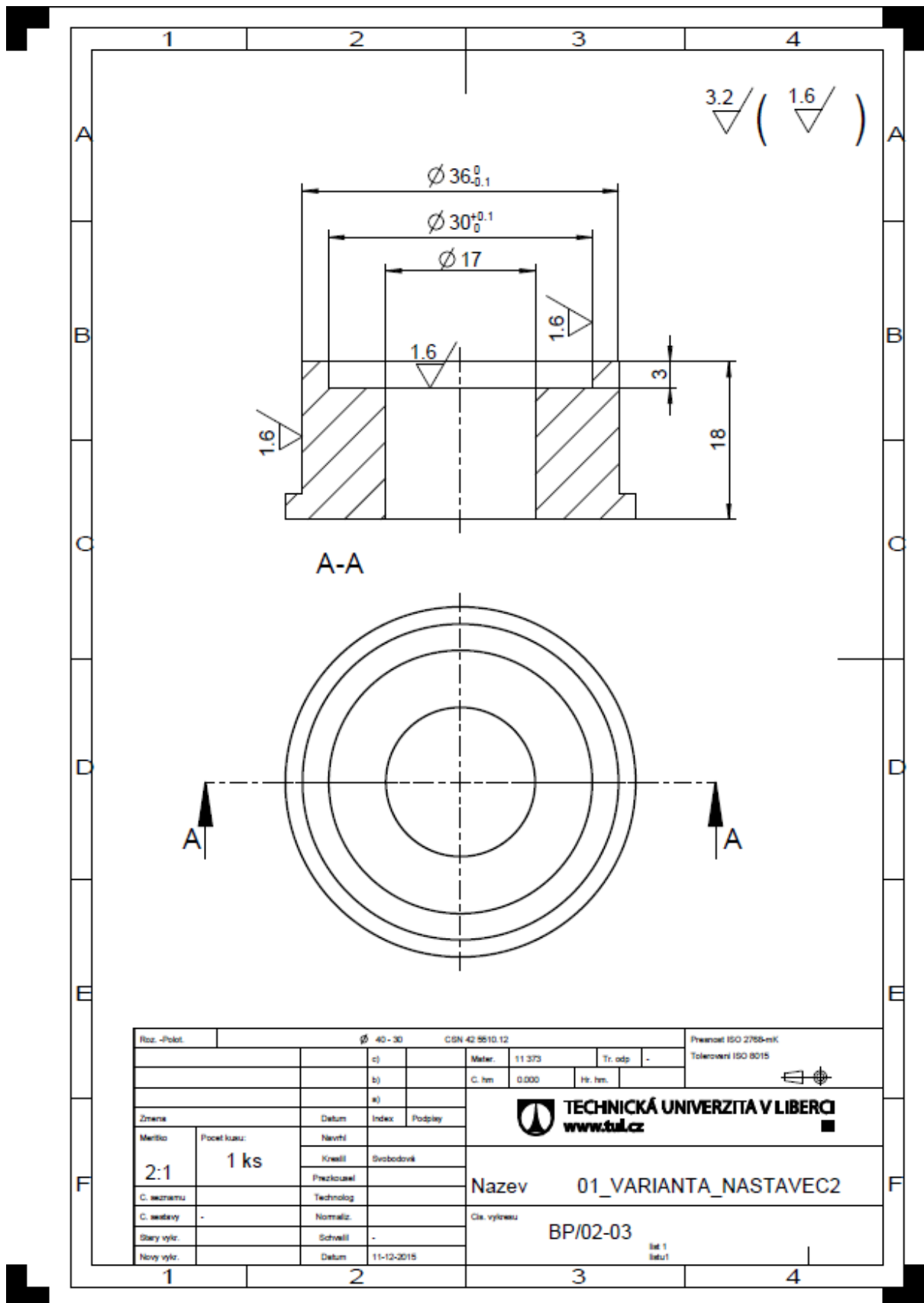
B1 První díl výsledného pólového nástavce

B2 Druhý díl výsledného pólového nástavce

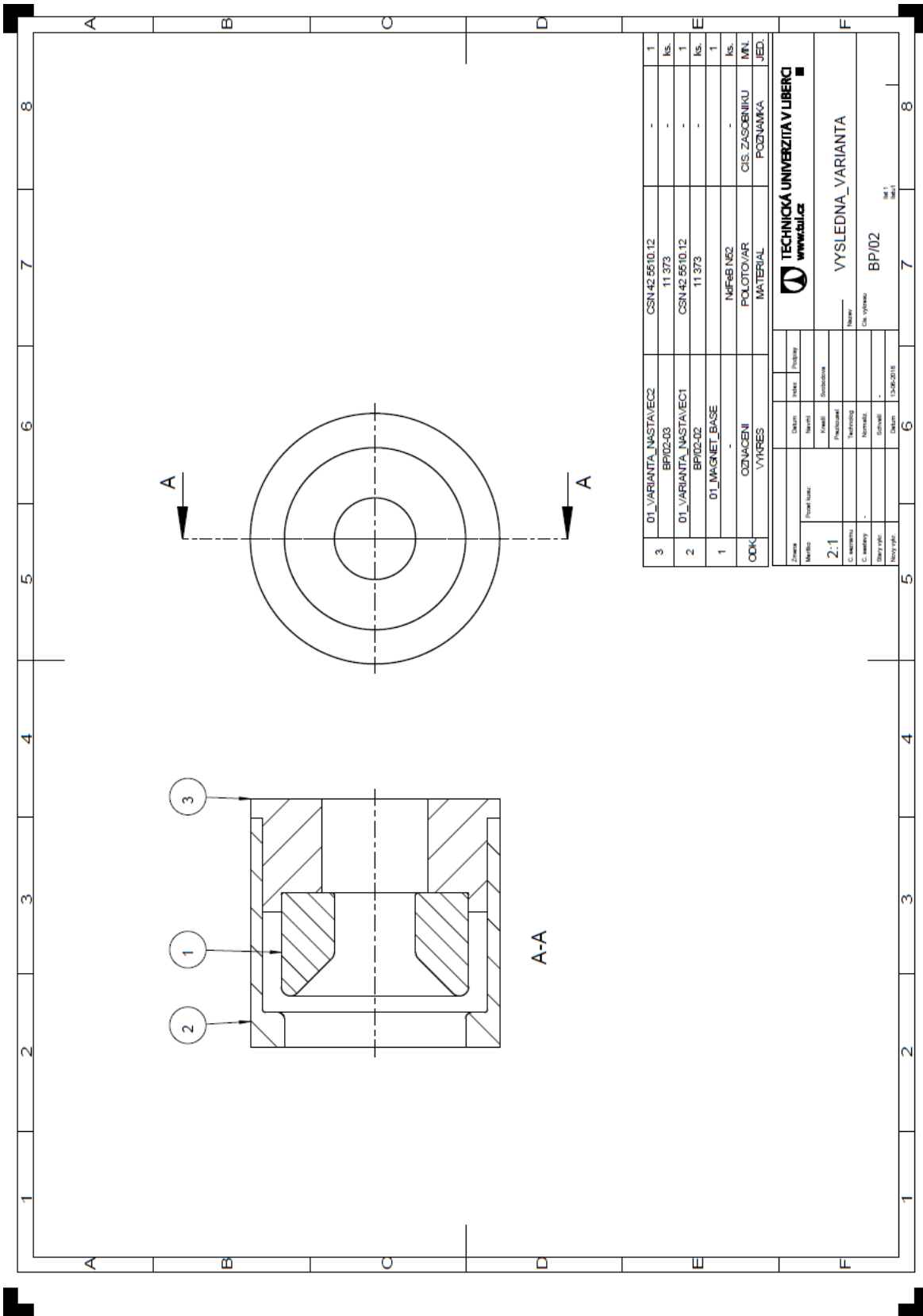
B3 Sestava



První díl výsledného pólového nástavce



Druhý díl výsledného půlového nástavce



3	01_VARIANTA_NASTAVEC2 BP/02-03	CSN 42 5510.12 11 373	-	1
2	01_VARIANTA_NASTAVEC1 BP/02-02	CSN 42 5510.12 11 373	-	1
1	01_MAGNET_BASE	MF-FB N52	-	1
ODK	ODZNAČENI VÝKRES	POLOTOVAR MATERIAL	CIS ZASOBNIKU POZVAMKA	MVL JED.

Záves	Detail	Index	Podobný
Metoda	První kresba	Nová	Střední
2:1	Průřez	Střední	Střední
C. měřítko	Průřez	Technický	Normální
C. měřítko	Normální	Normální	Normální
Stav	Stav	Stav	Stav
1-06-2018	1-06-2018	1-06-2018	1-06-2018

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
www.tul.cz

VÝSLEDNÁ_VARIANTA

BP/02

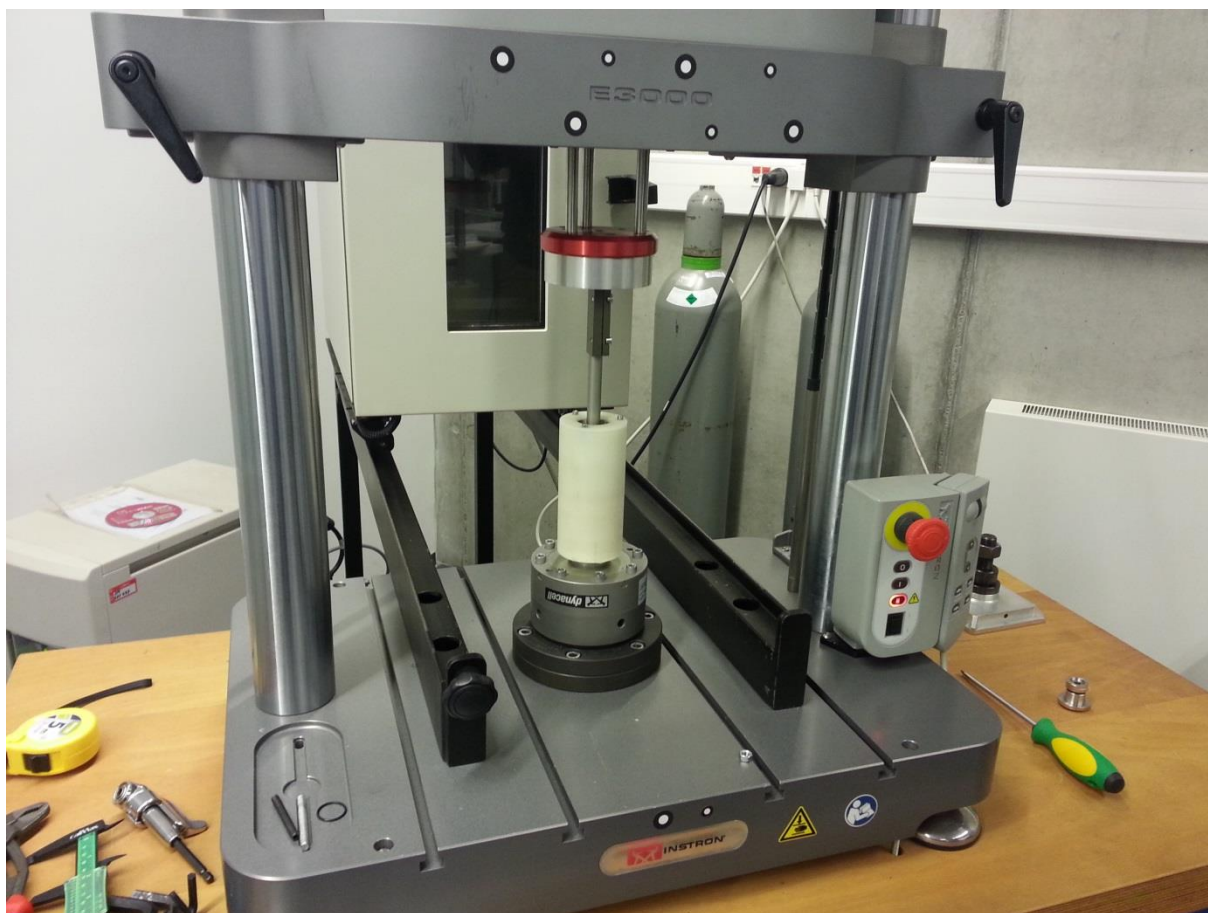
Str. 1

Str. 1

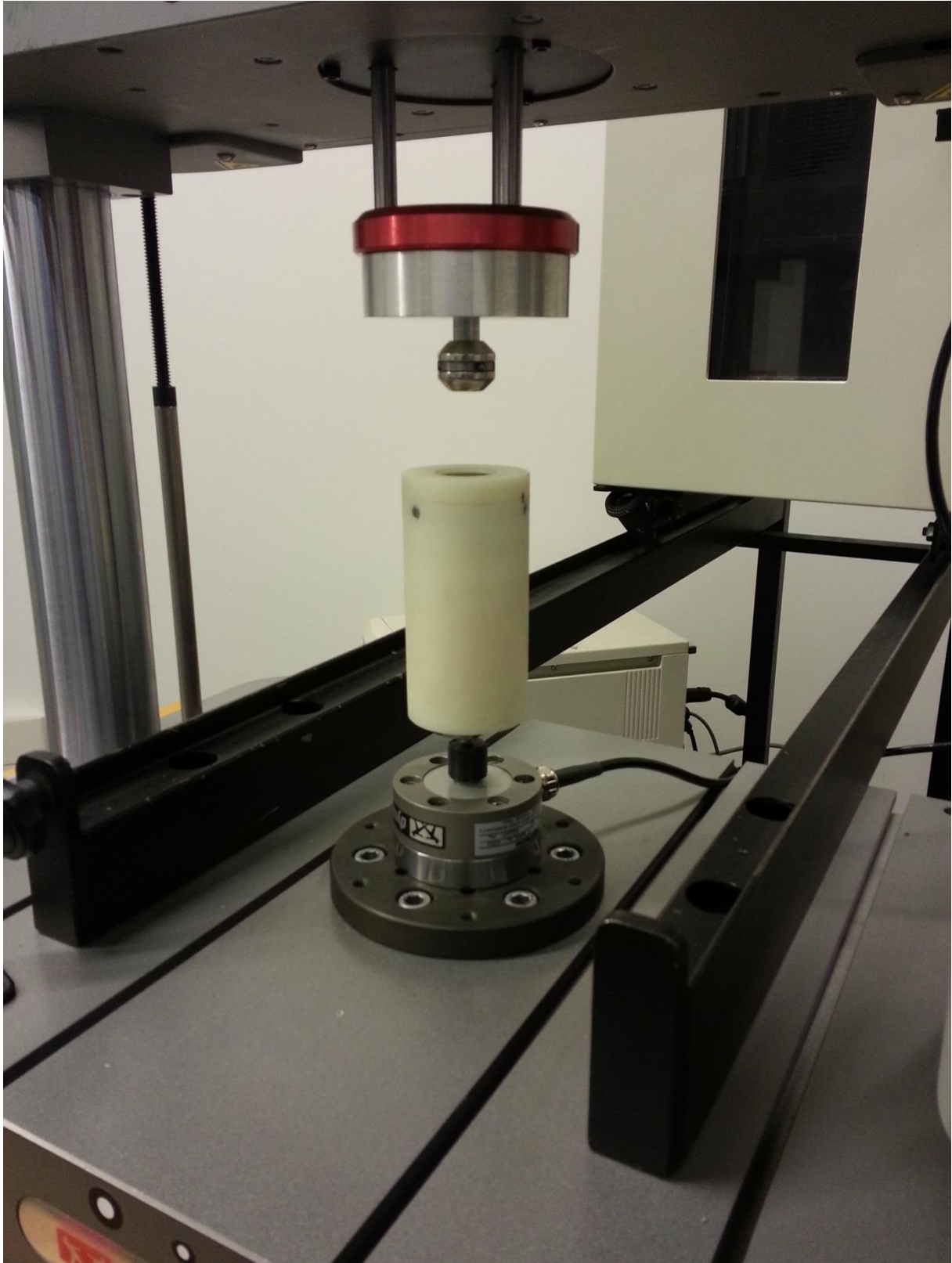
Sestava

Příloha C – Měření magnetického akumulátoru s pólovými nastavci

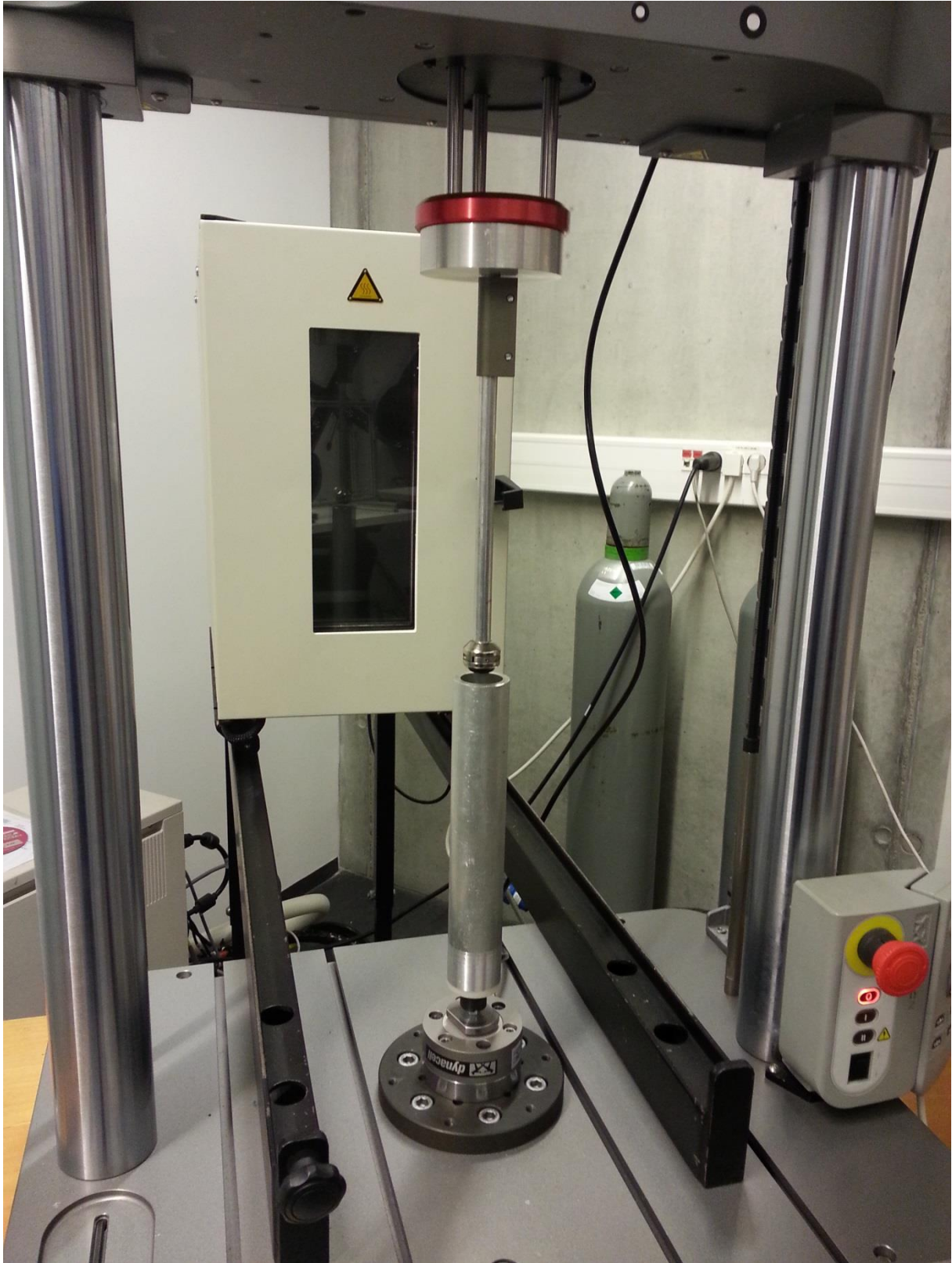
- C1 Sestava dynamického měření vířivých proudů původní varianty pólového nastavce
- C2 Sestava kvazistatického měření výsledné varianty pólového nastavce
- C3 Sestava dynamického měření vířivých proudů varianty s ochrannou trubicí



Sestava dynamického měření vířivých proudů původní varianty pólového nástavce



Sestava kvazistatického měření výsledné varianty pólového nástavce



Sestava dynamického měření vířivých proudů varianty s ochrannou trubicí