



Magnetická zarážka dveří

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Jan Koníček**
Vedoucí práce: Ing. Jan Valtera, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Koníček**

Osobní číslo: **S16000370**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojní inženýrství**

Název tématu: **Magnetická zarážka dveří**

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 způsobů tlumičů a zarážek dveří.
2. Proveďte dynamickou analýzu dveřního systému.
3. Proveďte analýzu magnetického pole systému zarážky dveří.
4. Navrhněte a konstrukčně zpracujte magnetickou zarážku dveří včetně výkresové dokumentace a vyrobený funkční model případně experimentálně ověřte.

Rozsah grafických prací: **výkresová dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **30 stran formát A4**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] **SVOBODOVÁ, Jana.** *Analýza magnetických akumulátorů kinetické energie.* Liberec 2016. **Bakalářská práce. Technická Univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra textilních a jednoúčelových strojů.**

[2] **Campbell, P.:** *Permanent Magnet Materials and Their Application.* Cambridge, 1991.

[3] **Manuál komerčního softwaru Ansys Maxwell.**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Valtera, Ph.D.

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Konzultant bakalářské práce:

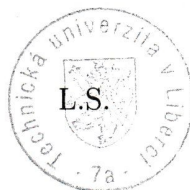
prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.

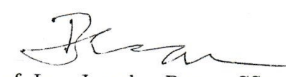
Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Datum zadání bakalářské práce: **10. listopadu 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **4. července 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. března 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen 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 vědom 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 vypracoval 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:

Poděkování

Nejprve bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Janu Valterovi, PhD., za jeho trpělivost, přínosné připomínky a cenné rady, jimiž přispěl ke vzniku této bakalářské práce. Také bych rád poděkoval této rodině, přátelům a blízkým za podporu během celého mého studia.

Abstrakt

Tato práce se zabývá konstrukcí nové magnetické zarážky pro dveřní systém. Tento nový systém umožňuje akumulaci otevíraných dveřních systémů prostřednictvím magnetického pole permanentních magnetů a zároveň umožňuje fixaci dveří v dané poloze. V práci je provedena rešerše známých systémů magnetických tlumičů a zarážek dveřního systému. Dále je provedena dynamická analýza pohybu otevírání dveří. Pro tyto účely byl vytvořen model dveří v programu PTC Creo Parametric, kde se prováděla simulace otevírání dveří a vliv působení magnetického systému na pohyb. Další část práce se zabývala analýzou stacionárního magnetického pole magnetického systému v různých uspořádáních. Pro tyto účely byl vyhotoven model v programu FEEM 4.2. Výsledkem analýzy je návrh geometrie magnetů a geometrie pólových nástavců, jak pro navýšení magnetické síly, tak pro ukotvení daného magnetu na dveře a stěnu místnosti. Výsledná geometrie magnetických prvků zarážky byla konstrukčně zpracována v programu Creo Parametric, včetně výkresové dokumentace. Vyrobený funkční vzorek byl úspěšně testován na měřícím zařízení, jehož výsledky potvrdily správnost výsledků simulací vytvořeného modelu.

Klíčová slova

magnetická zarážka, magnetická pružina, pólový nástavec, analýza, magnetická síla

Abstract

This paper deals with the design of a new magnetic stopper for a door system. This new system enables the accumulation of door systems by means of the magnetic field of permanent magnets and at the same time it enables securing of the door in the given position. The literature research of the door stoppers and brakes is carried out in the work.

Further, a dynamic analysis of the movement of the door opening is performed. For this purpose, the model of a door was created in the software Creo Parametric, where simulation of the door opening process was carried out and the influence of the magnetic system upon the door opening movement. Another part of the thesis deals with the analysis of the quasi-static magnetic field of the magnetic system in various configurations. For this purpose a model of the magnetic stopper was developed in the software FEMM 4.2. As a result of the analysis, the geometry of the magnets and the geometry of the pole-pieces are designed, both for increasing the magnetic force and for fixing of magnets to the door and to the wall. The final geometry of the magnetic stopper elements was designed in the software Creo Parametric, including the drawing documentation. The manufactured functional model was successfully tested on a measuring device and simulation results were successfully experimentally verified.

Keywords

magnetic door stopper, magnetic spring, a pole piece, analysis, magnetic force

Obsah

Seznam použitých zkratk	10
1. Úvod	11
2. Zarážky a tlumiče dveřních systémů	12
2.1. Rešerše vybraných tlumičů dveří	12
2.1.1. Pryžový doraz	12
2.1.2. Pružinový doraz	13
2.1.3. Pneumatický tlumič	14
2.2. Rešerše vybraných dveřních zarážek	14
2.2.1. Klínová zarážka	15
2.2.2. Nožní nášlapná zarážka	15
2.2.3. Magnetická zarážka	16
2.2.4. Dveřní pojistka	17
2.3. Magnetický akumulátor	17
3. Dynamická analýza dveřního systému	19
3.1. Okrajové podmínky dynamické analýzy	20
3.2. Dynamická analýza dveřního systému v programu Creo Parametric 3.0	26
4. Model magnetického systému	29
4.1. Model v programu FEMM 4.2	31
4.2. Materiálové vlastnosti	32
4.3. Okrajové podmínky	33
5. Citlivostní analýza magnetického systému	34
5.1. Citlivostní analýza původních kuželových magnetů	34
5.2. Analýza různých geometrií magnetů	35

5.3 Návrh pólového nastavce.....	38
5.4 Výsledná geometrie pólových nastavců	42
6. Konstrukční zpracování magnetické zarážky	44
6.1 Montáž a výroba	46
7. Měření síly magnetického systému	49
7.1. Konstrukční řešení přípravku pro měření.	49
7.2. Experimentální měření.....	50
Závěr	53
Literatura	55
Seznam příloh	56

Seznam použitých zkratk

d [mm]	vnitřní průměr magnetu
D [mm]	vnější průměr magnetu
h [mm]	výška
BH max [MGOe]	hustota energie
ω [deg s ⁻¹]	úhlová rychlost
ε [deg s ⁻²]	úhlové zrychlení
φ [deg]	úhlová dráha
E_k [J]	kinetická energie
J [kg.m ²]	moment setrvačnosti
T [N]	tečná dynamická síla
O [N]	odstředivá síla

1. Úvod

Tato práce zkoumá možnost využití magnetické zarážky u dveřního systému. Magnetická zarážka je zkoumána takovým způsobem, kde by nejdříve při působení magnetické odpudivé síly docházelo k tlumení nárazu otevíraných dveří, poté by docházelo k přechýlení magnetických sil a následnému působení přitažlivé síly zarážka zajistí dané dveře proti pohybu.

Dveřním systémem jsou myšleny dveře a jím podobné zařízení. Do této skupiny systémů spadají zařízení typu zavírače dveří, zarážky dveří a dveřní tlumiče.

Cílem bakalářské práce je konstrukční návrh magnetické zarážky dveří. V práci byla provedena rešerše známých tlumičů a zarážek dveří a byla také provedena dynamická analýza pohybu dveřního systému při otevírání. Cílem analýzy bylo získání celkové energie, kterou je nezbytné magnetickou zarážkou akumulovat pro bezpečné zastavení dveří při jejich volném rotačním pohybu. Úkolem bylo zjištění kinematických parametrů, vyskytujících se při rotačním pohybu otáčejících se dveří. S využitím získaných parametrů dveřního systému byl vytvořen model, ve kterém byla prováděna simulace otevírání dveří. Do tohoto modelu byly zpětně zadávány hodnoty získané z citlivostní analýzy magnetického pole v programu FEMM4.2.

Analýza magnetického pole byla prováděna v programu FEMM4.2, ve kterém byl vytvořen 2D-model magnetické zarážky. Z citlivostní analýzy magnetického pole zarážky dveří byl získán průběh magnetické síly, který dával předpoklady pro akumulaci veškeré kinetické energie dveří, a následného bezpečného zajištění dveřního křídla u stěny místnosti proti dalšímu pohybu.

Součástí práce je konstrukční návrh magnetické zarážky včetně výkresové dokumentace. S vyrobeným modelem magnetické zarážky proběhlo experimentální měření a ověření funkčnosti této magnetické zarážky a správnosti výpočtového modelu.

2. Zarážky a tlumiče dveřních systémů

Na trhu existuje velké množství zářek a tlumičů pro dveřní systémy, lišících se funkcí, pro kterou jsou určeny a způsobem jakým plní tuto funkci. V této bakalářské práci jsou popsány dvě skupiny dveřních zařízení, a to tlumiče dveří a dveřní zářky a jejich funkce. V první skupině jsou prvky používající se k absorpci kinetické energie dveří, která je podrobně popsána v následující kapitole. Do druhé skupiny patří prvky, které umožňují zajištění dveří v otevřené poloze a zabrání dalšímu pohybu dveří. Tato skupina je podrobně popsána v kapitole 2.2.

2.1. Rešerše vybraných tlumičů dveří

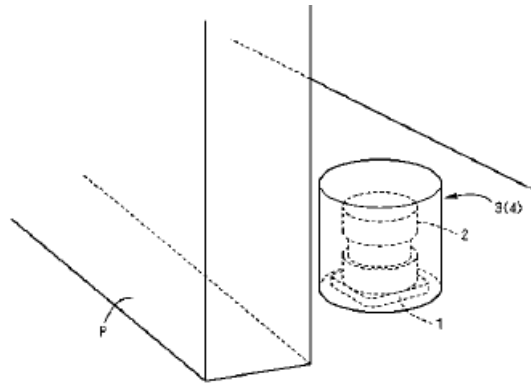
Tlumič neboli doraz je takové dveřní zařízení, které absorbuje kinetickou energii dveří, které jsou při otevírání v pohybu, pohltí jejich energii a ztlumí jejich náraz. Jejich hlavním cílem je ve většině případů zabránění nárazu dveří do stěny a tedy zabránění v poškození stěny nebo samotných dveří. Druhů dorazů je velké množství, jednotlivé typy dorazů se liší materiálem, který používají k akumulaci energie, tvarem provedení a místem instalace. Dveřní doraz plní vždy jen funkci akumulace kinetické energie dveří a tedy pokud mají zůstat dveře zajištěné v otevřené poloze, kombinují se tyto dorazy s dveřními zářkami.

2.1.1. Pryžový doraz

Nejjednodušším provedením dveřního dorazu je doraz vytvořený z pružného materiálu, například z pryže, přišroubovaný na podlahu nebo stěnu místnosti. Je to nejrozšířenější dveřní doraz. K zastavení dveří či oken tento doraz využívá pryžový válec 3, který přemění kinetickou energii dveří na deformační energii pryžové části zářky. Na tento doraz dosedají dveře obvykle čelní plochou v oblasti spodního okraje dveří co nejdále od dveřního závěsu. Na obrázku 1 je ukázka pryžového dorazu, který je dále popsán v patentovém spisu číslo JP2017002544A [9].

Mezi jeho výhody vedle jednoduché konstrukce patří také snadná montáž a nízká pořizovací cena. U všech vybraných dveřních dorazů vždy dochází ke kontaktu mezi dveřmi a daným dorazem.

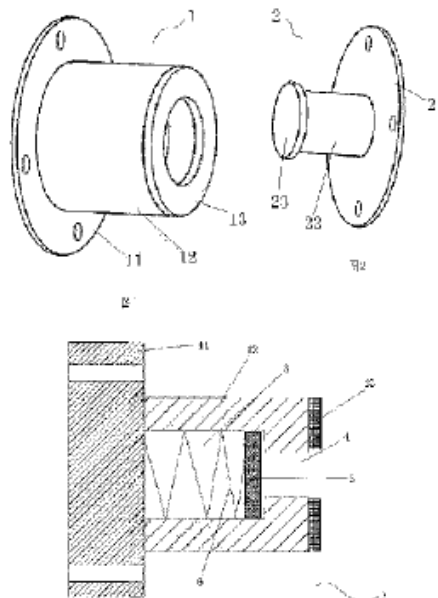
Proto mezi jejich nevýhody patří zejména hluk vznikající při kontaktu. Dále při abnormálně prudkém otevření dveří dochází při nárazu do zářky ke zpětnému odražení dveří.



Obrázek 1: Pryžový doraz dveří, dle[9]

2.1.2. Pružinový doraz

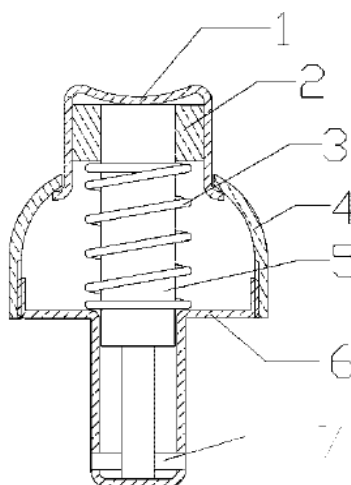
Pružinový doraz je popsán v patentovém spisu číslo CN205477000U [9] a je zobrazen na obrázku 2. U tohoto dorazu je kinetická energie dveří akumulována pomocí mechanické pružiny. Dveřní křídlo při otevírajícím se pohybu narazí prvem 2 do statické části 1 připevněné na stěně. Při nárazu dochází k postupné elastické deformaci mechanické pružiny 9 a tím dochází ke ztlumení nárazu do stěny, čímž se sníží riziko poškození stěny nebo samotných dveří.



Obrázek 2: Pružinový doraz, dle [9]

2.1.3. Pneumatický tlumič

Posledním vybraným dorazem je systém, který pracuje na principu vzájemné spolupráce mechanické pružiny a pístu, který stlačuje vzduch. Pneumatický tlumič je popsán v patentovém spisu číslo CN104929454A [9] a je zobrazen na obrázku 3. K akumulaci kinetické energie dveří je zde využít píst 5, který stlačuje vzduch i mechanickou pružinu 3, díky které se vrací zpět do původní polohy. Tento tlumič je připevněn na stěně místnosti. Při tlumení otevírajících se dveří dochází ke kontaktu dveřního křídla s víkem 1. Víko se posouvá i s pístem 5, který stlačuje vzduch i mechanickou pružinu 3, díky které se po uvolnění dveří vrací píst zpět do původní polohy. Stejného principu pružení mechanické pružiny a tlumení pneumatického tlumiče je využíváno například u odpružených vidlic u cyklistických kol nebo motocyklů. Nevýhodou tohoto systému, oproti pryžovému dorazu, je složitější konstrukce.



Obrázek 3: Pneumatický systém tlumiče, dle [9]

2.2. Rešerše vybraných dveřních zarážek

Zarážka dveřního systému je takové dveřní zařízení, které má zadržet dveře v otevřené statické poloze na požadovanou dobu. Její funkcí je tedy zabránění dalšímu nechtěnému pohybu dveří, který může být vyvolán třeba průvanem nebo špatným usazením dveří v zárubni. Podobně jako u dveřních dorazů je i dveřních zarážek na trhu velké množství druhů, které se zásadně liší jen ve způsobu udržení dveří ve stabilní poloze. Zarážky tedy dělíme podle způsobu zadržení dveří.

Rozdělení dle způsobu zadržení dveří:

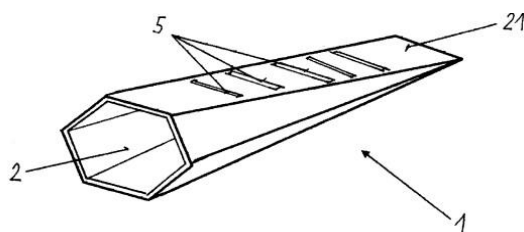
- Geometrické
- Pružinové
- Magnetické

2.2.1. Klínová zarážka

Klínová zarážka je nejjednodušším a nejrozšířenějším technickým řešením dveřních zarážek. Toto technické řešení je založeno právě na geometrickém tvaru ve tvaru klínu, kde právě díky klínové geometrii zarážky dochází k aretaci¹ dveří pouhým přiražením této zarážky pod dané dveře.

U klínové zarážky je zabráněno dalšímu pohybu po podlaze pomocí třecích sil mezi zarážkou a podlahou, vyvolaných tlakovou silou od dveří.

Pokud je potřeba dveře odjistit, je vyžadováno dalších pohybových úkonů, při kterých je zarážka odstraněna. Tento typ zarážky není pevně připevněn ke dveřím ani ke stěně místnosti. Na obrázku 4 je zobrazena klínová zarážka, která je popsána v patentovém spisu číslo UV017976 [9].



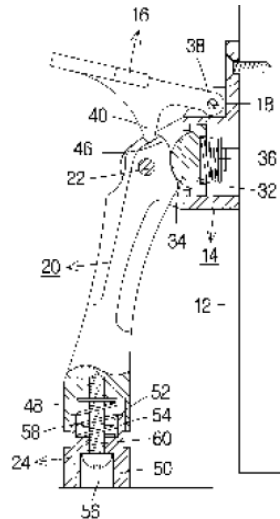
Obrázek 4: Klínová zarážka, dle [9]

2.2.2. Nožní nášlapná zarážka

Nožní nášlapná zarážka je popsána v patentovém spisu číslo KR20160149389A [9]. Manipulace s nožní nášlapnou zarážkou pro dveře je jednoduchá. Ke spuštění je potřeba sešlápnutí ramene 20 tak, aby spodní část opatřena gumovou brzdou dosedla na podlahu, tím je dosaženo zadržení dveří v dané poloze. Pro uvolnění dveří stačí sešlápnut páku 16, čímž dojde k uvolnění a rameno se vrátí do původní polohy.

¹ aretace = mechanické zajištění přístroje nebo zařízení proti nechtěnému pohybu

Další výhodou této zarážky je možnost použití i ve venkovních prostorech. Montáž se provádí na spodní část dveří tak, aby sešlápnutá brzda zajistila dveře proti pohybu.



Obrázek 5: Nožní nášlapná zarážka, dle [9]

2.2.3. Magnetická zarážka

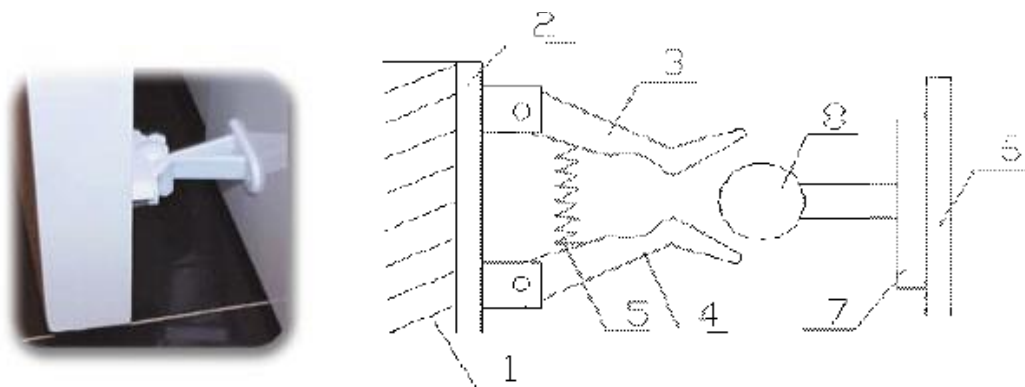
Dalším typem je magnetická zarážka pracující na principu přitažlivých sil dvou permanentních magnetů. Tato zarážka se skládá ze dvou samostatných prvků, kdy první je pevně připevněn na dveře a druhý na stěnu místnosti. Dveře jsou přidrženy v dané poloze magnetickou silou daných magnetů. Jedná se o jednoduché zarážky, které slouží pouze k zajištění dveří v otevřené statické poloze. U tohoto typu zarážek hrozí náraz a následné poškození použitých permanentních magnetů. Proto je vhodné pro vyšší komfort, bezpečnost a životnost této zarážky použití současně např. s pryžovými dorazy.



Obrázek 6: Ukázka magnetické zarážky, dle [9]

2.2.4. Dveřní pojistka

Tato zářka pracuje na mechanické vazbě mezi dvěma prvky, které jsou jednotlivě a pevně umístěny na dveřním křídle 6 a stěně místnosti 1. Detailněji je popsána v patentovém spisu číslo CN106285261A [9]. Při přibližování dveří dochází k postupnému vnikání válcového členu 8 do klipsen 3 a 4, které jsou k sobě stahovány tažnou mechanickou pružinou 5. Nejdříve působí tato dveřní zářka i jako tlumič dveří. Pokud je však překonán počáteční odpor a člen 8 se dostane do vykrojených částí klipsen, klipsny působením mechanické pružiny sevřou válcový člen a dveře jsou zachyceny proti dalšímu pohybu. Pro uvolnění dveří stačí odtrhnout dveří od stěny dostatečnou silou. Mezi výhody této dveřní pojistky patří schopnost tlumení nárazu dveří a jejich následné zajištění proti pohybu a cena této dveřní pojistky. Stejně jako u všech uvedených dveřních systémů hrozí, že při vysoké rychlosti dovíraných dveří dojde k nárazu a poškození zářky s tlumičem. V případě mechanické zářky s pružinou a výkyvnými klipsami je riziko poškození pojistky vyšší. Další nevýhodou této zářky by mohla být kratší životnost plastových částí, které obepínají válec druhého prvku. U těchto částí dochází k opotřebení, které má za následek klesající velikost přídržné síly.



Obrázek 7: Dveřní pojistka, dle [9]

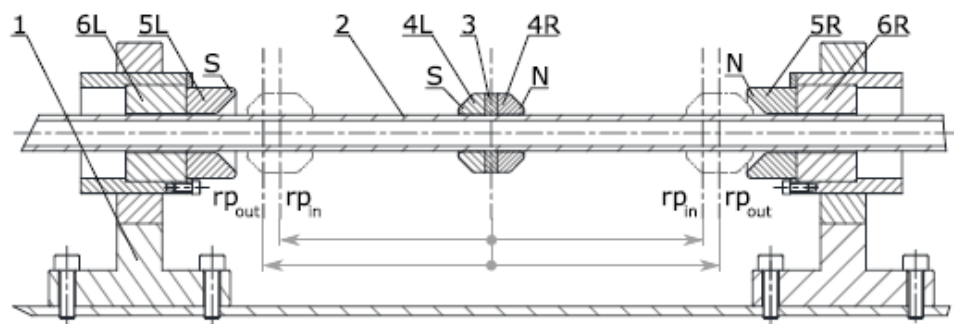
2.3. Magnetický akumulátor

Dalším uvedeným typem je magnetický akumulátor kinetické energie rozváděcí tyče vyvinutý pro centrální rozváděcí systém rotorového doprďadacího stroje. Schéma tohoto zařízení je uvedeno na obrázku 8.

Magnetický akumulátor kinetické energie je zařízení, které s využitím magnetických sil akumuluje kinetickou energii na rozváděcí tyči. Rozváděcí tyče konají specifický přímočarý rozváděcí pohyb.

Na rozváděcí tyči a rámu jsou umístěny kuželové magnety. Kuželový magnet 4L je pevně umístěn na rozváděcí tyči 2. Tento magnet je dále v práci označován jako „původní magnet“. V oblasti úvratí rozváděcího pohybu se nachází magnet rámu 5L a pólový nástavec 6L.

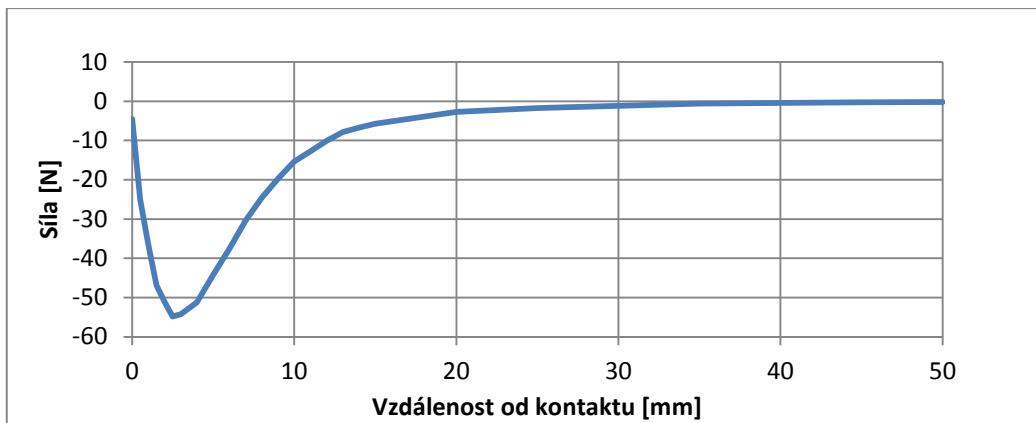
V práci jsou dále označovány jako „původní pólový nástavec“ a „původní statický magnet“. Rozváděcí tyč 2 s magnety je umístěna souose posuvně vůči magnetům rámu 5L.



Obrázek 8: Schéma magnetického akumulátoru, dle [7]

Průběh magnetické síly je nelineární, při přibližování magnetu nejdříve odpudivá síla exponenciálně roste, až do okamžiku, kdy v určité vzdálenosti dosahuje maxima. Poté odpudivá síla klesá, až do okamžiku, kdy dochází ke kontaktu mezi magnetem na tyči s magnetem v rámu, tento stav se dále označuje termínem „kontakt“. Tento průběh je znázorněn na obrázku 9.

Vhodnou úpravou geometrie magnetických prvků lze zajistit změnu smyslu magnetické síly v koncové zdvihové části, kdy se odpudivá síla magnetické pružiny přechýlí v sílu přitažlivou. Tato charakteristika průběhu magnetické síly dává předpoklady pro využití tohoto magnetického systému jako magnetického tlumiče dveří a současně i jako magnetické záložky dveří.



Obrázek 9: Průběh magnetické síly původních magnetů

3. Dynamická analýza dveřního systému

Vlastnosti magnetického akumulátoru dávají předpoklady k využití tohoto způsobu akumulování energie pro dveřní systém sloužící k akumulaci kinetické energie dveří. Pro návrh silové charakteristiky pasivní magnetické pružiny je nutné znát alespoň orientačně energii, kterou bude potřeba magnetickou pružinou akumulovat. Předpokladem návrhu magnetické pružiny je, že dokáže akumulovat kinetickou energii otevíraných dveří. Z tohoto důvodu byla provedena dynamická analýza, jejímž cílem je ověřit dynamické chování dveřového systému s působící magnetickou pružinou. Pro návrh byly použity interiérové dveře s následujícími parametry: hmotnost dveří: $m = 24,7 \text{ kg}$, šířka dveří: $L = 800 \text{ mm}$.

Způsob otevírání dveří je velice individuální a proto těžko obecně definovatelný pohyb. Každý člověk otevírá dveře různě velkou silou, po jinak dlouhý čas i na jinak velkém úseku. Na trhu existuje také mnoho typů dveří s různou hmotností a rozměry. Při návrhu magnetického systému bylo vycházeno z předpokladu otevírání dveří rukou a následnému nechtěnému puštění kliky, čímž dojde k volnému pohybu křídla dveří a jeho naražení na stěnu. Navržená magnetická zarážka by v tomto případě měla zajistit bezpečné zastavení křídla dveří před jeho kontaktem se stěnou, resp. dorazem.

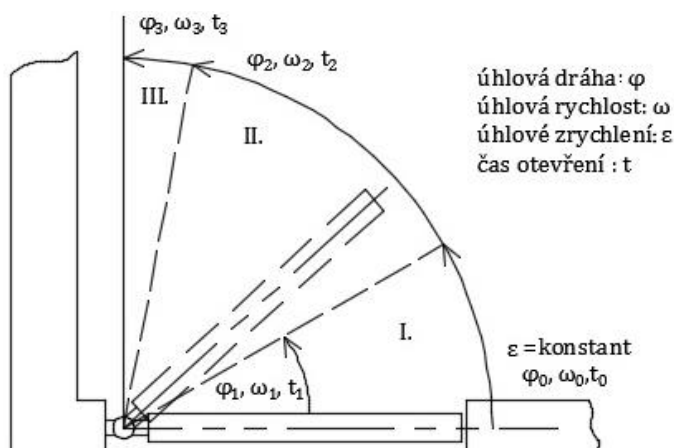
Pro přehlednost je proces otevírání dveří rozdělen do tří částí a jednotlivé části jsou podrobně popsány v následující kapitole, kde je také vypočítána celková kinetická energie otevíraných dveří.

Návrh magnetického systému se následně řídil podmínkou práce vykonané magnetickou pružinou, odpovídající kinetické energii otáčejícího se křídla dveří.

Pro kontrolu byla také provedena dynamická analýza v programu Creo Parametric 3.0. Byl vytvořen model dveřního systému a ze získaných parametrů, kde magnetický prvek byl popsán pomocí působící síly na určitém úhlu. Při simulaci procesu otevírání dveří bylo cílem analýzy dosažení nulové úhlové rychlosti před kontaktem dveřního křídla a stěny. Následující kapitoly podrobně popisují tyto dva přístupy řešení dynamické analýzy. Vstupní údaje magnetické zarážky byly vkládány do analýzy prostřednictvím datového souboru popisujícího závislost působící síly. Tato silová závislost byla získána z kvazistatické analýzy magnetického pole zarážky v programu FEMM 4.2.

3.1. Okrajové podmínky dynamické analýzy

Jak již bylo řečeno, rotační pohyb dveřního křídla při procesu otevírání lze rozdělit do tří částí. Na obrázku 10 je zobrazena oblast otevírání dveří s celkovým úhlem otevírání 90° a třemi úseky. V dynamické analýze se předpokládá zanedbatelná hmotnost části magnetické zarážky připevněné na dveře, a tedy zanedbatelné ovlivnění dynamické analýzy. Proto je zde uvažováno pouze se skutečnou hmotností dveřního křídla.



Obrázek 10: Schéma oblasti kde se otevírají dveře s úhlem otevření 90° se vstupními podmínkami

V první části je působeno rukou na kliku dveří. Ve druhé části se dveře volně otáčejí a ve třetí části je rychlost dveří redukována působením odpudivé síly magnetické zarážky. Jednotlivé úseky jsou zobrazeny a analyzovány na následujících obrázcích. V každém úseku je popsána i momentová rovnice k ose rotace dveří.

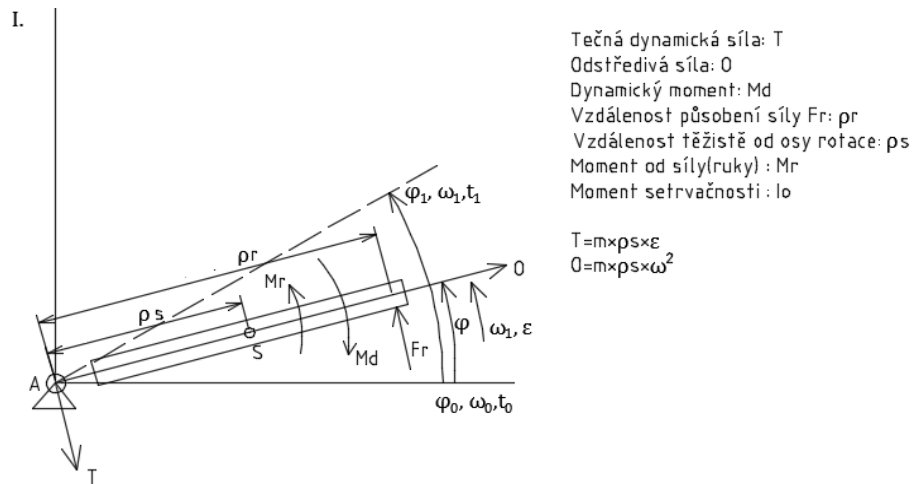
V první části je na dveře působeno silou a tím udáváno úhlové zrychlení ε . Tento dynamický stav je zobrazen na obrázku 11. V provedeném měření je předpokládáno, že je na dveře působeno konstantní silou, což se na základě Newtonova zákona projeví konstantním úhlovým zrychlením dveří. Pro zjištění velikosti tohoto prvního úseku bylo provedeno měření na interiérových dveřích ve studijní kanceláři na Katedře textilních a jednoúčelových strojů. Pro zjištění na jakém úseku bylo na dveře působeno silou, byly na podlaze pod dveřmi načrtnuty kruhové výseče po 10° , z nichž bylo přibližně odečteno, na jakém úhlu došlo k puštění kliky. Pomocí stopky byla také měřena doba urychlování dveřního křídla.

Vstupní předpoklady:

- počáteční úhel otevření: $\varphi_0 = 0^\circ$
- úhlové zrychlení: ε (je uvažováno konstantní)
- počáteční úhlová rychlost: $\omega_0 = 0 \text{ }^\circ/\text{s}$
- celkový úhel otevření: $\varphi_c = 90^\circ$
- čas na začátku: $t_0 = 0 \text{ s}$

V první části byly změřeny tyto parametry:

- čas otevírání dveří, kdy je na ně působeno silou: $t_1 = 0,75 \text{ s}$
- úhlová dráha, kdy je na dveře působeno silou: $\varphi_1 = 30^\circ$
- celkový čas otevření dveří: $t_c = 1,5 \text{ s}$



Obrázek 11: První úsek dynamické analýzy

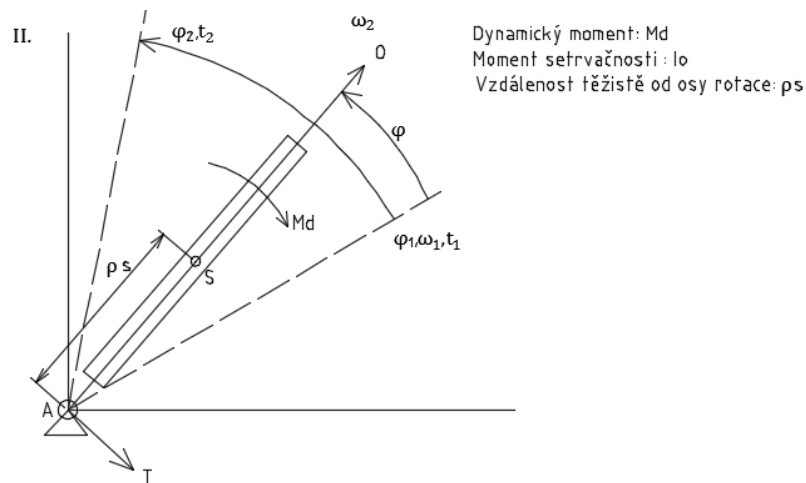
K ose otáčení dveří (viz bod A) je popsána momentová rovnice.

$$A^{\wedge}: M_r - M_d = 0$$

$$F_r \cdot \rho_r - I_A \cdot \varepsilon = 0$$

Z tohoto měření bylo zjištěno urychlování dveřního křídla na úseku 30° po dobu $0,75$ s. Tyto výsledné informace byly také zadány do dynamického modelu v programu Creo Parametric 3.0.

Ve druhé části předpokládáme, že na dveře nepůsobí žádná síla a nepůsobí zde ani žádné čepové tření v pantech ani odpor vzduchu. Za tohoto předpokladu se dveře ve druhé části otevírají konstantní úhlovou rychlostí ω_2 , kterou získaly v první části otevírání, kdy na ně bylo působeno silou. Na obrázku 12 je zobrazen druhý úsek dynamické analýzy. Pokud je úhlová rychlost konstantní pak je úhlové zrychlení nulové.

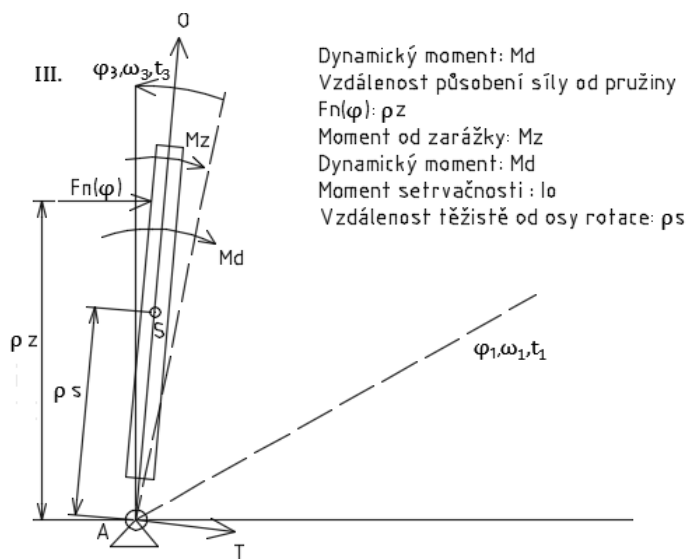


Obrázek 12: Druhý úsek dynamické analýzy

$$\hat{A}: -M_d = 0$$

$$I_A \cdot \varepsilon = 0$$

Ve třetím úseku působí na dveře síla od magnetické zarážky. Předpokladem je, že tato magnetická zarážka akumuluje veškerou kinetickou energii dveří. Tento stav je znázorněn na obrázku 13.



Obrázek 13: Třetí úsek dynamické analýzy

$$\hat{A}: -M_z - M_d = 0$$

$$-F_n(\varphi) \cdot \rho_z = I_0 \cdot \varepsilon$$

Na základě provedených pokusů měření, získaných okrajových podmínek a rozboru dynamické analýzy je dále proveden výpočet pro zjištění výsledného úhlového zrychlení ε a z něho výsledné úhlové rychlosti ω_1 .

Parametry, které potřebujeme vypočítat:

- úhlová rychlost na konci první části: ω_1
- kinetická energie E_k

Za předpokladu konstantního úhlového zrychlení ε a času t_1 byla vyjádřena úhlová rychlost ω . Nejdříve jsou výpočty počítány obecně a teprve až je známo úhlové zrychlení ε , je pak dosazeno do vzorce a spočítána úhlová rychlost ω_1 .

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$$

$$\int_{t_0}^{t_1} \varepsilon dt = \int_{\omega_0}^{\omega_1} d\omega \rightarrow \varepsilon \cdot t_1 = \omega_1$$

Z následného vzorce je vyjádřena úhlová dráha φ

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$$

$$\omega \int dt = \int d\varphi \rightarrow \int_{t_0}^{t_1} \varepsilon t_1 dt = \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} d\varphi \rightarrow \varepsilon \frac{t_1^2}{2} = \varphi_1$$

Dále jsou zjištěny potřebné vlastnosti a při dosazení okrajových podmínek je vypočítané úhlové zrychlení ε .

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot \varphi_1}{t_1^2} = \frac{2 \cdot 30}{0,75^2} = 106,66 \text{ deg/s}^2$$

Úhlová rychlost ω_1 na konci první části je spočítána takto:

$$\omega_1 = \varepsilon \cdot t_1 = 106,66 \cdot 0,75 = 79,95 \text{ deg/s}^1$$

Pro druhou část otevírání dveří je uvažována konstantní úhlová rychlost ω .

Tato úvaha vznikla za předpokladu, že je zanedbáváno čepového tření v pantech a odporu vzduchu. Za tohoto předpokladu je úhlová rychlost $\omega_2 = \omega_1$, která byla vypočítána v první části.

Parametry pro druhou část otevírání:

- úhlová rychlost na konci $\omega_2 = \omega_1 = 79,95 \text{ deg/s}$
- čas otevření druhé části: $t_2 = 0,75 \text{ s}$

Pro výpočet celkové kinetické energie volně se otáčejícího dveřního křídla bylo nutné vyjádřit moment setrvačnosti. Moment setrvačnosti vyjadřuje míru setrvačnosti tělesa při rotačním pohybu. Velikost momentu setrvačnosti závisí na hmotnosti tělesa a vzdálenosti těžiště tělesa od osy rotace. Kinetická energie rotačního pohybu dveří vyjadřuje energii, jakou musí magnetický systém akumulovat, aby nedošlo ke kontaktu mezi dveřmi a stěnou.

Parametry použitých dveří:

- hmotnost interiérových dveří: $m = 24,7 \text{ kg}$
- šířka interiérových dveří: $L = 800 \text{ mm}$

Parametr vypočítaný z první části:

- úhlová rychlost ω : $\omega_2 = 79,95 \text{ deg/s} = 1,39 \text{ rad/s}$

Z následujícího vzorce je spočítán moment setrvačnosti J

$$J = \frac{1}{3} \cdot m \cdot L^2 = \frac{1}{3} \cdot 24,7 \cdot 0,8^2 = 5,27 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Ze spočteného momentu setrvačnosti a úhlové rychlosti byla vypočítána kinetická energie dveří. Tato kinetická energie je rovna energii, která musí být magnetickým systémem zcela akumulována, aby nedošlo ke kontaktu mezi dveřmi a stěnou.

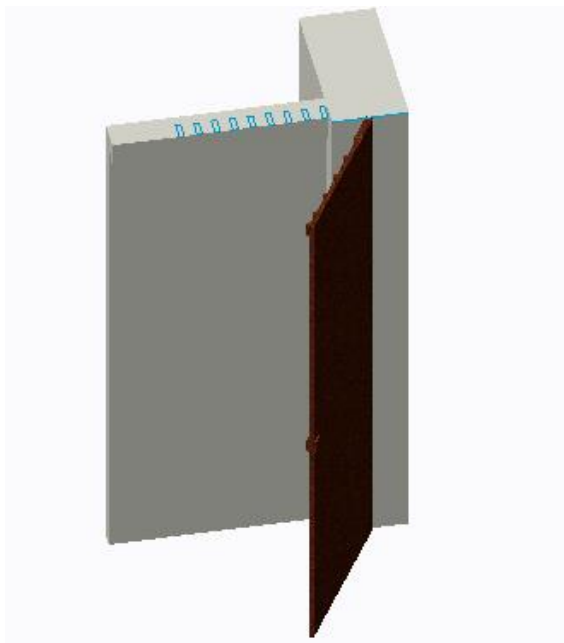
$$E_K = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot 5,27 \cdot 1,39^2 = 5,09 \text{ J}$$

Předpokládá se, že veškerá energie se akumuluje dveřní zarážkou.

Návrhu magnetické pružiny se silovou charakteristikou vykonávající při dovírání dveří práci rovnou kinetické energii se věnuje kapitola 5. Za předpokladu lineární pružiny by tuto energii akumulovala například mechanická pružina s tuhostí $K = 2,9$ N/mm se zdvihem $x = 60$ mm.

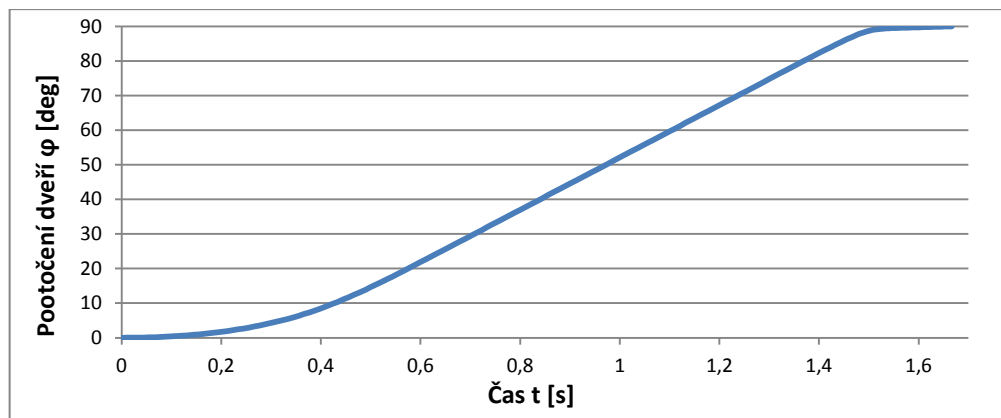
3.2. Dynamická analýza dveřního systému v programu Creo Parametric 3.0

V programu Creo Parametric byl vytvořen model dveřního systému. Tento model je zobrazen na obrázku 14. Model dveřního systému se skládá z dveřního křídla a části stěny místnosti. K nastavení tohoto modelu byly použity parametry uvedené v kapitole 3.1. Konstantní úhlové zrychlení ϵ bylo dosaženo pomocí servomotoru, který působil na zvoleném úseku, a také bylo dosaženo požadované úhlové rychlosti ω_1 . Dále byla v tomto modelu použita síla, která nahrazovala silovou charakteristiku magnetické zarážky. Do této síly byl dosazován průběh magnetické síly, získaný ze simulace magnetického pole z kapitoly 5. Rozměry dveří a jejich hmotnost odpovídaly skutečným dveřím, na nichž bylo provedeno měření. Na základě dosažení hodnot získaných ze simulace magnetického pole bylo zjištěno, že průběh magnetické síly zarážky dveří, splňuje požadavek na akumulaci kinetické energie.

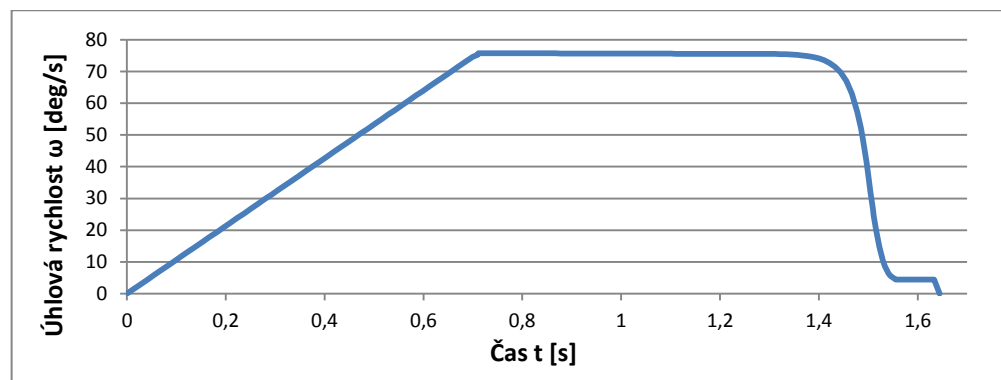


Obrázek 14: Model dveřního systému v programu PTC Creo Parametric 3.0

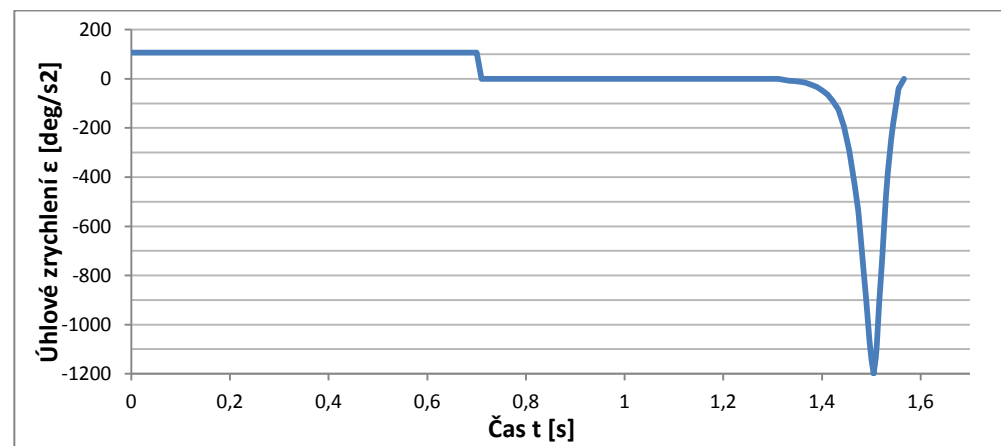
Na obrázcích 15, 16 a 17 jsou v závislosti na čase t zobrazeny výsledné průběhy pootočení dveří, úhlové rychlosti a úhlového zrychlení výsledné magnetické zářky při otevírání dveří a následného zastavení zářkou. Na těchto obrázcích je dobře patrné kdy na dveře působeno silou, kdy se volně otáčejí a kdy jsou zpomalovány zářkou. Na obrázku 16 je vidět jakou zbývající úhlovou rychlost ω mají dveře v okamžiku nárazu do magnetické zářky. Dveře v okamžiku nárazu mají zbývající úhlovou rychlost ω o velikosti 4,4 deg/s.



Obrázek 15: Natočení dveří φ v závislosti na čase t

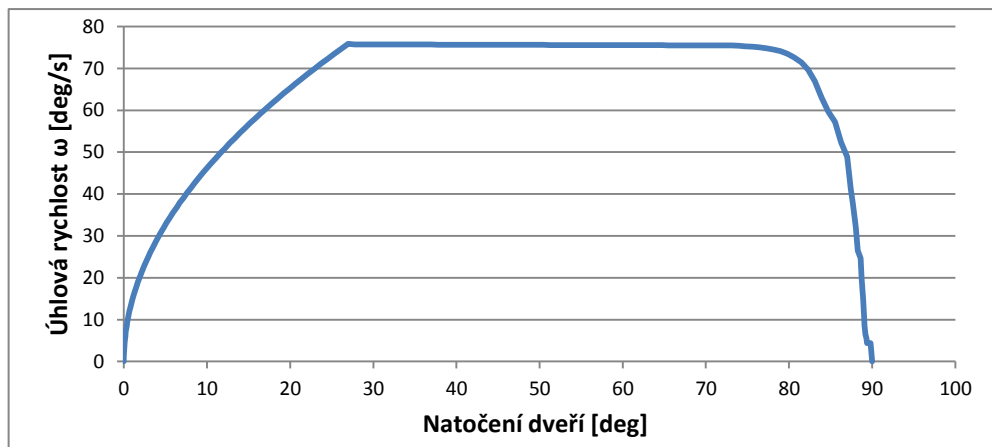


Obrázek 16: Průběh úhlové rychlosti ω při otevírání dveří v závislosti na čase t



Obrázek 17: Průběh úhlového zrychlení ϵ při otevírání dveří v závislosti na čase t

Na obrázku 18 je zobrazen výsledný průběh úhlové rychlosti při otevírání dveří v závislosti na pootočení dveří.



Obrázek 18: Průběh úhlové rychlosti ω při otevírání dveří v závislosti na jejich natočení.

Dále byly v tomto modelu vytvořeny dvě varianty, ve kterých bylo zkoumáno, zda a jakým způsobem je ovlivňována úhlová rychlost dveří při uvažování čepového tření v pantech nebo při zanedbání tohoto tření. Podle očekávání přidání koeficientu tření do rotační vazby dveřního dílu sníží úhlovou rychlost dveří. I přes nepatrný vliv bylo v dalších analýzách čepové tření ponecháno.

Ve vytvořeném modelu bylo dále ověřeno, zda různá poloha umístění magnetické zarážky nemá vliv na průběh zpomalování dveří. Tato simulace byla vyzkoušena na dvou různých vzdálenostech od osy otáčení dveří. Nejprve byla simulace provedena na vzdálenosti 450 mm od osy otáčení dveří, druhá simulace byla provedena s umístěním magnetické zarážky ve vzdálenosti 650 mm od osy otáčení dveří. Z provedených simulací bylo zjištěno, že poloha umístění magnetické zarážky nemá vliv na zpomalení dveří.

4. Model magnetického systému

Velikost a průběh magnetické síly ovlivňuje mnoho faktorů. Prvním podstatným faktorem je materiál magnetických prvků. Druhým faktorem, na kterém závisí průběh magnetických sil, je použitá geometrie a velikost magnetických prvků. Dalším faktorem, který ovlivňuje velikost a průběh působící síly, je tvar a materiál použitého pólového nástavce. Všechny tyto faktory ovlivňující průběh magnetické síly jsou popsány v následujících odstavcích.

Permanentní magnety se dnes vyrábí z různých materiálů. Nejsilnějšími komerčně používanými permanentními magnety v současné době jsou neodymové magnety. Neodymové magnety označované pod zkratkou NdFeB jsou směsí neodymu, železa a bóru. Tyto magnety nabízejí nejlepší poměr ve srovnání užitečných vlastností a ceny. Magnety tohoto typu jsou schopny unést více než tisícinásobek své vlastní váhy a jsou až desetkrát silnější než klasické feritové magnety. Neodymové magnety jsou magnety s největší hustotou energie (BH max). Snadno korodují, proto je potřeba provést povrchovou úpravu, a to nejčastěji niklováním, zinkováním nebo pryskyřicí. Neodymové magnety ve standardní třídě ztrácejí magnetické vlastnosti již při teplotě nad 80°C. V dnešní době jsou však již běžně dostupné neodymové permanentní magnety s pracovní teplotou přes 150°C.

Druhou skupinou magnetů jsou samariumkobaltové magnety, zkráceně SmCo. Magnetickou silou jsou podobné neodymovým magnetům, avšak proti neodymovým magnetům mají vyšší teplotní odolnost. Jsou odolné vůči korozi, takže nepotřebují další povrchovou úpravu. Jejich pořizovací cena je vyšší než u neodymových magnetů. Tyto magnety se dělí na dvě základní skupiny, a to podle poměru zastoupení samaria a kobaltu: na SmCo_5 a $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$.

Poslední skupinou permanentních magnetů jsou feritové magnety. Tyto magnety jsou nejlevnějšími permanentními magnety. Základ feritu tvoří směs oxidů železa s uhličitanem barnatým nebo stronnatým. Feritové magnety jsou odolné vůči korozi. Jejich magnetická síla je nižší než u magnetů NdFeB a SmCo. Jednotlivé druhy magnetů a jejich hustoty energií (BH max)[5] jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Vybrané typy magnetů s jejich hustotou energie BH max, dle[5]

Druh magnetu		Materiálové označení typu magnetu	Hustota energie BH (max) [MGOe]
NdFeB		N37	36 - 39
		N40	38 - 41
		N42	40 - 43
		N52	50 - 53
Feritový		F25	2,83 - 3,52
		F35	3,96 - 4,4
Samariumkobaltové	SmCo ₅	NMM - 24 - 1:5	22 - 24
	Sm ₂ Co ₁₇	NMM - 30 - 2:17	28 - 30

Dalším faktorem, který má vliv na velikost magnetické síly je materiál pólového nástavce. Nejvhodnějším materiálem pro použití na pólový nástavec je dle [6] ocel s označením 12 013. V tabulce 2 je vidět, že při použití běžné konstrukční oceli s označením 11 373 dojde ke snížení síly o 6 %, než při využití oceli 12 013.

Tabulka 2: Závislost síly na druhu materiálu, dle [6]

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

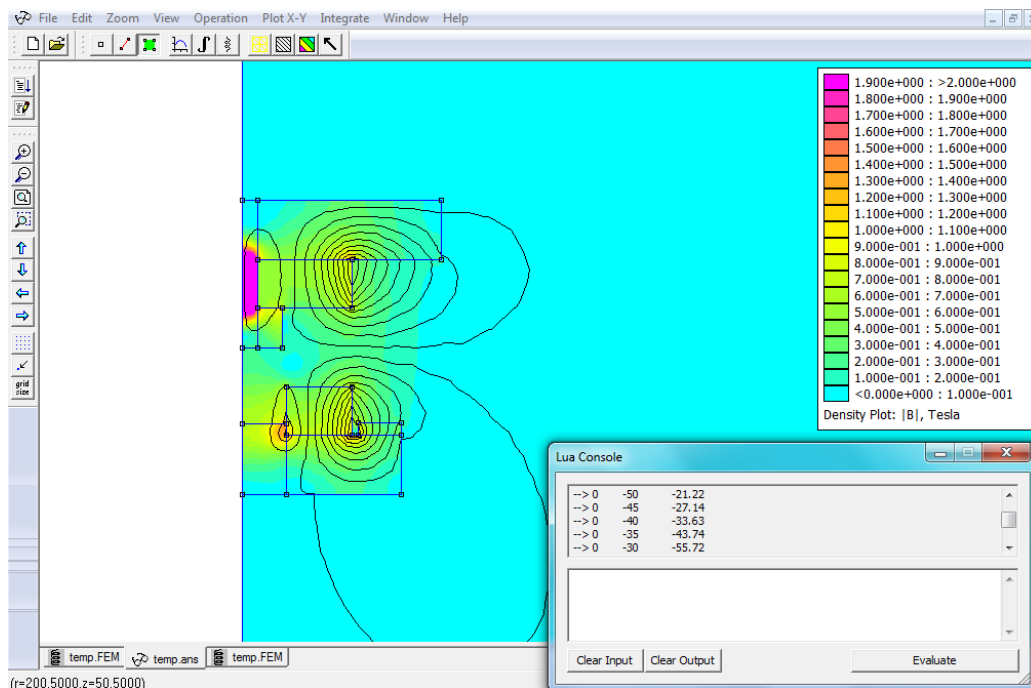
Pro získání výsledných hodnot ze stacionárního magnetického pole a s možností volby materiálových vlastností byl vytvořen model magnetické zarážky. Za účelem návrhu geometrie pólového nástavce a případné nové geometrie magnetů byla provedena kvazistatická analýza magnetického pole, jejíž výsledkem je závislost magnetické síly mezi statickými a posuvnými částmi zarážky a jejich vzdáleností. Při návrhu geometrie pólových nástavců bylo cílem dosáhnout požadovaného průběhu odpuzivých a přitažlivých sil.

První podmínkou bylo, aby výsledný průběh magnetické síly vyhovoval v následné kontrole při dynamické simulaci dveřního systému, tj. aby se v důsledku působení magnetické odpudivé síly dveře zastavily. Druhou podmínkou byla velikost přitažlivé síly, která byla nutná na přidržení dveří v otevřené poloze. Pro účely zjištění přídržné síly typické dveřní zarážky byla zakoupena dveřní pojistka popsaná v kapitole 2.2.4. Na této dveřní pojistce byla změřena síla, kterou tato zarážka zadržuje dveře v otevřené poloze. Velikost přídržné síly byla změřena siloměrem. Hodnota této přídržné síly je 63 N. Tato změřená síla byla brána jako výchozí přitažlivá síla.

4.1. Model v programu FEMM 4.2

Pro kvazistatickou analýzu magnetického pole byl vytvořen model v programu FEMM 4.2 [4]. Prostředí programu FEMM je zobrazeno na obrázku 19. Na tomto obrázku je též zobrazeno rozdělení magnetické zarážky na dvě části. V tomto případě horní část (pohybující se část) ilustruje části zarážky, které budou připevněny na dveřním křídle a spodní část (statická část) odpovídá částem upevněným na stěně místnosti. Z důvodů rotační symetrie magnetické zarážky byla tato analýza převedena na 2D axiálně symetrickou úlohu. Kvazistatická analýza magnetického pole se změnou parametru vzdálenosti posuvných a statických částí umožňuje získání silové charakteristiky v závislosti na vzdálenosti.

Hodnoty získané z této analýzy byly zpětně použity při dynamické analýze, kde bylo zjištěno, zda je daný průběh magnetických sil dostatečný či nikoliv. Průběh této analýzy začínal ve vzdálenosti 120 mm mezi magnety obou částí, kde při této vzdálenosti působila pouze zanedbatelná síla a pokračoval až do nulové vzdálenosti, kdy docházelo ke kontaktu mezi oběma částmi. Velikost kroku, kterým byly obě části magnetické zarážky k sobě přibližovány, závisel na jejich aktuální vzdálenosti. V různé vzdálenosti se změna síly liší, proto byla volena s ohledem na přírůstek síly různá velikost kroků. Ve vzdálenosti na intervalu <120;15> byl zvolen krok 5 mm, v intervalu <15;3> byla velikost kroku 1 mm, a na posledním intervalu <3;0> byl zvolen krok 0,1 mm.



Obrázek 19: Prostředí programu FEMM 4.2 s výslednou geometrií magnetické zarážky, dle [4]

Na obrázku 19 je zobrazena výsledná geometrie magnetů a pólových nástavců v určité vzdálenosti od kontaktu obou částí. Dále jsou zde vidět magnetické indukční čáry a velikost magnetické síly v aktuální vzdálenosti magnetů a pólových nástavců.

4.2 Materiálové vlastnosti

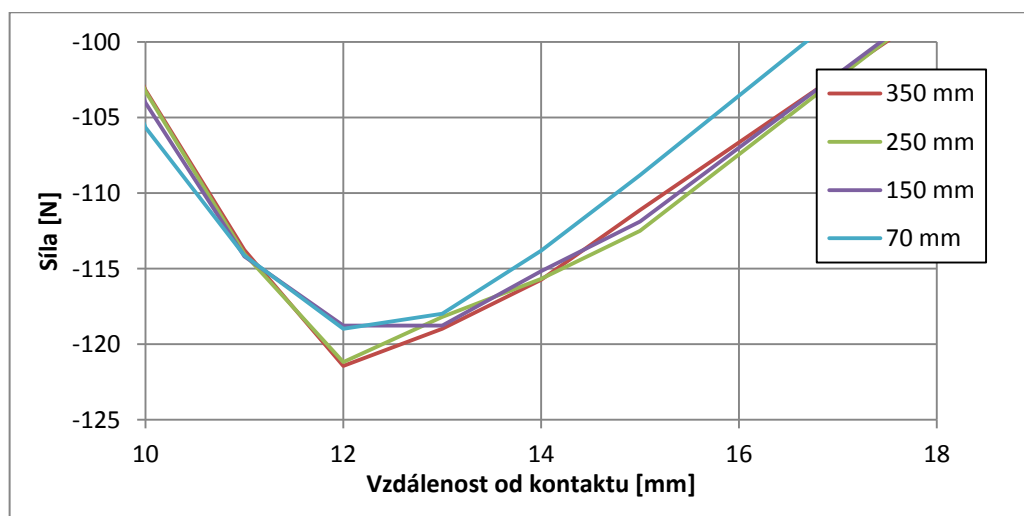
Magnetický systém je složen ze dvou magnetů, které jsou ze stejného magnetického materiálu NdFeB 42 MGOe. Původně byl požadován materiál NdFeB 52, ale tento materiál nebyl výrobce schopný dodat. Dále je tento systém složen ze dvou pólových nástavců a jednoho dřívku vyrobeného z oceli 11 373. Systém také obsahuje matici pro jednoduché nastavení výšky dorazu, vyrobenou z duralového materiálu. Další částí v systému je doraz vyrobený z polyamidu 6 sloužící jako bezpečnostní prvek, aby nedošlo ke kontaktu mezi magnety. Materiály matice a dorazu byly voleny tak, aby co nejméně ovlivňovaly průběh magnetické síly. Materiálové vlastnosti byly použity z knihovny FEMM [4] a Lexikonu technických materiálu [5]. V tabulce 3 jsou uvedeny hodnoty materiálových vlastností, které byly v analýze využity.

Tabulka 3: Materiálové vlastnosti použité v simulaci, dle [4,5]

	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

4.3 Okrajové podmínky

V programu FEMM byl zkoumán vliv velikosti okolí na průběh magnetické síly. Nedostatečná velikost okolí může mít negativní vliv a zkreslovat výsledky analýzy magnetického pole. Proto byly provedeny analýzy s různou velikostí okolí magnetického pole. Na obrázku 20 je zobrazen vliv velikosti prostředí o různých poloměrech na přitažlivou sílu. Z provedené analýzy je patrné, že okolí o poloměru 150 mm více ovlivňuje celkový průběh síly a tedy rozdíly mezi prostředím o poloměrech 150 mm a 250 mm jsou nezanedbatelné. Rozdíly mezi prostředím 250 mm a 350 mm jsou už zanedbatelné a proto bylo voleno prostředí jako koule o poloměru 350 mm a materiálem vzduch.



Obrázek 20: Vliv velikosti prostředí na maximum odpudivé síly.

5. Citlivostní analýza magnetického systému

Patříčnou úpravou geometrie původního pólového nástavce či úpravou geometrie magnetů, lze v koncové zdvihové části docílit změny smyslu magnetické síly, kdy se odpudivá síla přechýlí v sílu přitažlivou. Byly provedeny dvě citlivostní analýzy magnetického pole dvou magnetických systémů. První analýza byla provedena s původní geometrií magnetů. V této analýze se měnila pouze geometrie původních pólových nástavců za účelem navýšení maxima odpudivé síly při zachování přechodu magnetické síly z odpudivé na přitažlivou. Ve druhé analýze byla navrhována nová geometrie magnetů a nová geometrie pólových nástavců. Cílem této analýzy bylo navržení takového magnetického systému, který by splňoval dané požadavky na akumulaci energie a zachování přechodu magnetické síly. Analýza byla prováděna v programu FEMM jako kvazistatická úloha. V případě navrhování nové geometrie magnetů bylo nutné zachovat následující podmínky. První podmínkou bylo zachování přechodu magnetické síly z odpudivé na přitažlivou sílu. Dále velikost přitažlivé síly a dosažení co největší odpudivé síly.

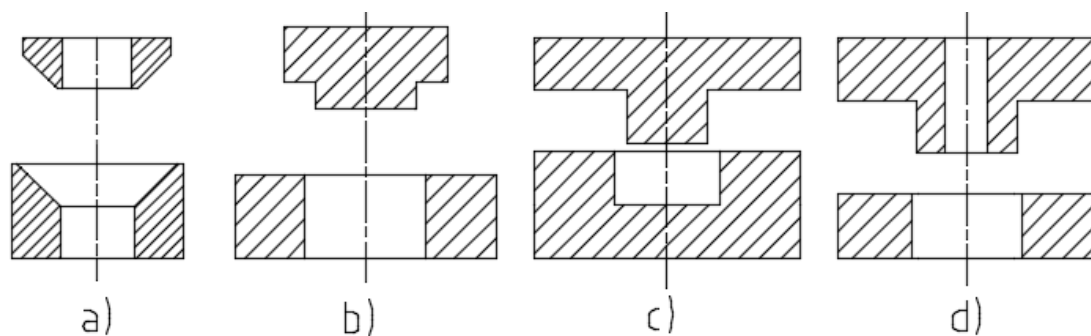
5.1 Citlivostní analýza původních kuželových magnetů

Nejdříve byly v této práci zkoušeny původní kuželové magnety zobrazené na obrázku 21 jako varianta a). Tyto magnety už byly na katedře textilních a jednoúčelových strojů využity u magnetického akumulátoru na rozváděcí tyči. U této geometrie magnetů byl průběh sil, ve kterém docházelo v určité vzdálenosti k přechodu z odpudivé síly na sílu přitažlivou. Maximum odpudivé síly bylo nedostatečné, proto byly pro zvýšení velikosti působící magnetické síly přidávány pólové nástavce. Následnou optimalizací geometrie pólových nástavců bylo dosaženo zvětšení velikosti průběhu sil v kvazistatické analýze. Získané hodnoty z této analýzy byly zpětně zadány do dynamické simulace. Na základě získaných údajů z provedených analýz a simulací bylo zjištěno, že magnety s touto geometrií nesplňují dané požadavky na akumulaci veškeré kinetické energie. Tento problém by se dal vyřešit tím, že by se navýšil počet magnetických systémů použitých na dveřích.

Proto byly navrženy další geometrie magnetů, které by dané požadavky na akumulaci kinetické energie splňovali při použití jednoho magnetického systému. Nakonec byl navržen nový válcovitý tvar toroidního² typu, který by splňoval dané požadavky.

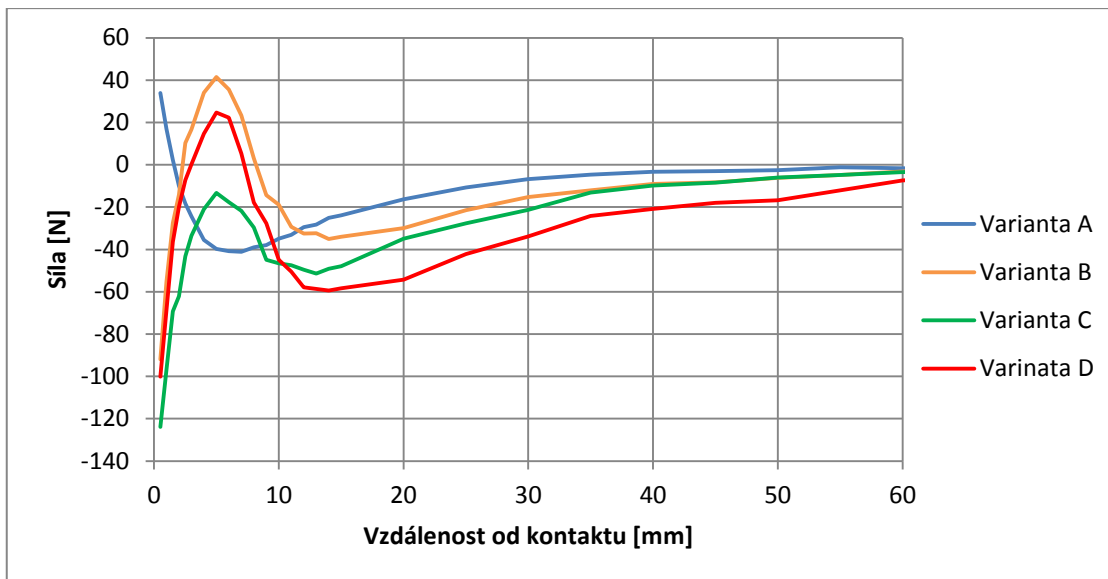
5.2 Analýza různých geometrií magnetů.

Při navrhování a zkoušení různých geometrií magnetů, byla uplatňována experimentální metoda. Bylo navrženo několik válcových geometrií magnetů, které se dále postupně zkoumali v citlivostní analýze v programu FEMM. Z navržených magnetů na základě získaných dat byly vybrány složené válcové magnety toroidního typu. Příklady různých řešení geometrie navržených magnetů jsou ukázány na obrázku 21. Jejich průběhy magnetických sil jsou pak zobrazeny na obrázku 22.



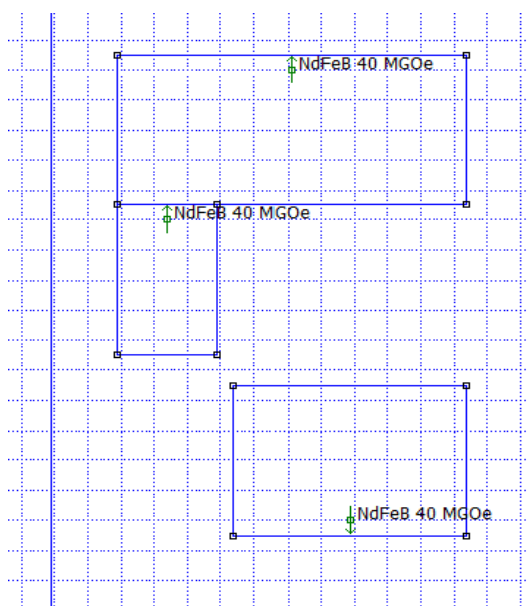
Obrázek 21: Variantní řešení geometrie magnetů: a) původní kuželová geometrie, b) a c) navrhovaná geometrie, d) vybraná geometrie

² Toroid = těleso v prostoru získané rotací uzavřené rovinné křivky okolo osy ležící v rovině křivky



Obrázek 22: Průběh magnetických sil různých geometrií magnetů.

Nově navržená geometrie byla jednodušší než původní geometrie magnetů. Díky těmto jednoduchým válcovým magnetům zde byla možnost určité variability. To znamená, že složením více či méně magnetů stejné válcové geometrie je získán skokově jiný průběh magnetické síly. Zvolená geometrie magnetů je zobrazena na obrázku 23, na kterém je vidět výsledná geometrie jednotlivých válcových toroidních magnetů. Šipky na tomto obrázku ukazují polarizaci jednotlivých magnetů, čímž je vidět jakou magnetickou silou na sebe magnety působí.



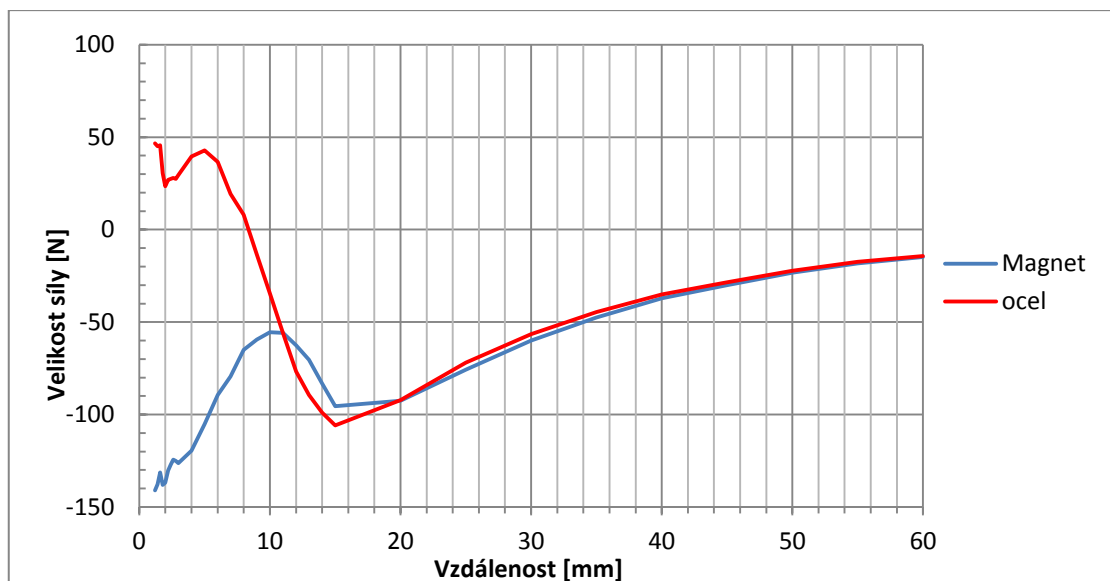
Obrázek 23: Zvolená geometrie magnetů (varianta d)

Při této geometrii dochází ke dvěma přechýlením magnetických sil. Nejdříve při přibližování působí odpudivá magnetická síla, která se ve vzdálenosti 8 mm od kontaktu přechyluje v přitažlivou magnetickou sílu. Ke druhému přechodu magnetických sil dochází ve vzdálenosti 3 mm od kontaktu, zde opět začíná převyšovat odpudivá magnetická síla, která působí až do nulové vzdálenosti mezi magnety. Na obrázku 20 je znázorněn průběh magnetické síly vybrané geometrie magnetů (varianta d).

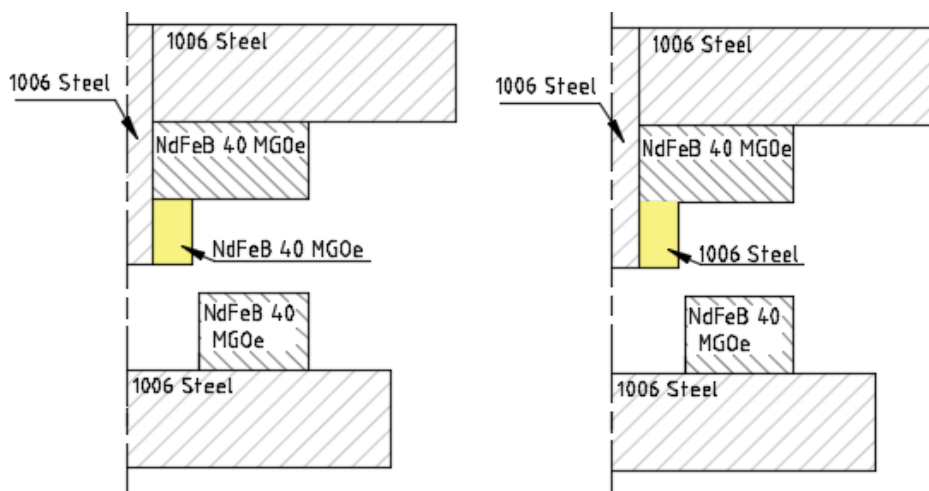
Cílem při navrhování nových pólových nástavců a optimalizaci geometrie magnetů bylo odstranění nežádoucího druhého přechýlení magnetických sil. Dalším cílem bylo zvětšení maximální odpudivé síly při zachování přitažlivé síly. Možnosti při navrhování nových tvarů pólových nástavců byly téměř neomezené, avšak byla snaha o zachování kompaktních tvarů s ohledem na konstrukční řešení magnetické zarážky.

Proto bylo dalším postupem práce navrhování pólových nástavců na zvolenou geometrii magnetů. Nejdříve byly navrženy jednoduché pólové nástavce, které byly umístěny za magnety a jeden pólový nástavec byl navržen tak aby vyplnil prázdňou část uvnitř zvoleného magnetu.

Pokračováním úprav geometrie a velikosti jednotlivých válcových magnetů bylo zjištěno, že při nahrazení jednoho určitého válcového magnetu pólovým nástavcem totožného tvaru a velikosti, dochází ve vzdálenosti 11 mm k velké změně průběhu magnetických sil, kde při použití pólového nástavce dojde k přechodu a udržení ve stavu přitažlivých sil. Tento stav je ukázán na obrázku 24. Záměna pólového nástavce za vybraný magnet je pak zobrazena na obrázku 25.



Obrázek 24: Změna průběhu magnetické síly při nahrazení určitého magnetu pólovým nástavcem z oceli



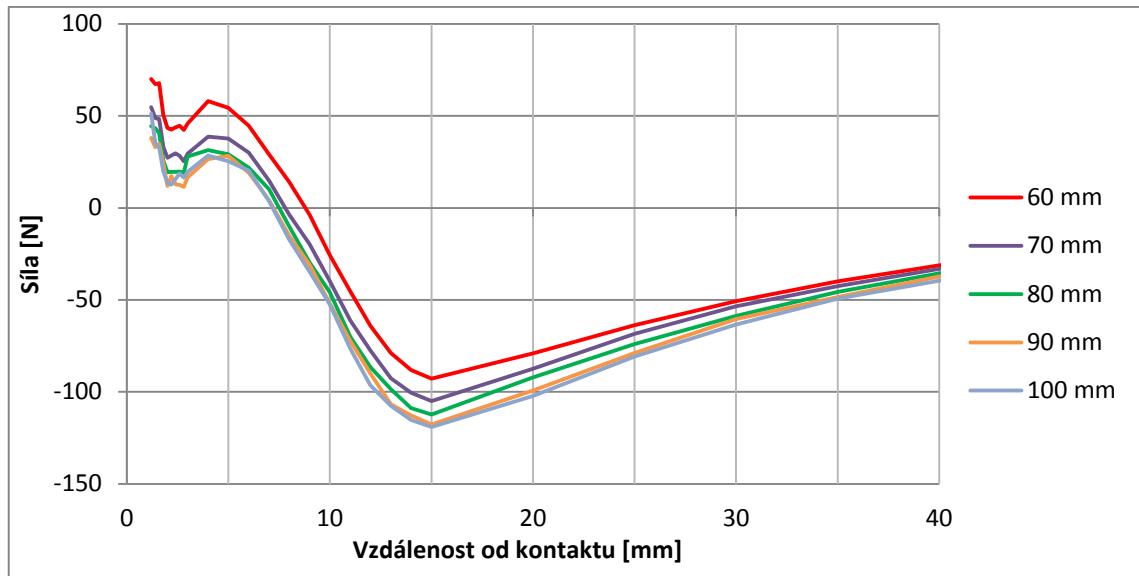
Obrázek 25: Nahrazení určitého magnetu pólovým nástavcem z oceli

Nakonec byla navržena dvojice válcových magnetů toroidního typu. První magnet byl navržen o rozměrech $\varnothing 55 \times 8 \times 12$ mm a druhý magnet o rozměrech $\varnothing 55 \times 22 \times 12$ mm.

5.3 Návrh pólového nástavce

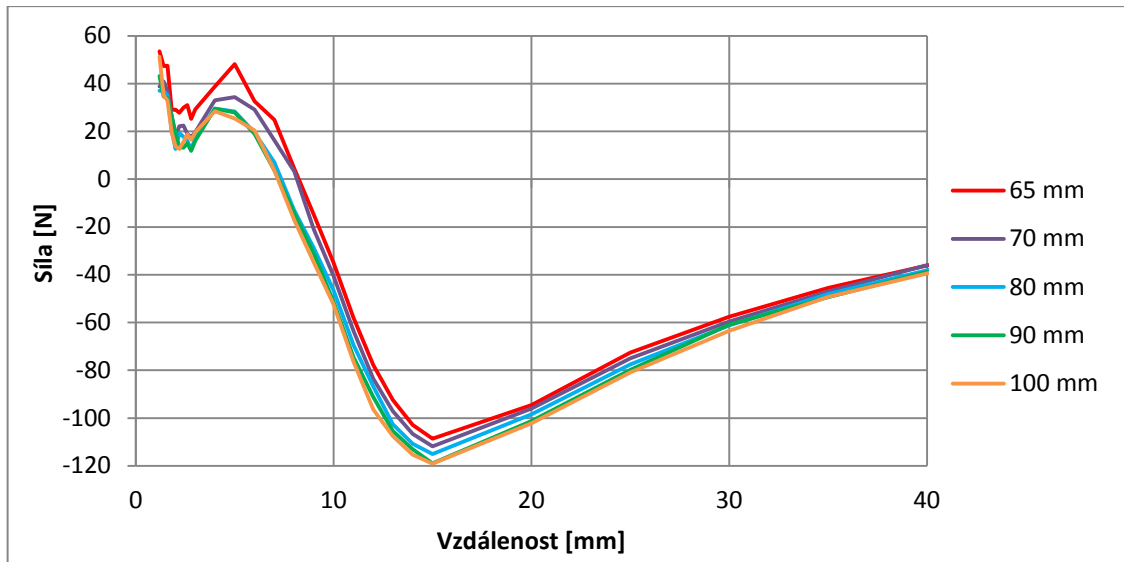
Při návrhu pólových nástavců je prvním krokem navržení jednoduchého válcového tvaru. U pólových nástavců se měnila pouze výška a vnější průměr. Nejdříve je zkoumána výška pólových nástavců, která je volena v rozsahu $\langle 5; 20 \rangle$ mm při daném průměru 75 mm horního a průměru 65 mm u spodního pólového nástavce. Při výšce 5 mm je každý mm výšky významný, od výšky 7,5 mm narůstá maximální síla přibližně lineárně a to z hodnoty 105,5 N na hodnotu 108,8 N.

Další analýza pólových nástavců byla provedena při konstantní výšce 15 mm při změně vnějšího průměru pohybujícího se pólového nástavce <60;100>mm. U této analýzy docházelo ke značnému nárůstu síly, a to z hodnoty 92,8 N až na hodnotu 119,1 N. Tato analýza má vliv i na velikost přitažlivé síly. Analýza změny odpudivé síly v závislosti na změně průměru pólového nástavce je zobrazena na obrázku 26.



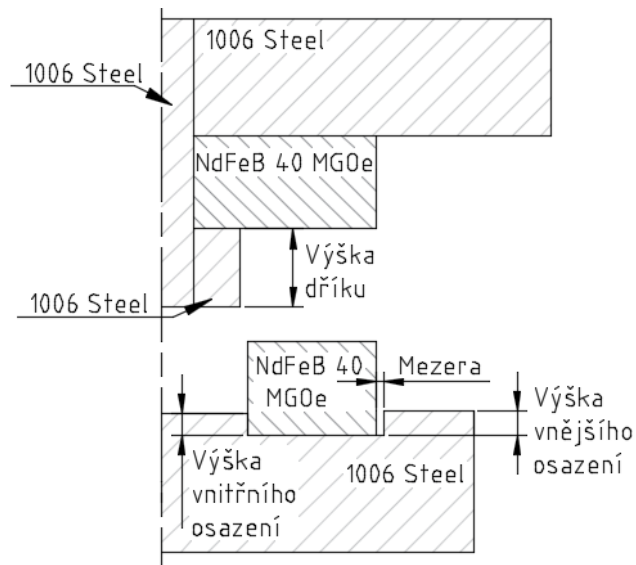
Obrázek 26: Průběh síly v závislosti na změně průměru pohybujícího se pólového nástavce

Při navrhování pólového nástavce u statického magnetu byla zvolena stejná výška jako u pohybujícího se pólového nástavce. Zde byla prováděna analýza v závislosti na vnějším průměru pólového nástavce. Vnější průměr byl analyzován v rozsahu <65;100>mm. V této analýze došlo k nárůstu odpudivé síly z hodnoty 108,6 N na hodnotu 119,1 N. Tyto změny průběhu magnetické síly jsou zobrazeny na obrázku 27.



Obrázek 27: Průběh síly v závislosti na průměru statického pólového nástavce

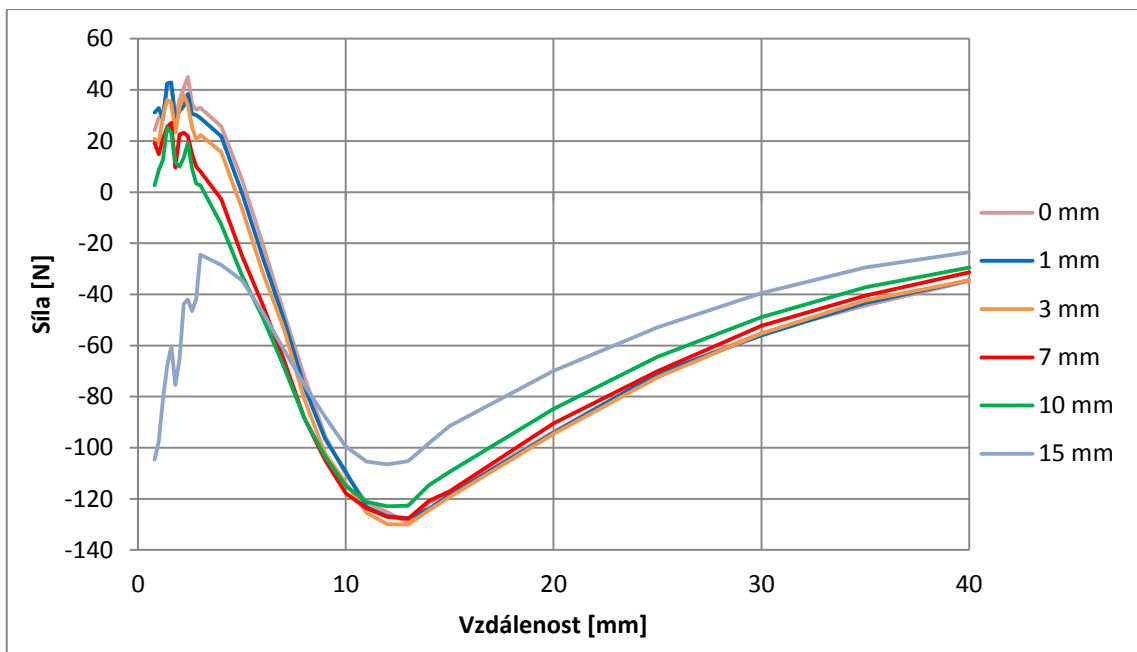
Dalším krokem při návrhu pólových nástavců bylo navržení osazení na vnitřní a vnější části spodního pólového nástavce. Nejdříve byl zkoumán vliv vnějšího osazení na průběh magnetických sil. Navržené osazení je znázorněno na obrázku 28.



Obrázek 28: Navržené osazení na statickém pólovém nástavci

U tohoto osazení byla provedena analýza na výšce vnějšího osazení a velikosti mezery mezi statickým magnetem a vnějším osazením. V první části se analýza zabývá tím, jaký vliv má výška osazení na průběh magnetických sil. Výška osazení byla volena v rozsahu $<0;15>$ mm. Z analýzy bylo zpozorováno, že odpudivá síla mírně naroste při výšce osazení 1-3 mm. Při větší výšce osazení průběh odpudivé síly slábne, a to nezanedbatelným způsobem, stejně tak slábne i velikost přitažlivé síly.

Při velké výšce osazení nedochází k přechodu, a tedy ani k žádné přitažlivé síle. Na obrázku 29 je vidět průběh této analýzy. Z tohoto průběhu je vidět, že odpudivá síla nyní dosahuje velikosti 130,1 N a to při výšce vnějšího osazení 3 mm. Ve druhé části analýzy je zkoumáno, zda a jak velikost mezery mezi vnějším osazením a magnetem ovlivňuje průběh magnetické síly. Analýza byla prováděna v rozsahu <0,05;5> mm. Z analýzy bylo zjištěno, že velikost mezery nemá vliv na průběh magnetické síly. S ohledem na výrobu a instalaci magnetů byla zvolena mezera o velikosti 0,75 mm.

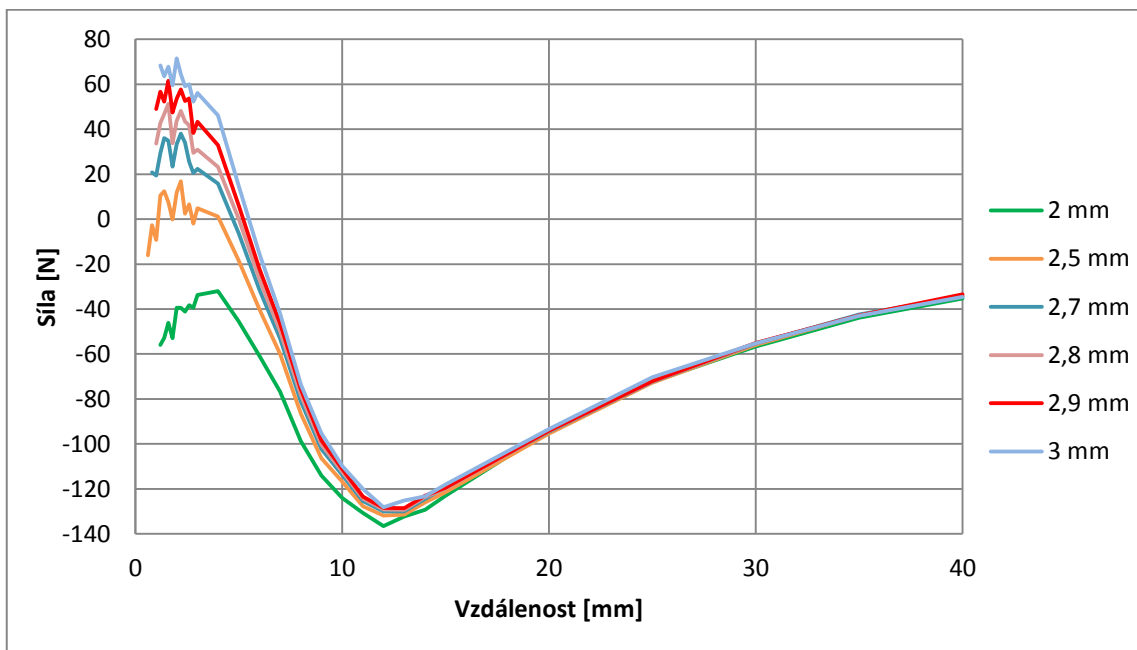


Obrázek 29: Závislost průběhu sil na výšce vnějšího osazení

V dalším navrhování pólového nástavce je snaha dosáhnout požadované přitažlivé síly, při zachování průběhu a velikosti odpudivé síly i zachování vzdálenosti od kontaktu, kde dochází k přechodu z odpudivé na přitažlivou sílu. Požadovaná přitažlivá síla byla změřena na zakoupené dveřní zarážce s naměřenou hodnotou 63 N. Tato hodnota se jevila jako nadbytečná, proto byla požadovaná síla zmenšena na hodnotu přibližně 35 N.

Další analýza byla provedena na výšce dřívku pohybujícího pólového nástavce a vnitřního osazení na statickém pólovém nástavci. Šlo nám o otázku, zda na těchto výškách závisí velikost přitažlivé síly, vzdálenost přechodu a zda vůbec dojde k přechodu z odpudivé na přitažlivou sílu.

Výška dříku byla na začátku zvolena na 10 mm, poté byla provedena analýza, kdy se měnila výška vnitřního osazení v rozsahu <0;5> mm. Tato analýza se ukázala jako nejcitlivější. Výsledky z této analýzy jsou zobrazeny na obrázku 30. Z této analýzy bylo zjištěno, že změna výšky má zásadní vliv na přitažlivou sílu a její přechod, ale na odpudivou sílu podstatný vliv nemá. Z výsledků je patrné, že požadované přitažlivé síly je dosaženo při výšce vnitřního osazení 2,8 mm. Touto výškou je zajištěna přitažlivá síla v rozmezí od 23,3 N do 51,3 N. Tento rozsah zajišťuje možnou nastavitelnost přitažlivé síly.



Obrázek 30: Závislost přitažlivé síly na výšce vnitřního osazení na statickém pólovém nástavci.

V této analýze bylo také zkoumáno, zda má na průběh magnetických sil vliv případné rozdělení jednoho magnetu o výšce 12 mm na tři stejné magnety o jednotlivé výšce 4 mm. Z provedené analýzy bylo zjištěno, že pokud je geometrie magnetu rozdělena do více částí, kdy je celková geometrie menších magnetů totožná s původní geometrií magnetu, je i průběh magnetických sil totožný.

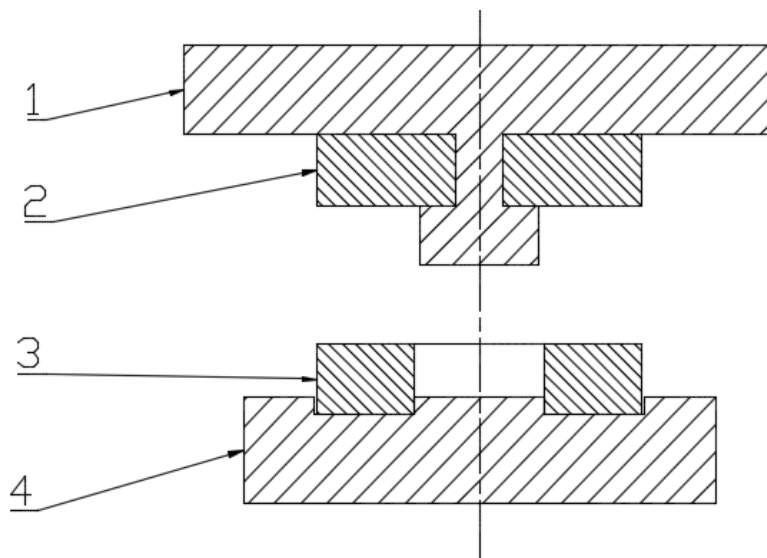
5.4 Výsledná geometrie pólových nástavců

Z provedené magnetické analýzy v programu FEMM 4.2 byla navržena výsledná geometrie pólových nástavců magnetické zarážky. Tato výsledná geometrie je znázorněna na obrázku 31.

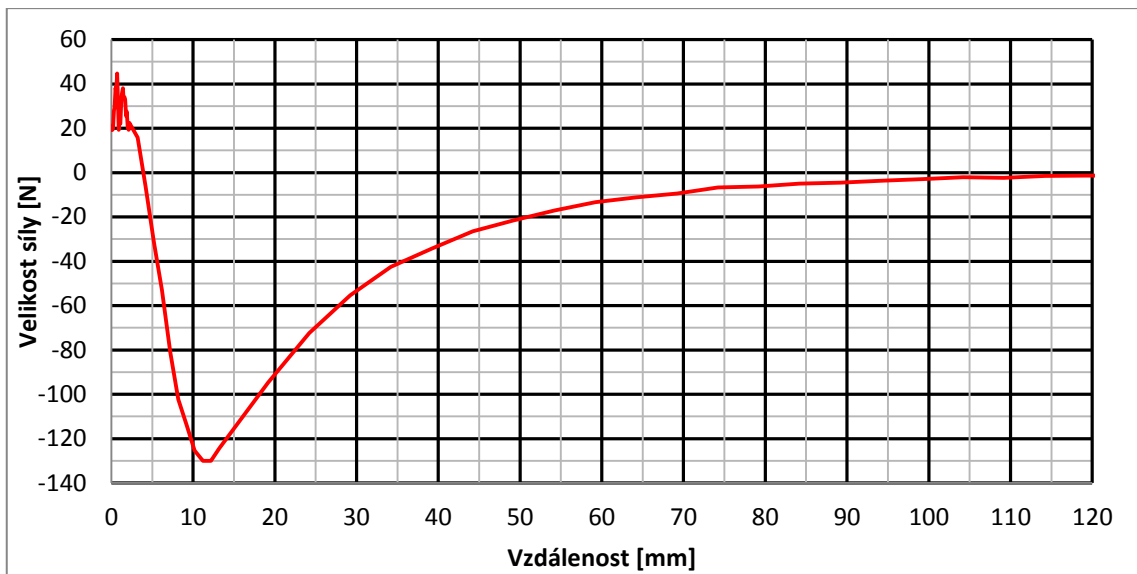
U pohybující se části magnetické zarážky je navržen magnet 2 o rozměrech 55x8x12 mm, k němu je citlivostní analýzou navržen pólový nástavec 1 o průměru 100 mm a výšce 15 mm. Pólový nástavec se navíc skládá z dříku, který vyplňuje mezikruží magnetu a dále se skládá z hlavy o průměru 20 mm a výšce 10 mm.

U nepohybující se části magnetické zarážky je k navrženému magnetu 3 o rozměrech 55x22x12 mm navržen pólový nástavec 4 o průměru 80 mm s výškou 15 mm. Dále jsou na tomto nástavci navržena dvě osazení. U vnitřního osazení je výška 2,8 mm a průměr 22 mm. Vnitřní průměr vnějšího osazení je 56,5 mm s výškou 3 mm.

Při kvazistatické analýze s výslednými magnety a pólovými nástavci dochází k maximální odpudivé síle 130,1 N ve vzdálenosti 13 mm. Přechýlení magnetické síly nastává ve vzdálenosti 4 mm od kontaktu. Hodnoty přitažlivé síly se pohybují v rozsahu od 23,3 N do 51,3 N a působí ve vzdálenosti od 4 mm až po kontakt. Tento průběh je zobrazen na obrázku 32. Hodnota práce magnetické odpudivé síly získaná numerickou integrací průběhu síly je 4,81 J.



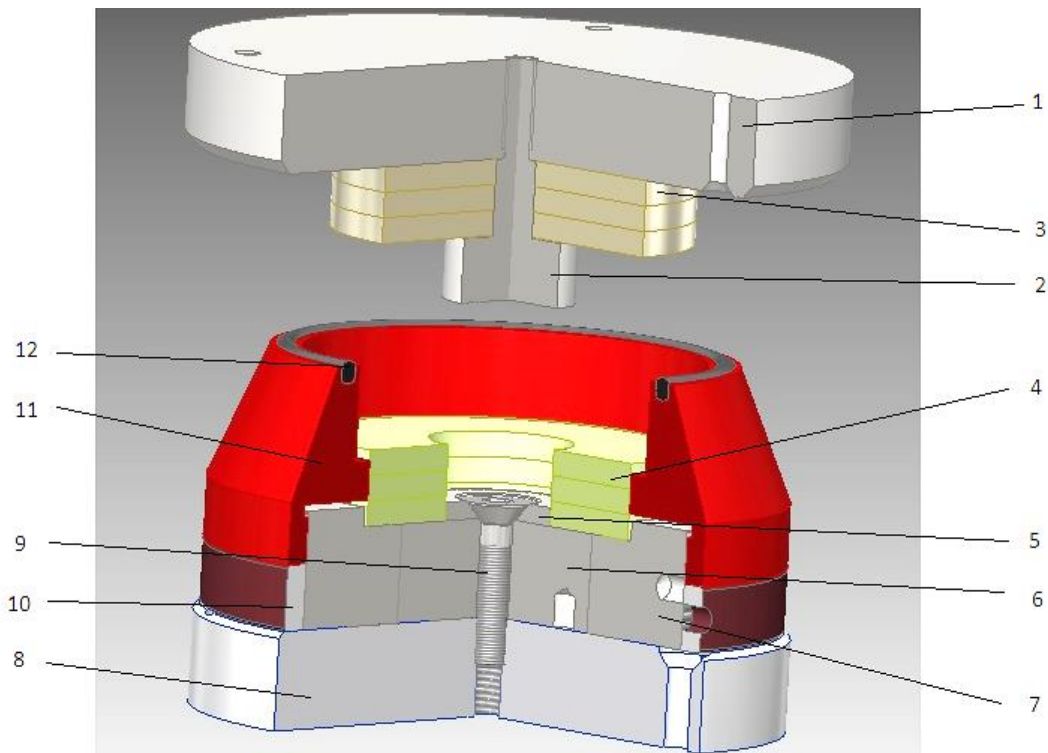
Obrázek 31: Výsledná geometrie navržených magnetů a pólových nástavců



Obrázek 32: Výsledný průběh magnetické síly v závislosti na vzdálenosti od kontaktu

6. Konstrukční zpracování magnetické zarážky

Z předešlých kapitol byly získány potřebné rozměry magnetů a rozměry pólových nástavců. V této kapitole byly tyto prvky konstrukčně zpracovány s ohledem na montáž a demontáž zarážky a také její připevnění na dvevní křídlo a stěnu. Na obrázku 33 je znázorněn model sestavy magnetické zarážky ve finálním provedení. Výkres sestavy je uveden v příloze A této práce. Model se skládá z pohyblivé části, tj. části připevněné na dvevní křídlo, a statické části připevněné na stěnu.



Obrázek 33: Konstrukční řešení magnetické zarážky

Pohyblivá část se skládá z pólového nástavce a sady magnetických disků. Výsledný pólový nástavec ze simulace magnetického pole (položka 1 na obrázku 31) byl z montážních důvodů rozdělen na dvě části, díly 1 a 2. Permanentní magnet pohyblivé části je potom sestaven ze tří magnetických disků, díl 3. Pólový nástavec 1 je válec o průměru 100 mm a výšce 15 mm. Tento pólový nástavec slouží ke zvýšení magnetické síly a jako upínací prvek na požadované dveře. Dřík 2 potom zajišťuje středění magnetických disků 3 a jejich připevnění k pólovému nástavci 1, resp. ke dveřím.

U spodní části magnetické zarážky je z důvodu montáže a případné demontáže magnetů rozdělen pólový nástavec (položka 4 na obrázku 31) na tři díly 5, 6 a 7. Díly 6 a 7 jsou vzájemně spojeny závitem, který umožňuje plynulé uložení soustavy magnetů 4. Pólový nástavec 7 je osazen závitem i na vnějším průměru, z důvodů přišroubování dorazu 11 a matice 10. Magnety 4 vystřeďuje podložka 5. Tato sestava je přišroubována šroubkem M6 k upínacímu prvku 8. Tento prvek byl vyroben z duralového materiálu z důvodů minimálního ovlivnění magnetických sil. Duralový prvek nám dále slouží k uchycení statické části magnetické zarážky na stěnu místnosti.

Pro křehkost magnetů a možnost jejich poškození byl navržen doraz 11, který je vyroben z polyamidu, z důvodů neovlivňování magnetické síly. Na čele tohoto dorazu je vysoustružena drážka pro pryžový kroužek 12 pro snížení rázu a hluku při případném kontaktu obou částí.

Díky průběhu přitažlivé síly, který má narůstající charakteristiku, byl polyamidový doraz připevněn na pólový nástavec pomocí závitu, který umožňuje plynule nastavit výšku dorazu a tedy velikost přitažlivé síly. Toho je dosaženo použitím matice 10, která je umístěna mezi duralový upínací prvek 8 a doraz 11. Na vnitřní části matice je závit, díky kterému je možnost plynule a citlivě nastavit výšku dorazu magnetické zarážky. Tato matice je z důvodů co nejmenšího ovlivňování magnetické síly vyrobena z duralu.

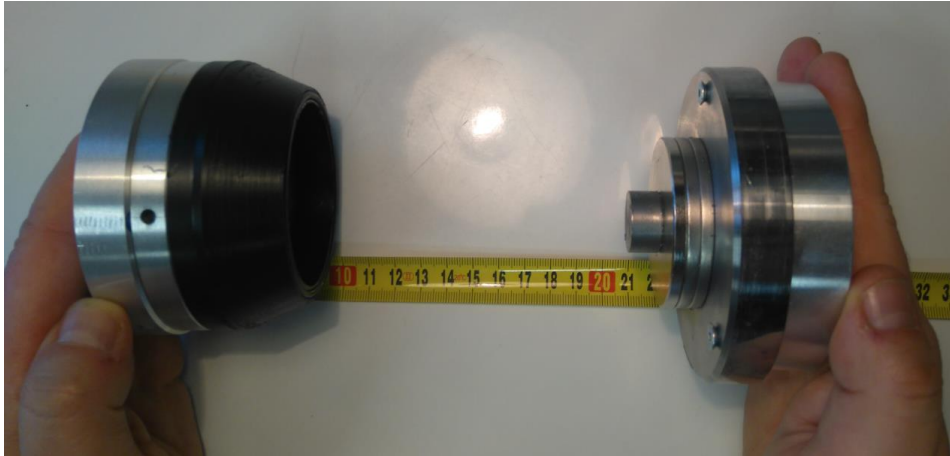
Následně bylo v této kapitole ověřeno, že při zavírajícím pohybu dveří nedojde mezi dříkem pohybující se části magnetické zarážky a magnetem na statické části zarážky ke kontaktu a následnému poškození. Z toho důvodu byla navržena mezera mezi dříkem a magnetem a to o velikosti 1 mm. Tato mezera dále dovoluje zanedbatelnou montážní nepřesnost.

6.1 Montáž a výroba

V této práci byl brán ohled i na cenovou dostupnost této magnetické zarážky. Jelikož byly navrženy magnety s unikátní geometrií, které nebyly dostupné u prodejců těchto materiálů, byla zajištěna výroba přesné geometrie. Z důvodu odběru minimálně pěti kusů, byly navržené magnety rozděleny na tři stejné části. Rozdělení těchto magnetů nemá výrazný vliv na průběh magnetické síly.

Magnety na sebe působí značnou magnetickou silou, z tohoto důvodu byl zkonstruován přípravek pro jednodušší a bezpečnější složení zejména statické části magnetické zarážky. Výkresová dokumentace přípravku je vložena v příloze B.

Vyrobený a složený funkční model magnetické zarážky je zobrazen na obrázku 34. Zobrazené části jsou ve vzdálenosti 120 mm, kdy dochází k výraznějšímu nárůstu odpudivé síly.



Obrázek 34: Magnetická zarážka v okamžiku kdy působí magnetická odpudivá síla.

Na obrázku 35 je zobrazena pohybující se část magnetické zarážky určená pro připevnění na horní část dvevního křídla. Statická část magnetické zarážky je zobrazena na obrázku 36. Na těchto obrázcích je dobře patrná i skutečná velikost rozměrů této zarážky.



Obrázek 35: Pohybující se část magnetické zarážky



Obrázek 36: Statická část magnetické zarážky

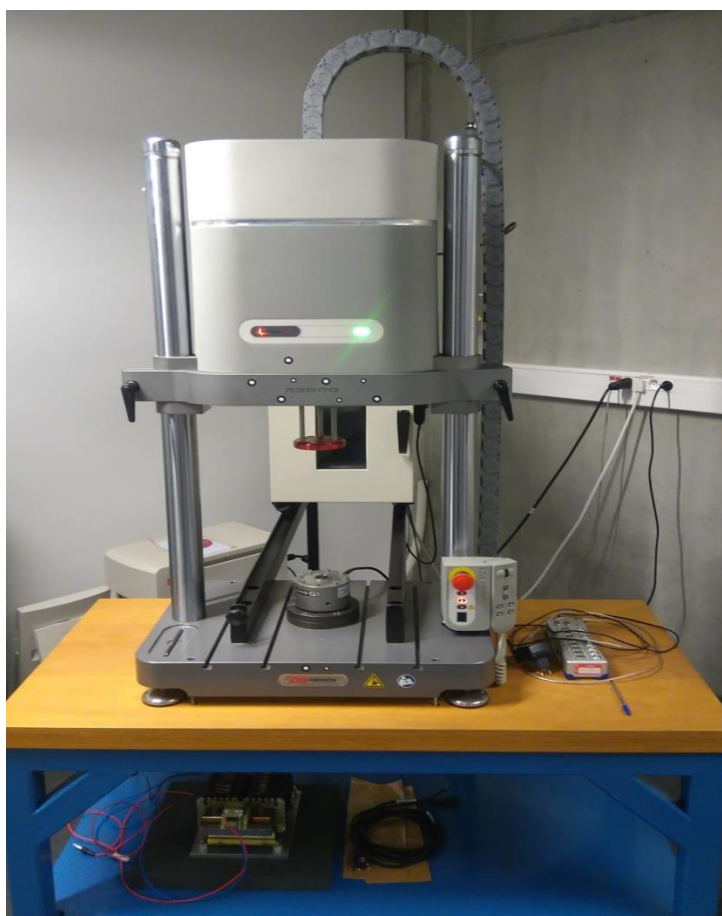
Na obrázku 37 je zobrazena zarážka v koncové poloze, kdy jsou pohybující se a statická část vzájemně přitahovány přitažlivou silou o velikosti 72,4 N



Obrázek 37: Magnetická zarážka v okamžiku působení přitažlivé magnetické síly

7. Měření síly magnetického systému

Pro ověření správnosti výsledků simulace, bylo provedeno měření. Průběh magnetické síly magnetické zarážky byl změřen na zařízení ElectroPuls E3000 dodávaném firmou Instron (viz obrázek 38) dostupném na pracovišti Katedry mechaniky, pružnosti a pevnosti Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci. Na tomto zařízení byl změřen skutečný průběh magnetických sil magnetické zarážky. Pro měření byly navrženy přípravky, které zajišťovaly správné připevnění konstrukčních prvků magnetické zarážky k měřicímu přístroji.



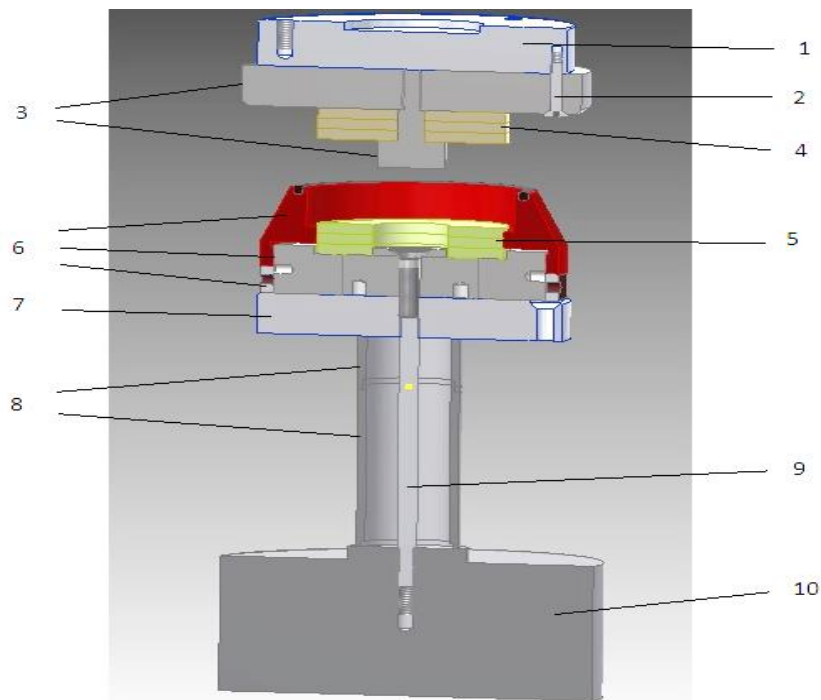
Obrázek 38: Měřicí zařízení ElectroPuls E3000 od firmy Instron

7.1. Konstrukční řešení přípravku pro měření.

Pro kvazistatické měření byly navrženy přípravky pro upevnění systému magnetické zarážky. Na obrázku 39 je zobrazena sestava s navrženým konstrukčním prvkem na upevnění magnetické zarážky k přístroji.

K horní pohyblivé části přístroje byl navrhnut upínací prvek 1, ke kterému byla pomocí tří šroubů M4 následně připevněna pohybující se část magnetického systému 3 a 4. Tento konstrukční prvek byl vyroben z duralového materiálu, aby co nejméně ovlivňoval průběh magnetické síly při měření.

Na spodní části je umístěna měřící hlava 10. K měřící hlavě je pomocí závitové tyče 9 připevněn universální upínací prvek 7. Tento konstrukční prvek je součástí statické části magnetické zarážky 6 a magnetů 5. Mezi měřící hlavu 10 a prvkem 7 jsou vloženy distanční prvky 8. Tyto prvky zajišťují tuhost a stabilitu spodní části magnetického systému při měření průběhu magnetické síly a vymezují přesný rozsah měření. Výkresová dokumentace přípravků je v příloze B této práce.



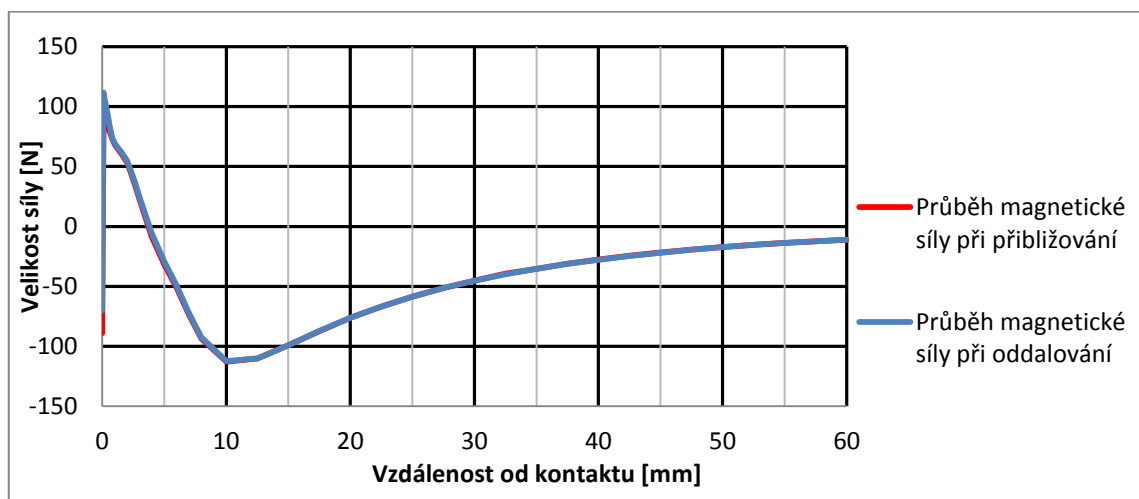
Obrázek 39: Konstrukční řešení pro měření

7.2. Experimentální měření

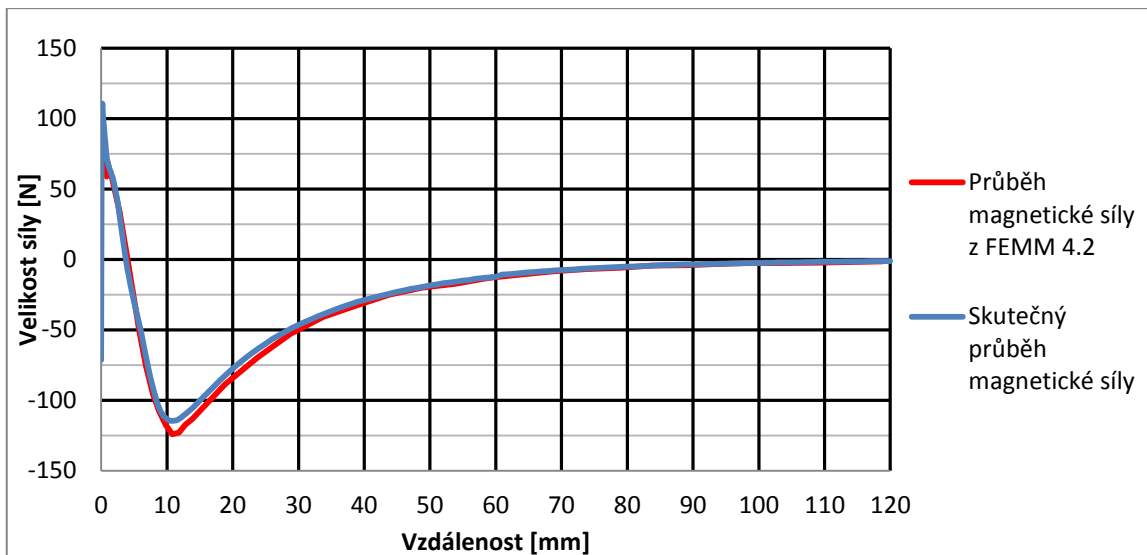
Měřicí přístroj umožňuje měřit se zdvihem maximálně 60 mm. Bylo zapotřebí toto měření rozdělit do dvou částí, protože průběh magnetické síly ve vzdálenosti 60 mm je stále značný, jak je vidět z průběhu magnetických sil, například na obrázku 32. V první části měření byl přístroj nastaven pro měření od kontaktu až po vzdálenost 60 mm. Následně se magnety přibližovaly.

Tento měřený cyklus se pětkrát opakoval. Působící síla byla měřena jak při oddalování, tak při přibližování. Pro porovnání s hodnotami získané z kvazistatické analýzy byla v měření volena dostatečně pomalá rychlost pohybu a to 2 mm/s. Při měření bylo zjištěno, že tento magnetický systém netrpí na hysterezi.

Ve druhé části měření bylo toto rozmezí posunuto na vzdálenost 60 - 120 mm od kontaktu. Počet měřících cyklů opakování a rychlost pohybu byla totožná jako u předchozí části měření. Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že na průběh a velikost sil nemá vliv, zdali se magnety k sobě přibližují či oddalují, tento stav je zobrazen na obrázku 40. Na obrázku 41 je zobrazen výsledný průběh magnetické síly při přibližování. Dále je zde pro porovnání zobrazen průběh magnetické síly získané ze simulace v programu FEMM 4.2. Z tohoto porovnání je dobře patrné, že hodnoty magnetické síly získané z analýzy v programu FEMM 4.2 dosahují nepatrně vyšších hodnot než skutečné hodnoty naměřené na přístroji E3000. Odchylka činí 7 % u průběhu odpudivé síly. U maxima přitažlivé síly působící při kontaktu byla naměřena hodnota 72,4 N. Ze simulace je získaná maximální přitažlivá síla 51,3 N působící v nulové vzdálenosti. Tato odchylka může být zapříčiněna vyvrtanými dírami v pólových nástavcích, které nejsou v simulačním modelu v programu FEMM 4.2 zakresleny, dále nepřesností výroby či chybou měření.



Obrázek 40: Průběh síly při přibližování a oddalování magnetů



Obrázek 41: Průběh sil magnetického systému

Závěr

Cílem práce byl konstrukční návrh modelu nové magnetické zarážky dveřových systémů. Navržená konstrukce byla založena na výsledcích provedené dynamické analýzy pohybu dveří při otevírání a na výsledcích analýzy magnetického pole zarážky s permanentními magnety. Navržená magnetická zarážka byla vyrobena a experimentálně prověřen průběh síly.

Předpokladem řešení bylo vytvoření modelu magnetické zarážky za použití stávajících kuželových magnetů případně navržení nové geometrie magnetů. Na základě provedené dynamické analýzy otevírání dveří bylo však zjištěno, že pro akumulování kinetické energie volně se otáčejících dveří by bylo nutné v případě kuželových magnetů využít vyššího počtu těchto akumulátorů pro analyzované dveře. Z tohoto důvodu bylo od původních magnetů upuštěno a byla navržena nová geometrie magnetů a pólových nástavců.

V analýze magnetického pole byly následně optimalizovány rozměry magnetických prvků, tak aby byly splněny požadavky jak na akumulaci energie, zachování přechýlení magnetické odpudivé a přitažlivé síly tak na dosažení požadované velikosti přitažlivé síly při kontaktu. Z této analýzy bylo zjištěno, že tato magnetická zarážka je schopna akumulovat energii 94,5 % kinetické energie otevíraných dveří. Dále bylo v průběhu síly dosaženo přechýlení magnetické síly ve vzdálenosti 4 mm od kontaktu a velikosti přitažlivé síly 39,3 N ve vzdálenosti 2,5 mm od kontaktu.

V rámci konstrukčního návrhu magnetické zarážky byla řešena montáž a demontáž jednotlivých dílů zarážky, fixace jednotlivých dílů magnetických prvků, způsob připevnění na stěnu a dveřní křídlo a možnost dalšího nastavování vzdálenosti dorazu.

Výsledky simulací analýzy magnetického pole byly v rámci této práce experimentálně ověřeny. Bylo provedeno měření působící síly magnetické zarážky při vzájemné změně vzdálenosti. Skutečný průběh magnetické síly přibližně odpovídal průběhu síly získané ze simulace. Průběh odpudivé magnetické síly z měření je menší o 7 % oproti výsledkům ze simulace.

Vzhledem k tomu, že tento rozdíl se vyskytuje shodně na téměř celém měřeném zdvihu, je způsoben pravděpodobně odlišným materiálovým složením dodaných permanentních magnetů oproti požadovaným.

Z časových důvodů nebylo provedeno experimentální ověření magnetické zarážky při otevírání dveří na dveřích. Testy funkčnosti vyrobené zarážky budou provedeny v rámci následujících prací. V návaznosti na výsledky získané při těchto testech lze očekávat další modifikace geometrie pro získání optimální silové charakteristiky. Magnetické prvky složené z více disků umožňují v tomto směru testy dalších variant bez nutnosti nákupu nových permanentních magnetů.

Literatura

- [1] Aerostatická, aerodynamická a magnetická ložiska [online]. Brno, 2008.
Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=647 [cit. 2016-01-02]
- [2] CAMPBELL, P.: *Permanent magnet materials and their application*. Cambridge [England]: Cambridge University Press, 1996. ISBN 0521566886.
- [3] FEROMAGNET: - *Neodymové magnety* [online].
Dostupné z: <http://www.feromagnet.cz> [cit. 2017-12-19].
- [4] Finite Element Method Magnetics [online].
Dostupné z: <http://www.femm.info/wiki/HomePage> [cit. 2017-12-18].
- [5] FÜRBAKER, I., MACEK, K., STEIDL, J. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: aktuální stav listopad - včetně 1. aktualizace* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 1998. ISBN 80-86229-02-5. [cit. 2017-12-18].
- [6] SINOMAG: -*Permanentní magnety-co je třeba vědět o magnetech* [online], [cit.2017-12-18].
Dostupné z: <http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/?c=o-magnetech-slovník>
- [7] SVOBODOVÁ, J. *Analýza magnetických akumulátorů kinetické energie*. 2016. Bakalářská práce. Technická univerzita Liberec.
- [8] TRIDELTA MAGNETSYSTEME: - *Permanent Magnetic Couplings and Brakesfor Drive Technology* [online]. [cit. 2017-12-18].
Dostupné z: <http://tridelta.de/viomatrix/imgs/download/kupplungen-bremsen-gb.pdf>
- [9] Úřad průmyslového vlastnictví [online]. [cit. 2017-12-18].
Dostupné z: <https://www.upv.cz/cs.html>
- [10] VALTERA, J. *Magnetický akumulátor kinetické energie v koncových polohách rozváděcího pohybu*. Liberec, 2013. 22s. ISSRN TUL - MPO17260 -13/15/CZ - CZ + Dopřádací stroje.

Seznam příloh

Příloha A – Výkresová dokumentace magnetické zarážky

Příloha B – Výkresová dokumentace přípravků na montáž a měření magnetické zarážky

Příloha C – CD