

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Optimalizace otevírací charakteristiky
čtečky čipových karet**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří MOUČEK**

Osobní číslo: **E15N0034P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Optimalizace otevírací charakteristiky čtečky čipových karet**

Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište stávající princip otevírání čtečky čipových karet. Seznamte se se všemi stávajícími komponenty (solenoid, mechanismus uzamčení).
2. Teoreticky popište funkci impulzního solenoidu. Určete hlavní parametry ovlivňující velikost síly při otevírání.
3. Optimalizujte otevírání čtečky čipové karty za účelem snížení otevíracího napětí (toleranční a kinematická analýza, materiály mechanismu uzamčení, tvar napěťového impulsu).
4. Výsledky optimalizace shrňte do matice a vyberte nejvhodnější variantu. Dále posuďte i ekonomickou stránku.
5. Navrženou variantu laboratorně ověřte.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

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

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Pavel Karban, Ph.D.**

Katedra teoretické elektrotechniky

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Hruška**


Amphenol-Tuchel Electronics GmbH

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na optimalizaci otevírací charakteristiky čtečky čipových karet. V první části práce jsou představeny komponenty čtečky, zejména elektromagnetický aktuátor. Další části práce popisují návrh nového aktuátoru na základě výsledků počítačových simulací, jeho výrobu a nakonec laboratorní testování.

Klíčová slova

Čtečka čipových karet, solenoid, aktuátor, kotva, elektromagnetické pole, optimalizace, statická charakteristika

Abstract

This diploma thesis solves an optimizing the opening characteristics of smart card reader. The components of the smart card reader are presented in the first part of the thesis, which includes the electromagnetic actuator in particular. Next parts of this work describe the proposal of the new actuator based on the computer simulation results, its production and finally the laboratory testing.

Key words

Smart card reader, solenoid, actuator, core, electromagnetic field, optimization, force stroke diagram

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 15.5.2017

Bc. Jiří Mouček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Pavlu Karbanovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Janu Hruškovi za cenné profesionální rady, připomínky, nápady a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	8
ÚVOD.....	9
1 POPIS STÁVAJÍCÍHO PRINCIPU OTEVÍRÁNÍ.....	10
1.1 ČTEČKA ČIPOVÝCH KARET.....	10
1.2 AKTUÁTOR.....	11
2 FUNKCE IMPULZNÍHO SOLENOIDU.....	14
2.1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ.....	14
2.2 MODEL MAGNETICKÉHO POLE.....	14
2.3 POPIS ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE.....	17
2.4 DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY.....	19
2.4.1 Popis matematického modelu.....	20
2.4.2 Zvolená implementace modelu.....	22
2.4.3 Zobrazení získaných výsledků.....	22
2.5 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ OTEVÍRACÍ CHARAKTERISTIKU.....	23
2.5.1 Magnetická síla.....	24
2.5.2 Síla pružiny.....	24
2.5.3 Tíhová síla.....	24
2.5.4 Třecí síla.....	25
3 OPTIMALIZACE.....	26
3.1 NÁVRHY ZMĚN PARAMETRŮ.....	26
3.1.1 Permeabilita.....	26
3.1.2 Změna rozměrů jha.....	27
3.1.3 Tvar zakončení kotvy.....	28
3.1.4 Změna délky zakončení kotvy.....	29
3.1.5 Změna délky kotvy.....	30
3.1.6 Tloušťka kotvy.....	31
3.2 VÝBĚR VHODNÉ VARIANTY.....	31
4 VÝROBA A TESTOVÁNÍ.....	35
4.1 VÝROBA.....	35
4.2 TESTOVÁNÍ.....	36
4.2.1 Měření statické charakteristiky.....	36
4.2.2 Měření odemykacího napětí čtečky.....	41
4.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....	41
5 ZÁVĚR.....	43
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	44
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	45
SEZNAM TABULEK.....	45
PŘÍLOHA.....	46

Seznam symbolů a zkratk

δ	Velikost vzduchové mezery (m)
μ	Permeabilita (Hm^{-1})
A	Vektorový magnetický potenciál (Wm^{-1})
J	Hustota elektrického proudu (Am^{-2})
I, i	Elektrický proud (A)
N	počet závitů (-)
U, u	napětí (V)
R	elektrický odpor (Ω)
P	výkon (W)
w_m	Objemová hustota energie magnetického pole (Jm^{-3})
W_m	Energie magnetického pole (J)
H	Intenzita magnetického pole (Am^{-1})
B	Magnetická indukce (T)
L	Indukčnost (H)
F	Síla (N)
Φ	Magnetický indukční tok (Wb)
l	Délka (m)
S	Obsah (m^2)
s	Dráha (m)
v	Rychlost (ms^{-1})
τ	Časová konstanta (s)
t	Čas (s)
K	Integrační konstanta
m	Hmotnost (kg)
MATLAB.....	Matrix Laboratory
G	Tíha tělesa (N)
f	Součinitel smykového tření (-)
g	Tíhové zrychlení (ms^{-2})

Úvod

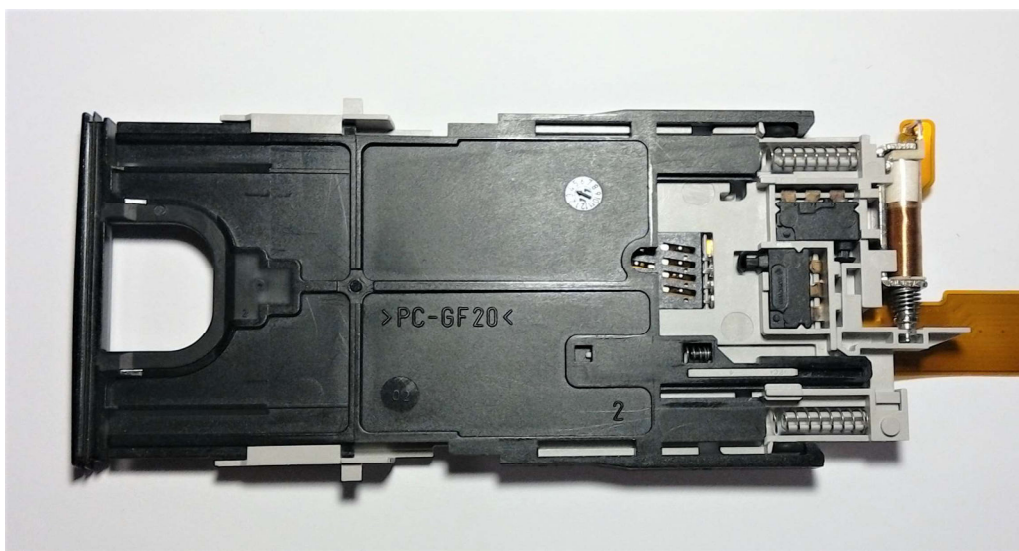
Předkládaná diplomová práce je zaměřena na optimalizaci otevírací charakteristiky čtečky čipových karet. Jedná se o výrobek společnosti Amphenol-Tuchel Electronics GmbH, která se kromě aplikací pro čipové karty zabývá také výrobou elektronických komponentů pro automobilový průmysl, mobilní zařízení, medicínu a podobně.

Čtečka je součástí digitálního tachografu, což je zařízení pro monitorování doby řízení řidiče vozidla a rychlosti vozidel a jejich následné zaznamenávání na čipovou kartu řidiče daného vozidla. Dle úmluvy AETR (Evropská dohoda o práci osádek vozidel v mezinárodní silniční dopravě) musí být digitální tachograf nainstalován ve všech vozidlech, jejichž hmotnost přesahuje 3,5 tuny [7].

Téma této diplomové práce bylo vypsáno za účelem zjištění možností optimalizace této čtečky z hlediska otevírací charakteristiky. Po domluvě s Ing. Janem Hruškou, který je zaměstnancem společnosti Amphenol a zároveň externím konzultantem této diplomové práce, bylo rozhodnuto, že se práce zaměří na možnosti optimalizace elektromagnetického aktuátoru, složeného ze solenoidu a jeho jádra, který je nezbytnou součástí mechanismu otevírání čtečky. Při zpracovávání této diplomové práce bylo nutné brát ohled na potřeby a možnosti firmy Amphenol, proto bylo nezbytné, aby byly veškeré postupy konzultovány a schvalovány s konzultantem zastupujícího společnost Amphenol.

1 Popis stávajícího principu otevírání

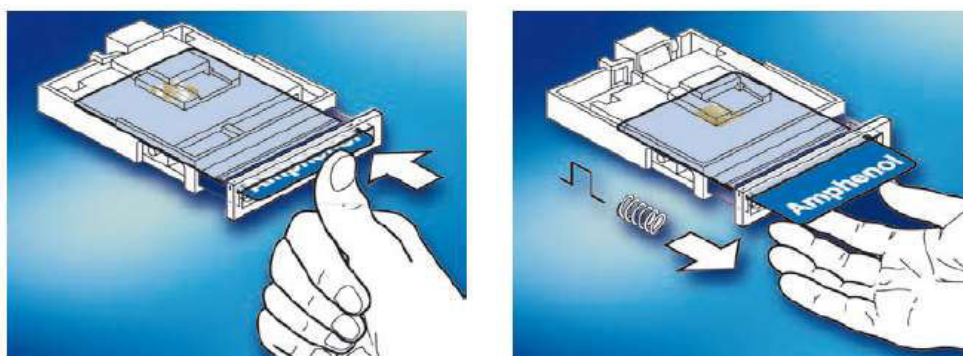
V této kapitole je popsán počáteční stav a princip otevíracího mechanismu čtečky čipových karet, kterou si lze prohlédnout na *Obr. 1.1*. Čtenář bude seznámen s komponenty čtečky, mimo jiné se solenoidem, hlavním předmětem optimalizace. Teoretickým rozбором solenoidu se následně zabývá kapitola 2.



Obr. 1.1: Čtečka čipových karet

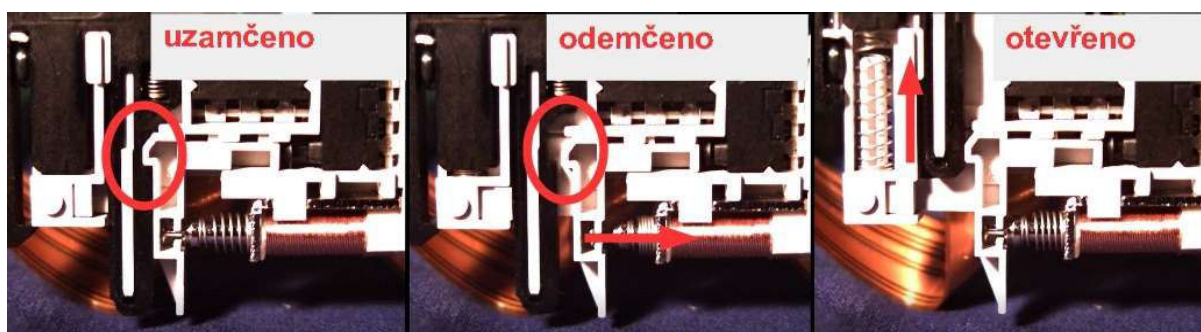
1.1 Čtečka čipových karet

Způsob, jakým probíhá manipulace s čipovou kartou ve čtečce (zasunování a vysunování), se nazývá pushmatic nebo také semi-automatický systém (*Obr. 1.2*). Jedná se o systém, při němž je čipová karta vsunována manuálně, zatímco vysunutí probíhá po ukončení transakce automaticky.



Obr. 1.2: Pushmatic – způsob manipulace s čipovou kartou, převzato z [3]

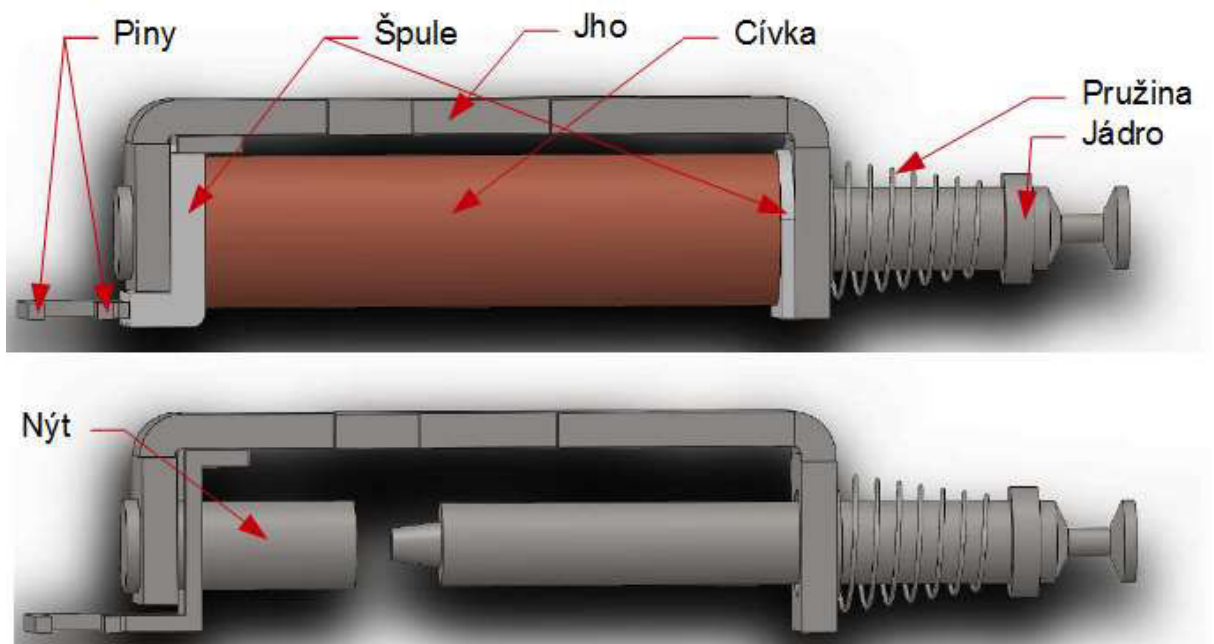
Automatická část je založena na vyvolání interakce magnetického pole solenoidu a jeho jádra, což způsobí zasunutí jádra do vnitřní části solenoidu. Díky mechanickému spojení jádra se zámkem otevíracího mechanismu čtečky dojde při zasunutí jádra k odemčení čtečky a následnému vysunutí čipové karty, které je zajištěno několika pružinami. Pro lepší pochopení je otevírací mechanismus zobrazen na *Obr. 1.3*, kde si lze prohlédnout 3 stavy procesu otevření čtečky. V 1. stavu je čtečka uzavřena. Ve 2. stavu prochází solenoidem stejnosměrný impulz, jádro solenoidu je zasunuto a dochází tedy k odemčení čtečky. 3. stav ukazuje samotné otevírání čtečky [3].



Obr. 1.3: Princip otevření čtečky, zleva 1., 2. a 3. stav

1.2 Aktuátor

Důležitou součástí otevíracího mechanismu a zároveň hlavním předmětem optimalizace je aktuátor využívající silové působení magnetického pole na feromagnetické jádro. Na *Obr 1.4* je model s popisem všech součástí, ze kterých se skládá stávající aktuátor. Jedná se o jádro, nazývané též kotvou, pružinu, jho, špuli, cívku, 2 piny a nýt. Ve výchozí poloze, tedy v poloze, kdy je čtečka čipových karet uzamčená (viz *Obr 1.3*), je vzduchová mezera mezi jádrem a nýtem 2,2 mm. Pro odemčení čtečky je na piny přiveden 20ms napěťový pulz o amplitudě 5 V. Následným silovým působením vzniklého magnetického pole na feromagnetické jádro dochází k zasunutí jádra do solenoidu a k odemčení čtečky.



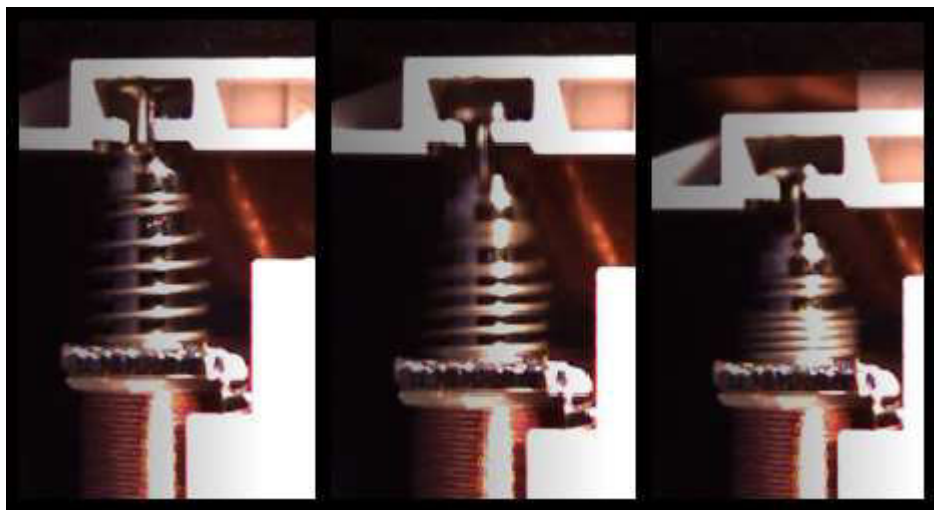
Obr. 1.4: Model s popisem částí aktuátoru

Následující tabulka obsahuje předepsané parametry aktuátoru:

Tab. 1.1: Předepsané parametry aktuátoru

Předepsané parametry	
Minimální odemykací napětí	3,6 V
Indukčnost cívky	$145 \pm 20 \mu\text{H}$
Vnitřní odpor cívky	$1,9 \Omega \pm 10 \%$
Síla pružiny při zdvihu 5,5 mm	$0,2 \pm 0,05 \text{ N}$
Síla pružiny při zdvihu 3,5 mm	$0,4 \pm 0,05 \text{ N}$

Pohyb jádra aktuátoru můžeme rozdělit na 3 stavy podle toho, jak dochází k otevření čtečky zasunutím jádra do aktuátoru. Všechny 3 stavy jsou patrné z Obr. 1.5.



Obr. 1.5: (Zleva) 1., 2. a 3. stav pohybu jádra při odemykání čtečky

Při 1. stavu je čtečka uzamčena a mezi jádrem a nýtem se nachází maximální vzduchová mezera o velikosti 2,2 mm. Pokud dojde ke spuštění mechanismu, tedy přivedení napětového pulzu na piny solenoidu, jádro se začne zasouvat do aktuátoru a narazí na zámkový mechanismus čtečky. Bod nárazu je vidět ve 2. stavu, při němž je velikost vzduchové mezery 1,4 mm a čtečka stále uzamčena. Při 3. stavu je jádro maximálně zasunuto do solenoidu, vzduchová mezera je tedy nulová a čtečka je odemčena. Toto stavové rozdělení je využito při výběru návrhu optimalizace v kapitole 4.

Solenoidy jsou vyráběny sériovou výrobou zahraničním dodavatelem, odkud jsou distribuovány do firmy Amphenol zvláště kotvy s pružinou a zvláště část, kterou tvoří jho, špule, nýt, cívka a piny. Ve společnosti Amphenol dochází k zasazení jádra do solenoidu a následně k zasazení celého aktuátoru do čtečky čipových karet. Celková cena jednoho vyrobeného aktuátoru distribuovaného z ciziny je v přepočtu 0,70 €, z toho cena kotvy a nýtu vychází shodně 0,05 € za jeden kus.

2 Funkce impulzního solenoidu

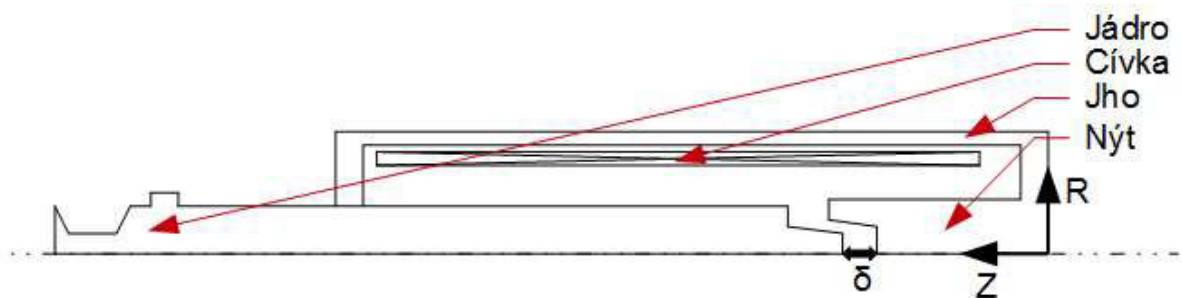
V této kapitole je popsána teoretická funkce a fyzikální vlastnosti solenoidu s jádrem, bez čehož se nelze obejít při řešení optimalizace jeho otevírací charakteristiky. Dále jsou zde určeny a popsány hlavní parametry ovlivňující velikost síly při otevírání čtečky čipových karet.

2.1 Vymezení základních pojmů

Elektromechanický aktuátor popisovaný v této práci se vyznačuje převodem elektrické energie přiváděné na vstupy aktuátoru v podobě stejnosměrných napěťových impulzů na akční mechanickou energii v podobě pohybu feromagnetického jádra. Podle typu mechanického pohybu na výstupu aktuátoru ho zařazujeme mezi lineární aktuátory. Ty využívají, mimo jiné, vzájemného silového působení magnetického pole cívky protékané proudem na feromagnetické jádro, čímž je jádro posouváno po přímce do solenoidu [1].

2.2 Model magnetického pole

Pro pochopení principu činnosti řešeného aktuátoru je nutné chápat rozložení jeho magnetického pole. Pro zobrazení pole byl použit software Agros2D, který počítá rozložení pole formulovaného matematického modelu pomocí metody konečných prvků. Model aktuátoru byl pro jednoduchost řešen jako dvoudimenzionální úloha ve válcových souřadnicích. Na *Obr. 2.1* je náčrt geometrie aktuátoru tak, jak byla zadána do Agros2D, s popisem všech hlavních částí. Parametr δ představuje velikost vzduchové mezery. Pokud je čtečka čipových karet odemčena (viz *Obr. 1.3*), velikost vzduchové mezery je $\delta = 0$ mm, v uzamčené poloze je $\delta = 2,2$ mm.



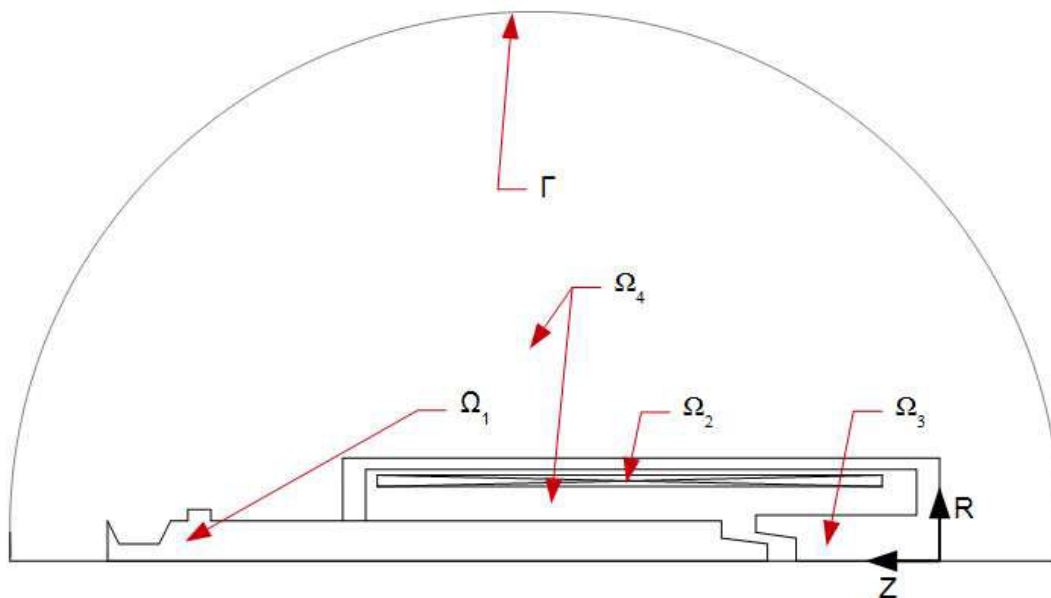
Obr. 2.1: Náčrt řešeního aktuátoru jako vstup do Agros2D

Dále bylo potřeba vymežit definiční oblast, v níž se řeší magnetické pole. Tuto oblast jsme pojmenovali Ω a její hranici Γ . Oblast Ω se skládá z n podoblastí Ω_i , $i = 1 \dots n$, kde je každá z podoblastí definována svým materiálovým parametrem, charakterizovaným permeabilitou μ_i . Obr. 2.2 zobrazuje rozdělení definiční oblasti řešeného aktuátoru na podoblasti. V tab. 2.1 je každá z podoblastí popsána rovnicí magnetického pole vyjádřené pomocí vektorového potenciálu vycházející z Ampérova zákona celkového proudu a lze ji formulovat pomocí parciální diferenciální rovnice ve tvaru [1,9]

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (2.1)$$

kde μ je permeabilita prostředí, \mathbf{A} je magnetický vektorový potenciál a \mathbf{J}_{ext} je hustota proudu dodávaného z externího zdroje. Pro správnou formulaci matematického modelu z důvodu jednoznačnosti řešení je nutné model doplnit o podmínky na hranici definiční oblasti. V našem případě se jedná pouze o Dirichletovu okrajovou podmínku vyjadřující znalost hodnoty vektorového potenciálu ve tvaru [1,9]

$$\mathbf{A} = 0. \quad (2.2)$$

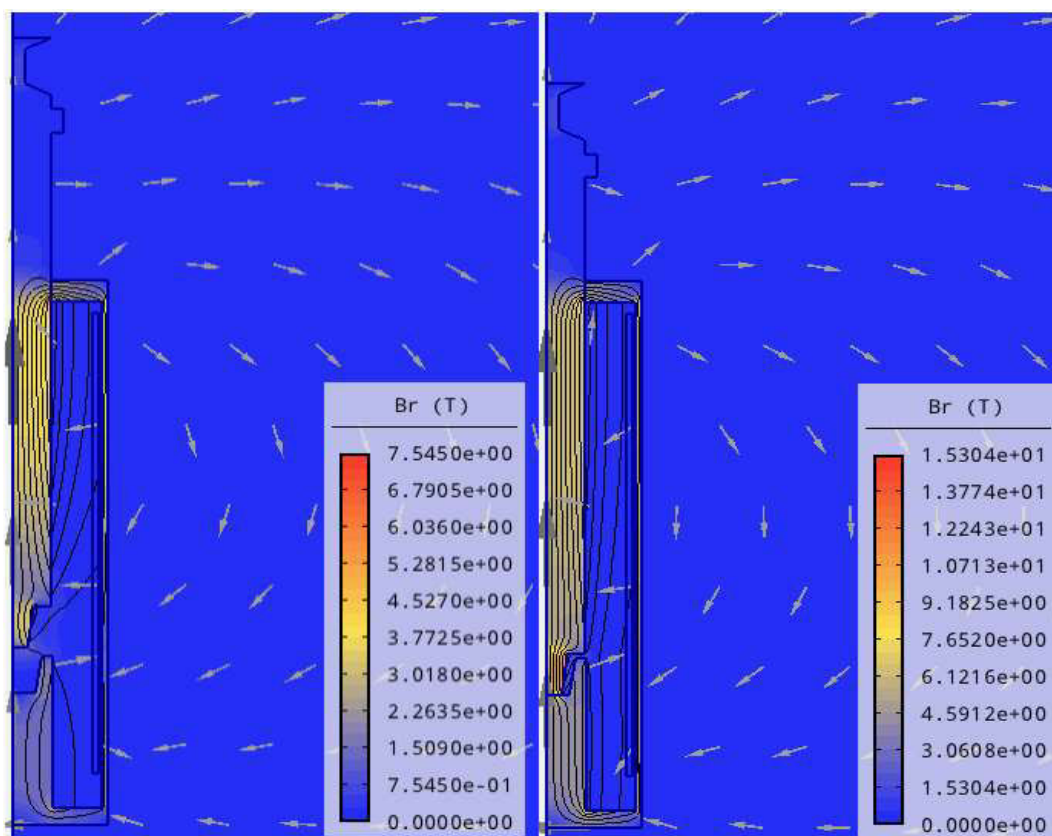


Obr. 2.2: Rozdělení definiční oblasti na podoblasti

Tab. 2.1: Tabulka podoblastí s přiřazenými rovnicemi

Ω_1	kotva	$\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} = 0$
Ω_2	cívka	$\text{rot} \frac{1}{\mu_0} \text{rot} \mathbf{A} = \mathbf{J}_{\text{ext}}$
Ω_3	jho a nýt	$\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} = 0$
Ω_4	vzduch	$\text{rot} \frac{1}{\mu_0} \text{rot} \mathbf{A} = 0$
Γ	Okrajová podmínka	$\mathbf{A} = 0$

Obr. 2.3 ukazuje rozložení magnetického pole stávajícího aktuátoru jako výstup Agros2D. Je zde vidět zobrazení kontur vektorového potenciálu, vektorů magnetické indukce a skálárního zobrazení magnetické indukce. Zleva se jedná o stávající aktuátor se vzduchovou mezerou $\delta = 2,2$ a 0 mm.



Obr. 2.3: Rozložení magnetického pole aktuátoru pro (zleva) otevřený aktuátor a uzavřený aktuátor

Hodnoty magnetické indukce z Obr. 2.3 platí pro materiálové parametry uvedené v Tab 2.2. Hodnota proudu tekoucího cívkou I_{ext} byla vypočítána z předepsaných parametrů stávajícího aktuátoru ze vzorce

$$I_{\text{ext}} = N \frac{U}{R} = 300 \frac{5}{1,9} = 789,5 [\text{A}], \quad (2.3)$$

kde N je počet závitů cívky, U je amplituda přivedeného napěťového pulzu a R je odpor cívky.

Tab. 2.2: Tabulka materiálových parametrů použitých v Agros 2D

Část	Relativní permeabilita μ_r [-]	Celkový proud I_{ext} [A]
Cívka	1	789,5
Kotva, jho a nýt	450	-
Vzduch	1	-

2.3 Popis elektromagnetického pole

Průchodem proudem I závitů cívky o odporu R , který reprezentuje reálnou část impedance cívky, dochází ke vzniku Jouleových neboli tepelných ztrát, které lze vyjádřit vztahem [1]

$$P_j = RI^2. \quad (2.4)$$

Pokud v oblasti V máme magnetické pole, charakterizované vektorovými veličinami \mathbf{H} a \mathbf{B} , určíme energii pole ze vztahu

$$W_m = \int_V w_m dV, \quad (2.5)$$

kde w_m je hustota energie magnetického pole, pro kterou platí vztah

$$w_m = \int_0^B \mathbf{H} d\mathbf{B}. \quad (2.6)$$

Pokud budeme uvažovat lineární prostředí, pro permeabilitu bude platit $\mu = \text{konst.}$, což by znamenalo zjednodušení rovnice na vztah

$$w_m = \frac{1}{2} B H = \frac{1}{2} \mu H^2. \quad (2.7)$$

Pro feromagnetické materiály neplatí $\mu = \text{konst.}$ Jelikož ale neznáme přesný typ automatové oceli, ze které jsou feromagnetické části aktuátoru vyrobeny, neznáme proto ani B-H charakteristiku neboli hysterezní smyčku materiálu a budeme pro zjednodušení uvažovat $\mu = \text{konst.}$

Pomocí několika úprav dostáváme obecný vzorec pro energii magnetického pole ve tvaru

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2. \quad (2.8)$$

Magnetickou energii lze tedy určit z indukčnosti cívky L , která je protékána proudem I . Indukčnost cívky aktuátoru je závislá na velikosti vzduchové mezery δ mezi jádrem a nýtem

a bude se tedy měnit v závislosti na posunutí jádra dovnitř aktuátoru. Ze vztahu pro výpočet energie elektromagnetického pole lze určit sílu na jádro aktuátoru ve směru osy z , jež je zasunováno do solenoidu. Vzorec pro výpočet síly je odvozen v [1] a má tvar

$$F_z = -\frac{dW_m}{dz} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dz}. \quad (2.9)$$

Z uvedené rovnice vyplývá závislost síly na poloze vysunutí jádra, kterou lze vyjádřit statickou charakteristikou, neboli charakteristikou závislosti síly na poloze jádra, nazývanou též force-stroke diagramem [1,9].

Magnetický obvod tvořený aktuátorem je patrný z *Obr. 2.1* a skládá se ze zdroje magnetického indukčního toku, což je cívka protékána proudem, dále z kotvy, jha a nýtu, které jsou vyrobeny z feromagnetického materiálu, a nakonec z proměnné vzduchové mezery. Zdrojem magnetického napětí, tedy zdrojem magnetického indukčního toku, je cívka protékána proudem. Vzorec pro magnetické napětí je

$$U_m = N \cdot I, \quad (2.10)$$

kde N je počet závitů cívky a I je velikost proudu procházející závitem cívky.

Magnetický indukční tok Φ je definován vztahem

$$\phi = B \cdot S, \quad (2.11)$$

kde směr vektoru S je kolmý na rovinnou plochu S průřezu magnetického obvodu.

Při řešení magnetických obvodů se řídíme vztahem nazývaným se Hopkinsonův zákon. Tento zákon řeší vztahy mezi magnetickým indukčním tokem Φ , magnetickým napětím U_m a magnetickým odporem R_m . Rovnice se vyjadřuje ve tvaru

$$\phi = \frac{U_m}{R_m}, \quad (2.12)$$

kde magnetický odpor R_m vyjadřujeme ze vztahu

$$R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S}. \quad (2.13)$$

Permeabilita prostředí μ je dána součinem permeability vakua μ_0 , jejíž velikost je

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}, \quad (2.14)$$

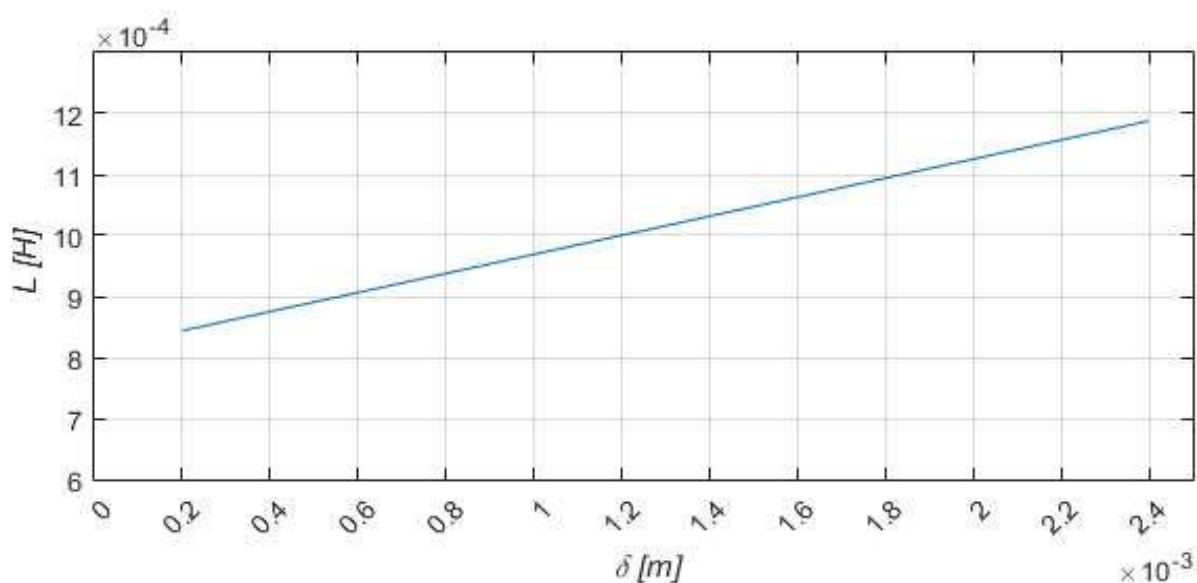
a relativní permeability μ_r , která je specifická pro konkrétní materiál. Podle velikosti relativní permeability můžeme rozdělit látky, dle jejich magnetických vlastností, na diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické. Zatímco diamagnetické a paramagnetické látky, jejichž relativní permeabilita je buď menší než 1 nebo mírně větší než 1, zeslabují nebo jen mírně zesilují magnetické pole, látky feromagnetické magnetické pole zesilují silně a jejich relativní permeabilita je výrazně vyšší než 1. Feromagnetické látky

dále dělíme na magneticky tvrdé a měkké látky. Magneticky tvrdé látky se zmagnetizují po přiložení do vnějšího magnetického pole a zmagnetizované zůstanou i po jeho vyjmutí z vnějšího pole, zatímco magneticky měkké látky tuto schopnost ztrácejí. Liší se také hodnotou magnetické indukce. Zpravidla je u magneticky tvrdých látek je tato veličina vyšší, než u magneticky měkkých látek.

2.4 Dynamické charakteristiky

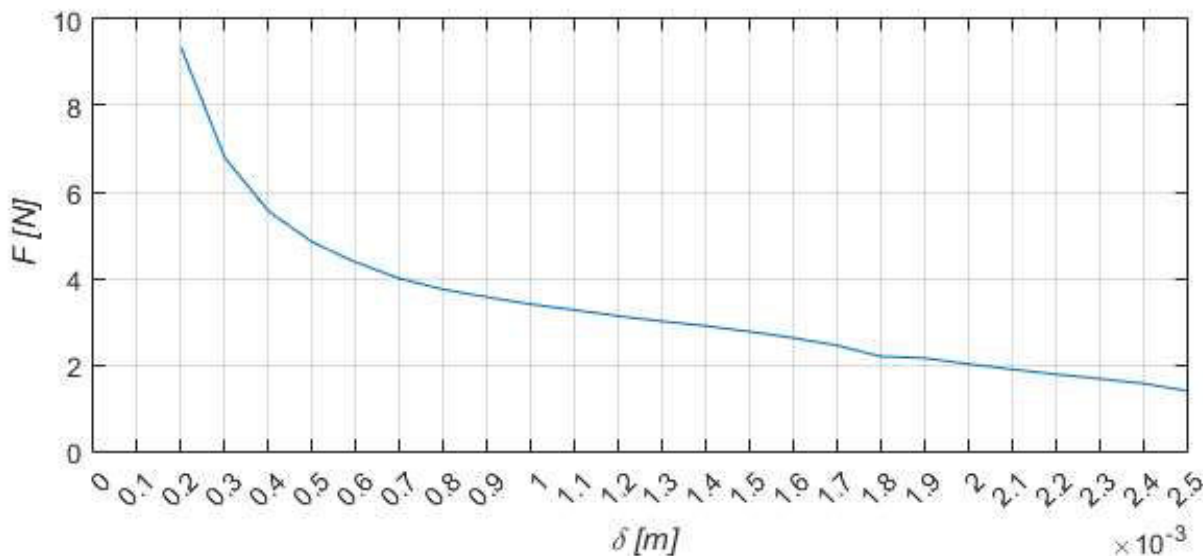
Tato kapitola se zabývá přechodnými jevy v aktuátoru. Matematický model dynamických parametrů je reprezentován soustavami diferenciálních rovnic, jejichž proměnnými veličinami jsou napětí, proud, posuv jádra, rychlost posuvu jádra apod. Jelikož se aktuátor skládá ze spojení elektrických a mechanických prvků, mluvíme o elektromechanickém obvodu. Elektrickými prvky jsou zde zdroje napětí a proudu, odpor cívky a samotná cívka. Mechanickými prvky jsou zdroje sil, materiál, tlumiče (tření) a pružina. U elektrických prvků popisujeme dynamické parametry pomocí stavové veličiny, což je pro cívku proud. Napětí je následně vypočteno pomocí ohmova zákona ze znalosti odporu. U mechanických prvků je popisujeme pomocí posuvu jádra s a rychlosti posuvu jádra v .

Bylo potřeba stanovit případnou nelinearitu pasivních prvků. Jelikož nebylo v našich možnostech zjistit, z jakého konkrétního materiálu jsou vyráběny feromagnetické části aktuátoru, tedy jho, nýt a jádro, neboť ani výrobce tuto informaci nezná, není známa ani relativní permeabilita tohoto materiálu a budeme tedy uvažovat konstantní permeabilitu $\mu_r = 450$, což odpovídá automatové oceli. Bylo také nutné laboratorně změřit závislost indukčnosti cívky na poloze jádra $L = L(s)$. Výsledný graf závislosti je na Obr. 2.4.



Obr. 2.4: Závislost indukčnosti na vysunutí jádra

Důležitým ukazatelem parametrů aktuátoru je statická charakteristika. Jedná se o závislost síly působící na jádro solenoidu a vzdálenosti mezi kotvou (jádrum) a nýtem solenoidu. Pro zjištění magnetické síly byl vytvořen model aktuátoru v programu Agros2D, kde byl použit proces serial calculation. V tomto procesu lze nasimulovat pohyb jádra, který je rozdělen na určitý počet kroků a v každém kroku vypočítat sílu magnetického pole na feromagnetické jádro aktuátoru, čímž dostaneme základní hodnoty pro sestavení statické charakteristiky na Obr. 2.5.



Obr. 2.5: Statická charakteristika modelovaného stávajícího aktuátoru v Agros2D

2.4.1 Popis matematického modelu

Nejprve bylo potřeba stanovit průběh napětí a proudu na cívce. Po připojení zdroje napětí k cívce vyskočí hodnota napětí na hodnotu zdroje, poté se začne ustalovat na nulové hodnotě. Rychlost přechodového děje je závislá na vnitřním odporu cívky a reprezentuje ji časová konstanta τ . Ke stanovení průběhu přechodového děje je potřeba formulovat rovnici pro napětí, která má tvar:

$$R i(t) + L \frac{d i(t)}{d t} = U_0. \quad (2.15)$$

Dále je určena počáteční podmínka a také rovnice pro ustálený stav:

$$i(0) = 0 \quad (2.16)$$

a

$$i(\infty) = \frac{U_0}{R}. \quad (2.17)$$

K levé straně rovnice (2.15), která je tzv. homogenní rovnice, je sestavena charakteristická rovnice

$$R + L \lambda = 0 \quad (2.18)$$

z níž je určen kořen

$$\lambda = -\frac{R}{L}. \quad (2.19)$$

Dále lze vypočítat časovou konstantu τ

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} = \frac{L}{R} \quad (2.20)$$

a určit obecné řešení rovnice (2.15)

$$i = K e^{-\frac{t}{\tau}} + i(\infty) = K e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{U_0}{R}. \quad (2.21)$$

Po dosazení počáteční podmínky do rovnice (2.21) lze vypočítat integrační konstantu K jako

$$K = -\frac{U_0}{R}. \quad (2.22)$$

Okamžitá hodnota proudu procházející cívkou je

$$i(t) = -\frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{U_0}{R} = \frac{U_0}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2.23)$$

a napětí na indukčnosti [12]

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} = L \left(-\frac{U_0}{R}\right) \left(-\frac{R}{L}\right) e^{-\frac{t}{\tau}} = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (2.24)$$

V případě řešení rychlosti a dráhy vycházíme z pohybových rovnic Newtonových zákonů:

$$F = m \frac{dv}{dt} \quad (2.25)$$

a

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (2.26)$$

F je síla v ose z působící na jádro solenoidu. Její velikost závislou na poloze vysunutí jádra reprezentuje nejen magnetická síla ze statické charakteristiky na *Obr. 2.5*, ale také další síly, ze kterých se výsledná síla skládá. Mezi ty nejpodstatnější patří, kromě magnetické síly, třecí síla a síla pružiny, což je popsáno v kapitole 2.5. Následující rovnice vyjadřuje druhý Newtonův pohybový zákon s podsložkami výslednice sil:

$$F_m + F_p + F_t = m \frac{dv}{dt}. \quad (2.27)$$

S pomocí Newtonových pohybových rovnic byl sestrojen skript pro vyjádření průběhu pomocí simulace v programu MATLAB, který je v příloze A a B.

2.4.2 Zvolená implementace modelu

Pro výpočet průběhu simulace byla zvolena metoda Runge-Kuttova typu 4. řádu. Pro vyčíslení hledané aproximace řešení je využíván výpočet derivace vyšších řádů. Potřebné derivace jsou vypočítány pomocí pomocných bodů mezi sousedními uzly v síti. U metody 4. řádu vyjadřujeme nový stav systému pomocí předcházejícího stavu ze vztahů:

$$y(x_{i+1}) = y(x_i) + h \frac{k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4}{6} \quad (2.28)$$

$$k_1 = f(x_i, y(x_i)) \quad (2.29)$$

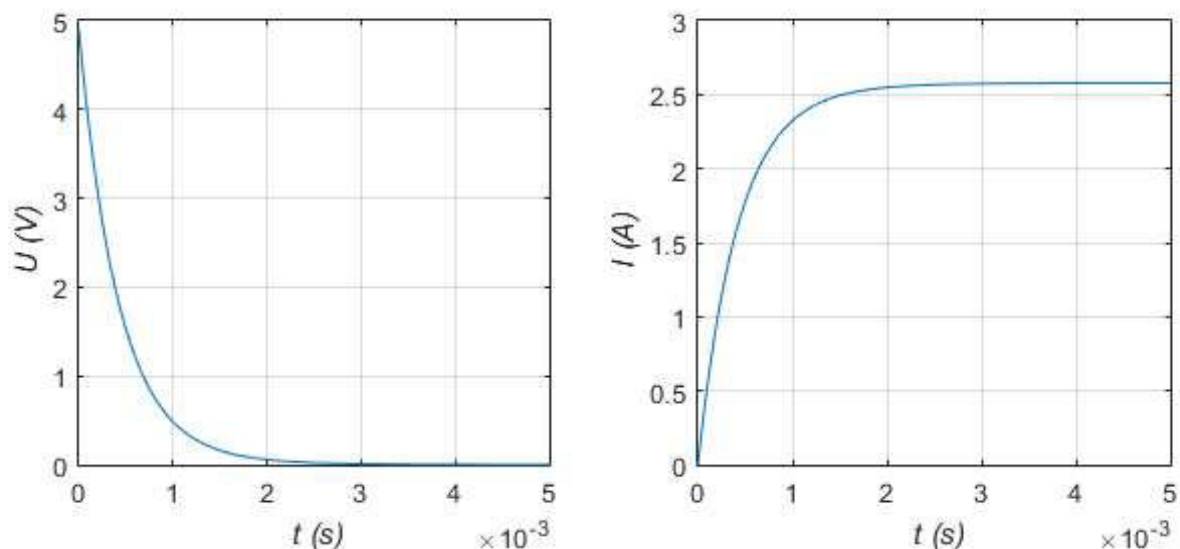
$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y(x_i) + \frac{1}{2}hk_1\right) \quad (2.30)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y(x_i) + \frac{1}{2}hk_2\right) \quad (2.31)$$

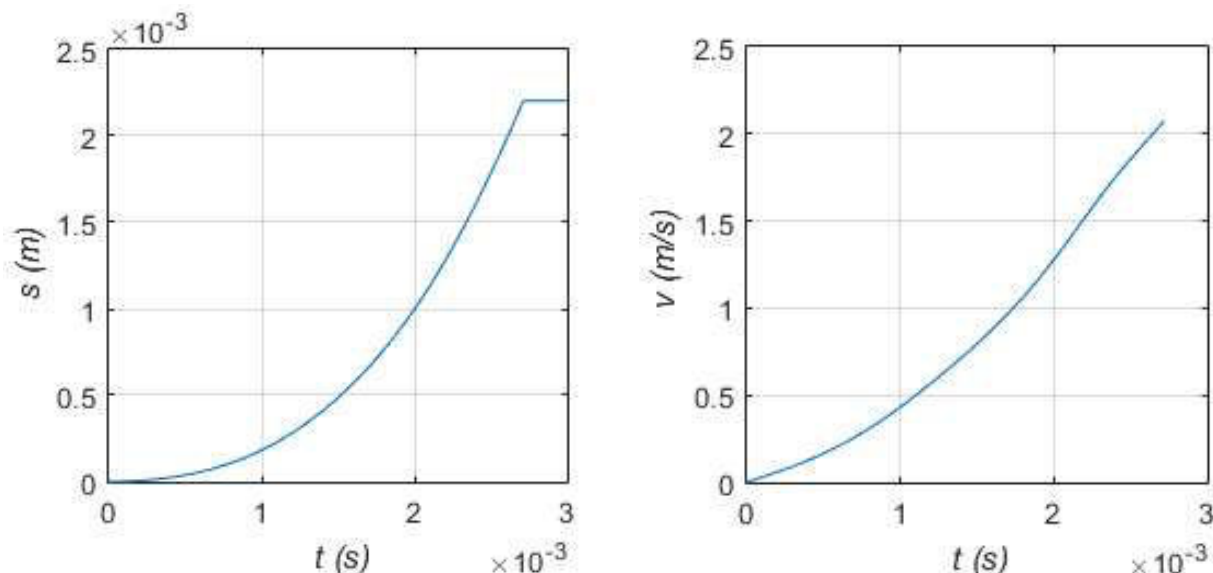
$$k_4 = f(x_i + h, y(x_i) + hk_3) \quad (2.32)$$

2.4.3 Zobrazení získaných výsledků

Následující grafy jsou výstupem simulací, pro které byl napsán skript v programu MATLAB. Jedná se o grafy přechodového děje napětí a proudu na cívce a grafy dráhy a rychlosti kotvy aktuátoru v závislosti na čase. Z grafů lze vyčíst, že přechodové děje na cívce jsou ve 3 ms již ustáleny. Dále je zřejmé, že kotva aktuátoru narazí do nýtu přibližně v čase 2,6 ms po aktivování aktuátoru při maximální rychlosti 2,1 ms⁻¹.



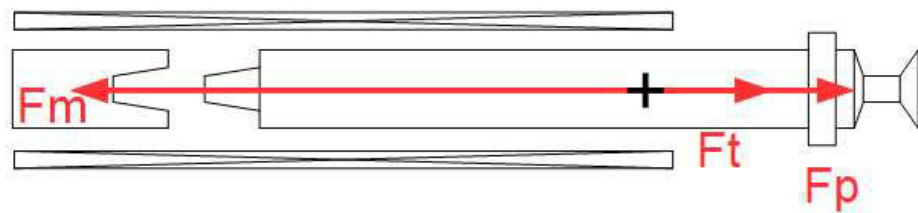
Obr. 2.6: Grafy závislosti (zleva) napětí a proudu na čase



Obr. 2.7: Grafy závislosti (zleva) dráhy a rychlosti kotvy solenoidu na čase

2.5 Parametry ovlivňující otevírací charakteristiku

V předchozích kapitolách je popsána problematika silového působení magnetického pole aktuátoru na jádro solenoidu. V těchto případech se jedná o magnetickou sílu, která hraje nehlavnější úlohu z hlediska otevírací charakteristiky čtečky čipových karet. Ve skutečnosti je ale celková síla způsobující pohyb jádra výslednicí dílčích sil, které jsou popsány v následujících odstavcích. Na *Obr. 2.8* je schématické znázornění rozložení dílčích sil působících na jádro aktuátoru.



Obr. 2.8: Schématické rozložení dílčích sil

2.5.1 Magnetická síla

Jedná se o hlavní parametr výsledné síly působící na jádro, které je díky magnetické síle F_m vtahováno směrem do solenoidu. Zdrojem této síly je cívka protékána proudem a její velikost závisí na celkové charakteristice magnetického obvodu. Tato problematika je popsána v kapitolách 2.2 a 2.3. Velikost této síly se pohybuje v jednotkách N.

2.5.2 Síla pružiny

Součástí aktuátoru je pružina, jejímž cílem je vrátit jádro zpět do výchozí polohy po ukončení napěťového impulsu a tedy po odeznění silového působení magnetického pole. Bylo laboratorně změřeno, že při stlačení pružiny na 5,5 mm, což odpovídá uzavřené čtečce, působí pružina silou $F_p = 0,2$ N a při stlačení na 3,5 mm, což odpovídá situaci, kdy je jádro solenoidu zcela zasunuto, působí pružina silou $F_p = 0,4$ N. Tato síla působí proti magnetické síle působící na jádro v ose z.

2.5.3 Tíhová síla

Jedná se o sílu, kterou je k Zemi přitahováno každé těleso nacházející se na jejím povrchu. Ne vždy je působením tíhové síly vyvolán pohyb tělesa. Pokud těleso leží v klidu na nějaké podložce, má tzv. tíha tělesa G stejný směr i velikost jako tíhová síla. Tíha je způsobena tíhovou silou, kterou působí gravitační pole Země na těleso. [4] Vzorec pro výpočet tíhy je

$$G = m \cdot g, \quad (2.33)$$

kde m je hmotnost tělesa, tedy jádra solenoidu, a g je tíhové zrychlení. Tíha G není znázorněna ve schématickém rozložení dílčích sil na Obr. 2.8, je však součástí třecí síly, o které se píše v následující kapitole.

2.5.4 Třecí síla

Třecí síla vzniká, je-li pohybující se těleso přitlačováno silou k povrchu, po kterém se těleso pohybuje. V našem případě se jedná o kotvu aktuátoru, která je tíhou G přitlačována k plastovému povrchu špule. Třecí síla působí proti pohybu tělesa, má tedy opačný směr, než magnetická síla. Lze ji vypočítat ze vzorce

$$F_t = f \cdot G, \quad (2.34)$$

kde f je koeficient smykového tření. Tento parametr je však odlišný pro těleso v klidu a těleso v pohybu, neboť je-li těleso v klidu, je potřeba vykonat větší sílu pro uvedení jej do pohybu. Pro tento stav se udává tzv. koeficient smykového tření v klidu f_0 a jeho velikost je větší než f . [5] Pro ocelový materiál pohybující se na plastovém povrchu, což odpovídá kotvě aktuátoru pohybujícího se na povrchu špule, je udáván koeficient smykového tření $f = 0,06$ [6] a velikost třecí síly je tedy přibližně 0,78 mN, což je, oproti jednotkám newtonu magnetické síly působící na kotvu, zanedbatelná hodnota.

3 Optimalizace

V této kapitole jsou popsány možnosti optimalizace otevírací charakteristiky čtečky čipových karet. Každá podkapitola se zabývá určitou možností změn parametrů stávajícího aktuátoru, z nichž je následně vybrána nejvhodnější varianta nebo jejich kombinace, které byly použity při návrhu nového aktuátoru, jehož parametry byly následně laboratorně testovány.

3.1 Návrhy změn parametrů

Z ekonomických důvodů projektu není možné vytvářet rozměrové změny čtečky. Vzhledem k tomuto požadavku byly navrhovány ty změny, které nemají vliv na externí rozměry aktuátoru.

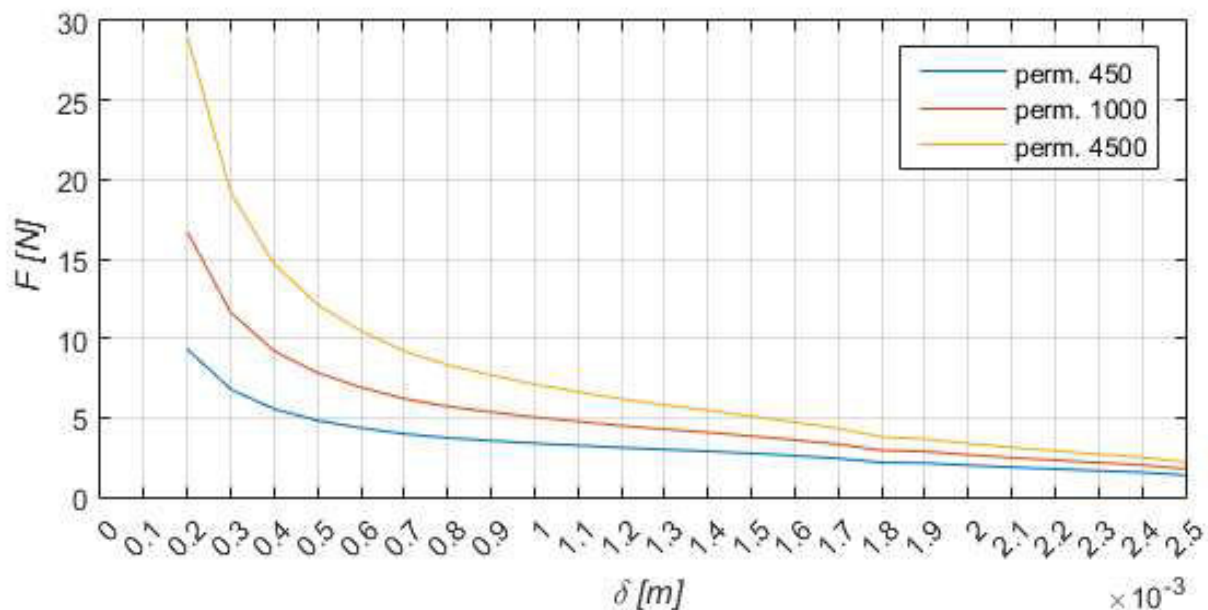
Navržené aktuátory jsou namodelovány v programu Agros2D, kde byl simulován pohyb jádra a zjišťován vliv nových parametrů na statickou charakteristiku aktuátoru.

3.1.1 Permeabilita

Permeabilita je fyzikální veličina reprezentující vliv určitého materiálu na účinky výsledného magnetického pole. Vhodnou změnou materiálu lze zvýšit silové účinky magnetického pole působícího na jádro aktuátoru. V odstavcích kapitoly 2.3 je popsán vliv permeability na energii magnetického pole, tedy i na jeho silové účinky. Dle předpokladů tedy s rostoucí permeabilitou poroste síla na jádro aktuátoru. Materiály použité pro simulaci jsou popsány v *Tab. 3.1*. Pro stávající aktuátor byl použita hodnota relativní permeability 450, což odpovídá automatové oceli.

Tab. 3.1: Materiály použité při simulaci aktuátoru [13]

Název materiálu	Složení	Relativní permeabilita μ_r [-]
Automatová ocel	neznámé	450
Ni + Fe	50% Ni, 50% Fe	1000
Hypernik	50% Ni, Cu, Mn, Si, W, Co, Fe	4500

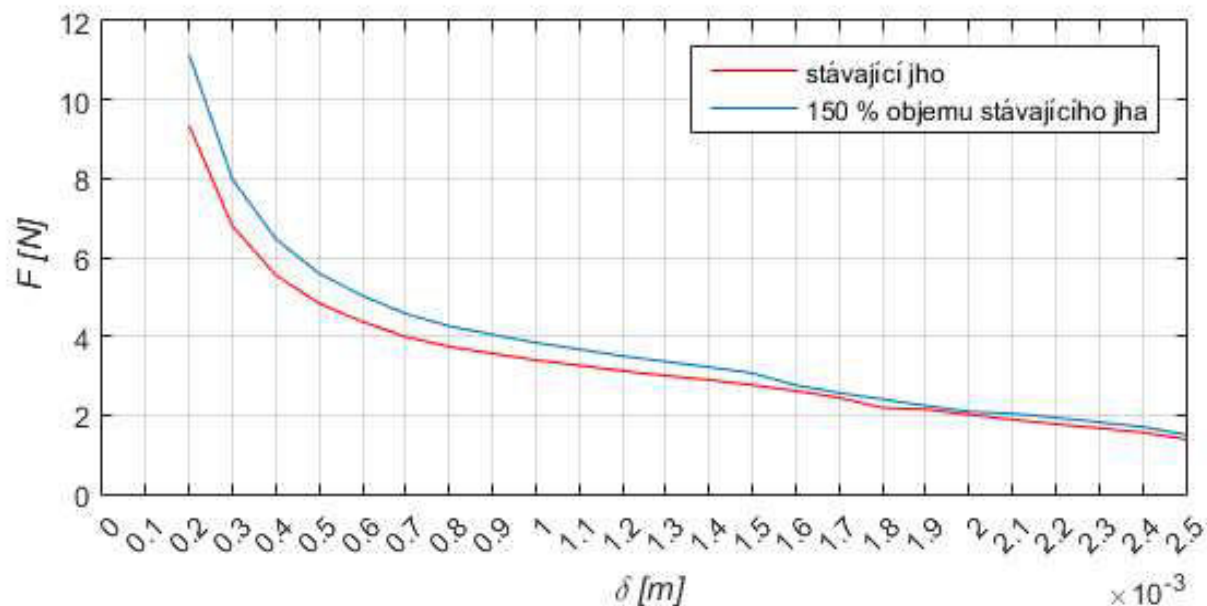


Obr. 3.1: Statické charakteristiky pro různé permeability materiálu

3.1.2 Změna rozměrů jha

Pro zvětšení magnetického indukčního toku musí dojít ke zmenšení magnetického odporu jha, čehož docílíme zvětšením plochy, kterou prochází magnetický indukční tok, dle vzorců (2.12 - 2.13). Jho aktuátoru není jako jediný magnetický materiál osově symetrická součástka (viz *Obr. 1.4*), což je problém při jeho modelování v programu Agros2D. Bylo proto nutné jej navrhnout tak, aby osově symetrické bylo a magnetické vlastnosti osově symetrického modelu odpovídaly skutečnému modelu. Při návrhu se vycházelo z celkového objemu. Navržené osově symetrické jho má stejný objem, jako skutečné a lze ho vidět například na *Obr. 2.1*.

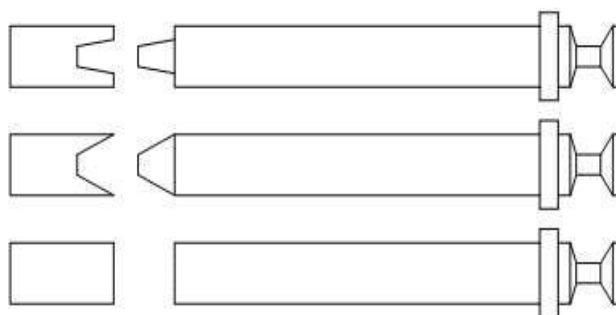
Pro zjištění vlivu změny objemu jha na silové účinky aktuátoru bylo použito jho s objemem o 50 % větším, než je objem původního jha aktuátoru, a to zvětšením tloušťky stávajícího jha. Výsledná statická charakteristika navrženého modelu je porovnávána s charakteristikou stávajícího aktuátoru na *Obr. 3.2*.



Obr. 3.2: Statické charakteristiky pro různé objemy jha

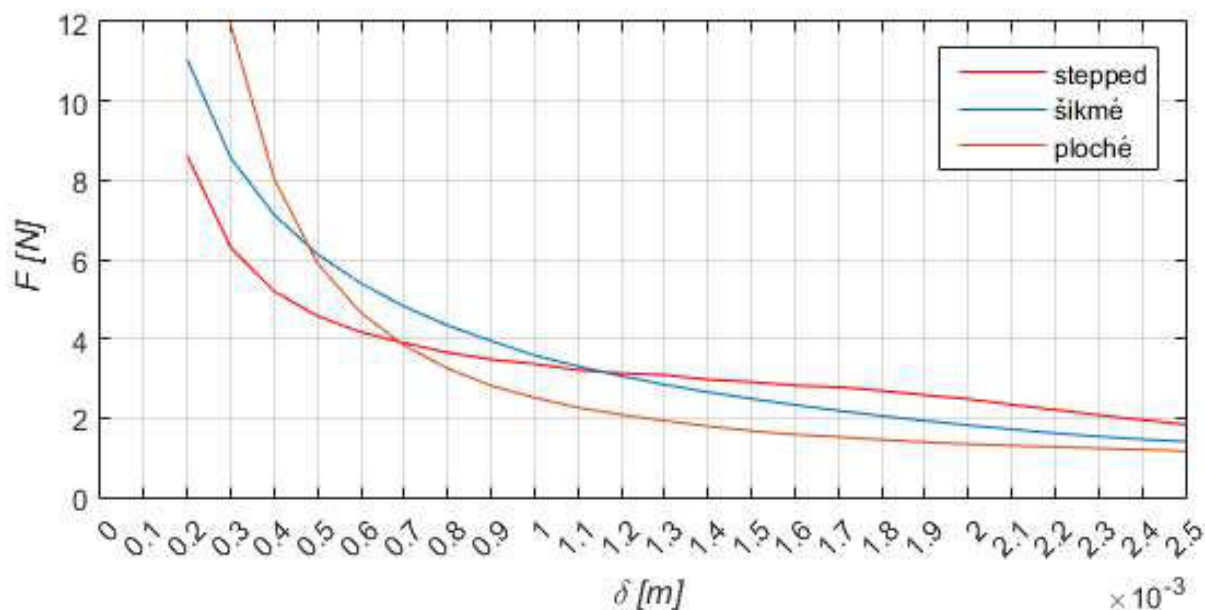
3.1.3 Tvar zakončení kotvy

Dle teoretických předpokladů má na účinky silového působení elektromagnetického pole na jádro solenoidu také tvar kotvy v místě, kde dosedá do nýtu. Zaměříme se na tři základní tvary, jež jsou zobrazeny na Obr. 3.3 [8].



Obr. 3.3: Tvary zakončení kotvy, (zhora) stepped, šikmý a plochý

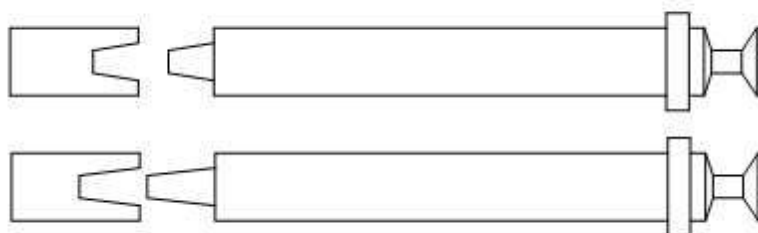
Tvar kotvy stávajícího aktuátoru je tzv. stepped. Statická charakteristika se pro toto zakončení vyznačuje většími silovými účinky při větší vzduchové mezeře, než je tomu u plochého či šikmého zakončení, a naopak u téměř nulové vzduchové mezery je síla menší, než je tomu u ostatních typů zakončení. Pro všechny tři typy zakončení byl vytvořen model v programu Agros2D. Na Obr. 3.4 jsou statické charakteristiky výsledných simulací.



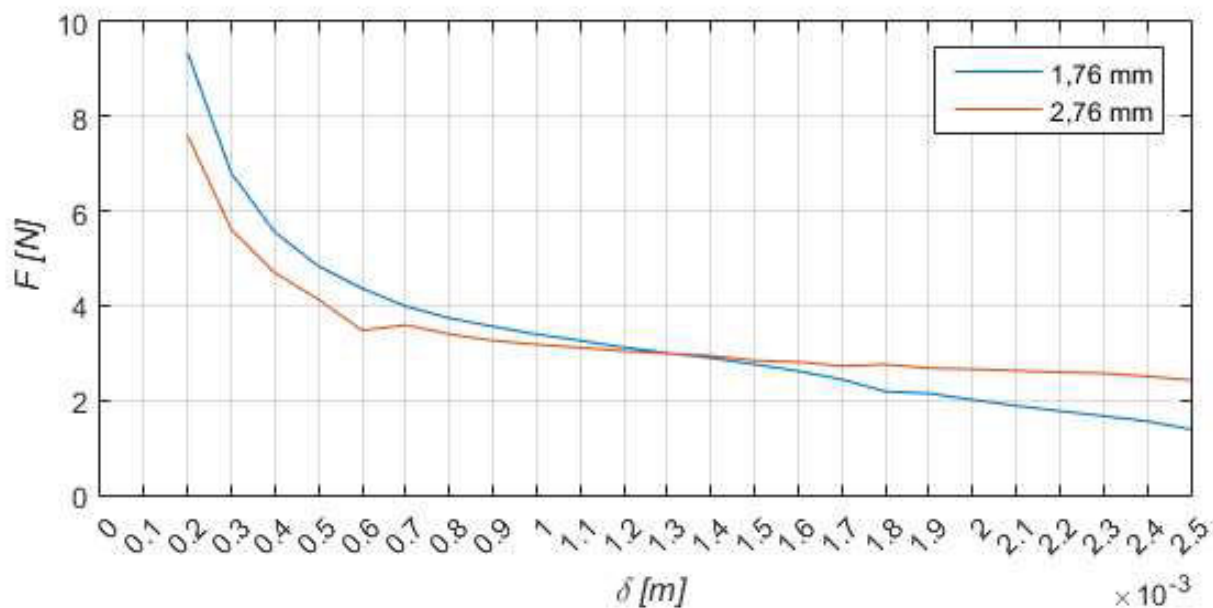
Obr. 3.4: Statické charakteristiky pro různé tvary zakončení kotvy

3.1.4 Změna délky zakončení kotvy

Pro zakončení kotvy aktuátoru nazvaný stepped byla nasimulována statická charakteristika pro různou délku zakončení kotvy. Délka stávajícího zakončení je 1,76 mm a jako možnou optimalizaci byl vytvořen model s délkou zakončení 2,76 mm. Náčrt modelů pro obě varianty je na Obr. 3.5. V modelu se stávající délkou zakončení byla postupně vyzkoušeno několik možných prodloužení či zkrácení, nejlépe se však z hlediska silových účinků uvedených ve statické charakteristice jevila délka 2,76 mm, ta je tedy považována za potenciální možnou optimalizaci. Porovnání statických charakteristik je na Obr. 3.6.



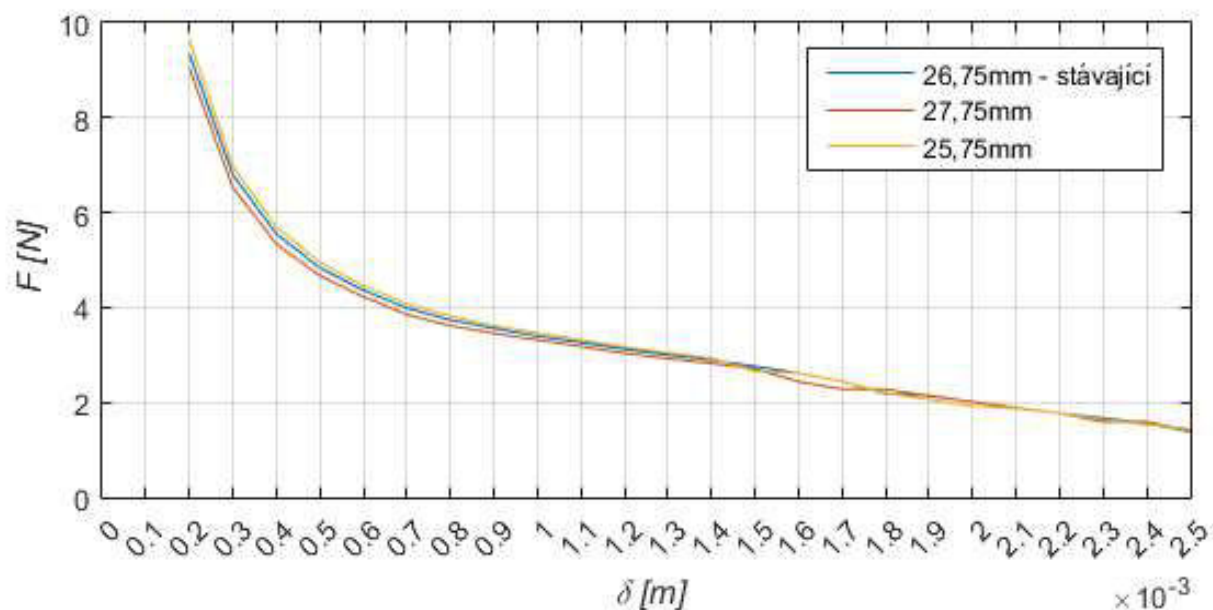
Obr. 3.5: (zhora) kotva s původní a s prodlouženou délkou zakončení



Obr. 3.6: Statické charakteristiky pro různé délky zakončení konce kotvy

3.1.5 Změna délky kotvy

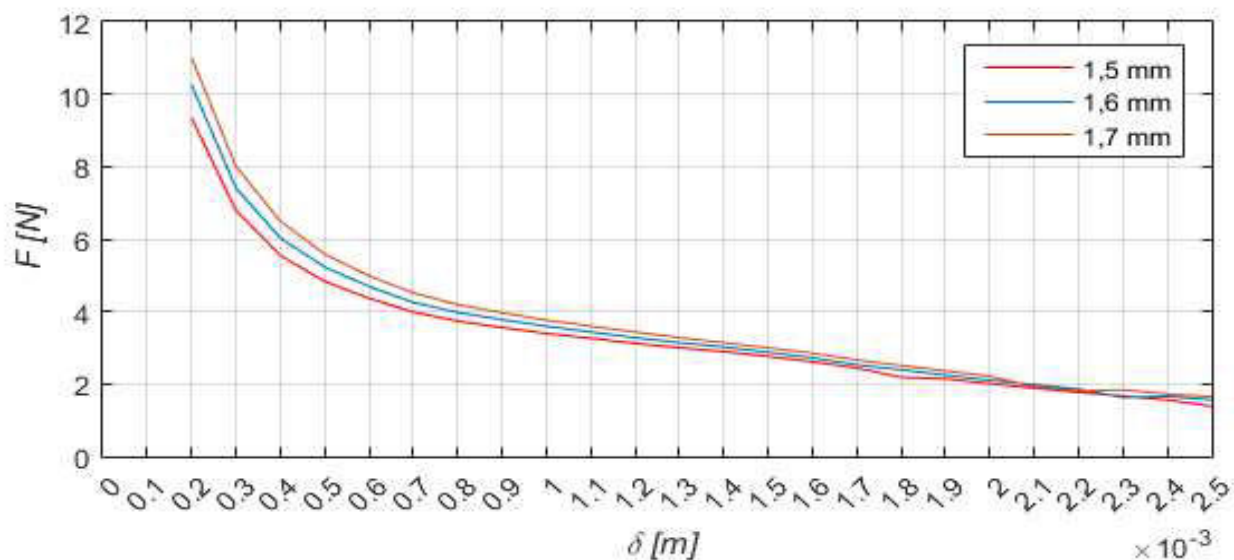
Další z možných změn, které lze provést na aktuátoru jsou změna délky kotvy, tedy i nýtu. Pro porovnání je použita statická charakteristika stávajícího aktuátoru. V grafu na Obr. 3.7 je sledován vliv délky jádra aktuátoru na změny silových účinků aktuátoru na jádro. Pro simulaci byly namodelovány aktuátory s délkou kotvy 27,75 mm a 25,75 mm, to znamená o 1 mm delší a o 1 mm kratší kotva, než je tomu u stávajícího aktuátoru.



Obr. 3.7: Statické charakteristiky pro změny délky kotvy

3.1.6 Tloušťka kotvy

Z teoretických znalostí magnetického obvodu lze považovat za další možnou optimalizaci změnu šířky kotvy aktuátoru. Rozšířením kotvy se zvětší plocha pro průchod magnetického indukčního toku, čímž se sníží magnetický odpor celého magnetického obvodu. Kromě aktuální kotvy, s šířkou o poloměru 1,5 mm, byly pomocí simulace testovány kotvy s poloměrem 1,6 a 1,7 mm. Výsledné průběhy vyjadřuje statické charakteristiky na *Obr. 3.8*.



Obr. 3.8: Statické charakteristiky pro změny průměru kotvy

3.2 Výběr vhodné varianty

Tato kapitola se zabývá shrnutím a zhodnocením návržených a testovaných simulací v kapitole 3.1. Vhodnost implementovat návrh optimalizace bude posuzována podle silových účinků patrných ze statických charakteristik. Následující tabulka (*Tab. 3.2*) obsahuje velikost síly elektromagnetického pole působící na jádro aktuátoru v případě, kdy je jádro téměř zasunuté do solenoidu, což reprezentuje velikost vzduchové mezery $\delta = 0,2$ mm, a dále v případě, kdy je jádro vysunuté a velikost vzduchové mezery je tedy $\delta = 2,2$ mm. Pro další možné porovnání je v *tabulce 3.2* také velikost průměrné síly, která je vyjádřena jako aritmetický průměr hodnot sil v každém kroku posunu jádra aktuátoru, kde velikost jednoho kroku je 0,1 mm.

Tab. 3.2: Tabulka hodnot sil ze simulací možných optimalizací

Změna parametru		síla při $\delta = 2,2$ mm[N]	síla při $\delta = 1,4$ mm[N]	síla při $\delta = 0,2$ mm [N]	průměrná síla [N]
Permeabilita	450	1,67	2,90	9,34	3,35
	1000	2,18	4,08	16,72	5,11
	4500	2,71	5,47	29,01	7,52
Rozměr jha	V = 100 %	1,67	2,90	9,34	3,35
	V = 150 %	1,83	3,22	11,14	3,79
Tvar zakončení kotvy	stepped	1,67	2,90	9,34	3,35
	šikmý	1,54	2,65	11,05	3,64
	plochý	1,24	1,80	20,33	3,61
Délka zakončení kotvy	1,76 mm	1,67	2,90	9,34	3,35
	2,76 mm	2,58	2,94	7,59	3,35
Délka kotvy	26,75 mm	1,67	2,90	9,34	3,35
	27,75 mm	1,59	2,82	9,05	3,26
	25,75 mm	1,64	2,93	9,64	3,39
Tloušťka kotvy	1,5 mm	1,67	2,90	9,34	3,35
	1,6 mm	1,64	3,02	10,26	3,57
	1,7 mm	1,85	3,28	11,01	3,77

Při výběru vhodné optimalizace jsem se řídil výslednými hodnotami uvedenými v *tabulce 3.1*. S ohledem na tyto parametry byl vyroben vzorek nového aktuátoru. Při výběru návrhu byla zohledněna jak průměrná síla působící na kotvu aktuátoru, tak i síla působící na kotvu při otevírání čtečky ve stavu, kdy je jádro nejdále od nýtu, tedy ve vzdálenosti 2,2 mm, neboť je potřeba dbát na to, aby silový účinek dodal kotvě dostatečně velký ráz k pohybu a tím došlo k odemčení čtečky. Jedna ze sledovaných oblastí statické charakteristiky je také v místech, kde je vzduchová mezera 1,4 mm. V tomto stavu dochází k nárazu jádra na zámkový mechanismus čtečky (*Obr. 1.5*) a je potřeba, aby bylo v tento moment silové působení co možná největší.

Sílu, působící na jádro ve stavu, kdy je nejbližší nýtu, lze označit ve všech simulovaných případech za dostačující. Zde se jedná o sílu potřebnou k udržení jádra při nulové vzduchové mezeře, než dojde k celkovému otevření čtečky, na což stačí pouze překonat silové účinky, kterými na kotvu působí pružina.

Z hlediska optimalizace se dobře jeví změna permeability, tedy materiálu. Automatová ocel, což je materiál používaný při výrobě stávajícího aktuátoru, se zpravidla vyznačuje obsahem síry v poměru až 0,2% a manganu v poměru kolem 1%, případně olovo. Zbytek tvoří železo, uhlík a další legující prvky. Tyto oceli dosahují dobré obrobitelnosti [11].

V Tabulce 3.2 jsou vypsány vybrané magnetické materiály s několikanásobně vyšší permeabilitou, než má automatová ocel.

Tab. 3.3: Permeability vybraných materiálů [13]

Materiál	poznámky	pocatecni permeabilita	maximalni permeablita
Permalloy (30-80% Ni)		vysoka	8e4 – 1e5
Supermalloy	78% Ni + 5 % Mo 17 % Fe	100000	1000000
Nifemax 40		40000	80000
79 Permalloy	78%Ni + 4% Mo + Fe	20000	200000
Nifemax 10		10000	50000
Hypernik	50 % Ni + Cu, Mn, Si, W, Co + Fe	4500	100000
Nifemax 4		4000	30000
MU-metal	78 % Ni + 5 % Cu + Fe	3000	100000
45 Permalloy		2700	23000
Nifemax 2,5		2500	25000
Ni + Fe (invar)	Nikl 36%	2000	3000
Ni + Fe	obsah Niklu 50%	1000	100000
Cisté Fe		500	15000

Všechny dostupné vysokomagnetické materiály vhodné pro optimalizaci aktuátoru změnou materiálu, ze kterých se skládá aktuátor, mají obrovskou nevýhodu ve své špatné obrobiteľnosti vzhledem ke svému složení, což je jediná dostupná možnost výroby.

Jako další možnost vylepšení silových účinků solenoidu na jádro se jeví možnost prodloužení konce kotvy aktuátoru. Z tabulky 3.2 a grafu na Obr. 3.6 vyplývá, že při vzduchové mezeře větší, než 1,4 mm, je silové působení navrženého aktuátoru podstatně větší, než je tomu u stávajícího aktuátoru. Pro tuto variantu byl vyroben a následně otestován vzorek, čímž se zabývá kapitola 4.

Po porovnání ostatních návrhů, tedy rozšíření jha, rozšíření či prodloužení kotvy a tvar zakončení kotvy, což je popsáno v kapitolách 3.1.2 – 3.1.6, je z grafů patrné, že změny parametrů mají horší nebo téměř žádný vliv na silové účinky a nemá cenu je vzhledem k finanční náročnosti výroby vzorků testovat.

Je také nutné brát v úvahu fakt, že simulacemi jsme zjišťovali pouze magnetickou sílu a je tedy jisté, že se bude lišit od skutečných hodnot síly. Lze předpokládat, že síla změřená při testování skutečných vzorků bude v celém svém průběhu nižší, než je tomu u simulovaných průběhů. Tento fakt byl při vytváření návrhů zanedbán zejména proto,

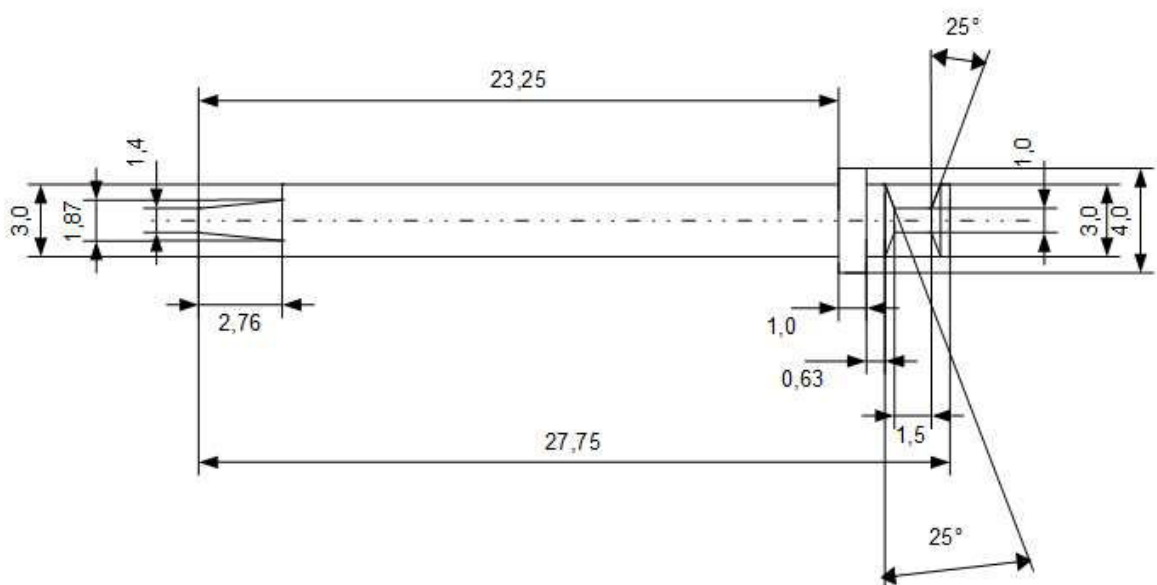
že změnou silových účinků v jakékoli části statické charakteristiky u simulovaných průběhů dojde ke stejné nebo alespoň k téměř stejné změně v charakteristikách reálných vzorků.

4 Výroba a testování

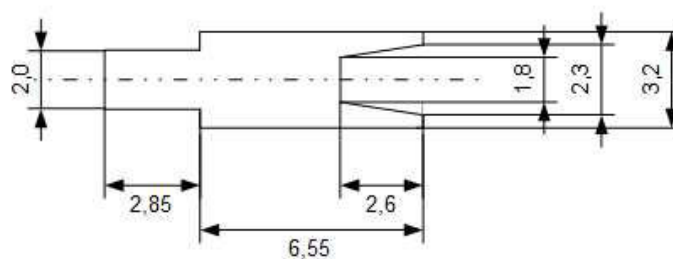
V kapitole 3.2 je popsáno zhodnocení navržených optimalizací aktuátoru a nakonec byl vybrán návrh pro optimalizaci, podle kterého byly vyrobeny a následně laboratorně otestovány vzorky aktuátoru, což popisuje tato kapitola.

4.1 Výroba

Na *Obr. 4.1* a *Obr. 4.2* jsou rozměrové výkresy, dle kterých probíhala výroba vzorků. Jedná se zde pouze o kotvu a nýt aktuátoru, neboť ostatní části jsou beze změny a byly proto vyrobeny dle stávajících předloh.



Obr. 4.1: Rozměrový výkres vyrobeného vzorku – kotva



Obr. 4.2: Rozměrový výkres vyrobeného vzorku – nýt

Vyrobena byly celkem 3 vzorky nově navrženého aktuátoru. Výroba proběhla tzv. soustružením, což je proces, při kterém byl vzorek materiálu, kterým je v našem případě automatová ocel ve tvaru válce o průměru 4 mm, připnut do vřetena soustruhu a pomocí ručního posuvu soustružnického nože dostával materiál, neboli obrobek, požadovaný tvar.

Nově vyrobená kotva a nýt byly následně vyměněny za stávající komponenty aktuátoru, což znamenalo nejprve vyjmutí stávající kotvy a nýtu a vsazení nově vyrobených vzorků, čímž vznikl aktuátor nový. Celková cena výroby nových částí aktuátoru byla přibližně 25 000 Kč a jejich výroba trvala přibližně týden.

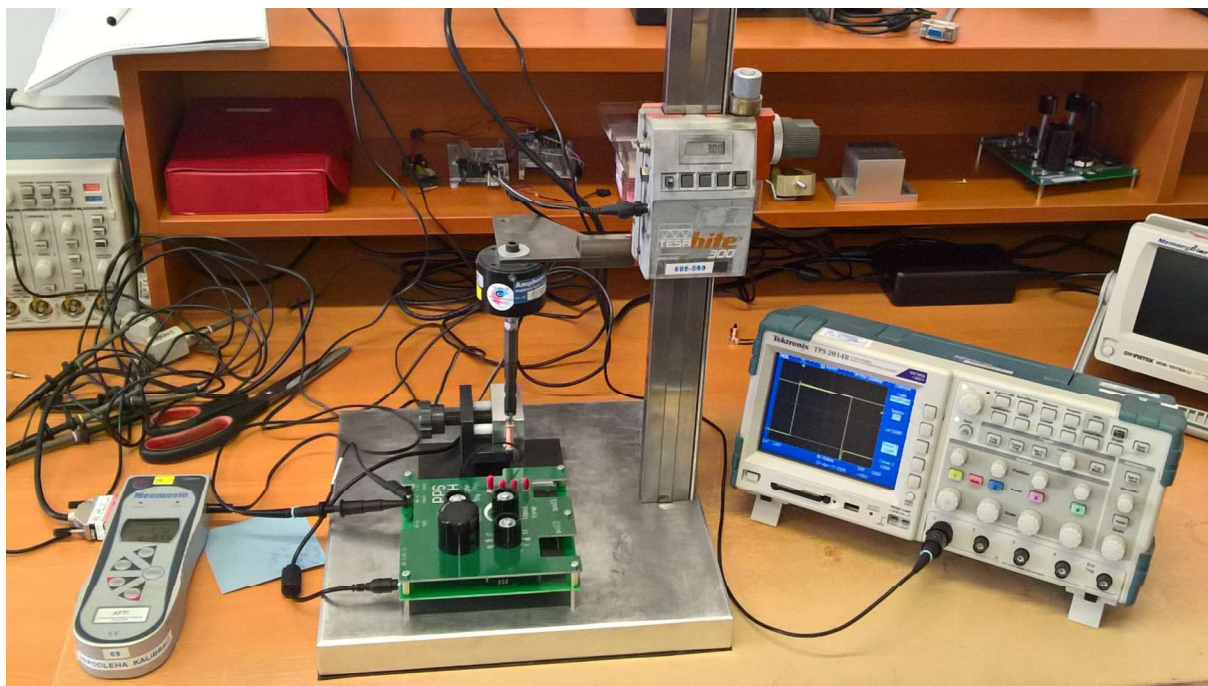
4.2 Testování

Testování vyrobených vzorků aktuátoru proběhlo v testovací laboratoři společnosti Amphenol. Proběhlo testování silových účinků, jejichž výsledkem jsou statické charakteristiky. Dále došlo k testování odemykacího napětí čtečky s nově vyrobeným aktuátorem. Obě tyto měření jsou popsány v následujících kapitolách.

4.2.1 Měření statické charakteristiky

Měření statické charakteristiky probíhalo na zařízení, kterým je ve společnosti Amphenol testována kvalita dodaných aktuátorů. Zařízení se skládá ze siloměru se speciálním úchytem pro zachycení kotvy aktuátoru a posuvného zařízení, kterým je nastavována potřebná vzduchová mezera mezi kotvou a nýtem. Dále byl potřeba zdroj napěťových pulsů, kterým se aktivoval aktuátor přivedením pulsu na piny. Při měření byla nejprve nastavena vzduchová mezera, poté byl aktivován napěťový zdroj, čímž byl spuštěn aktuátor a ze siloměru byla odečtena hodnota. Měření probíhalo pro vzduchovou mezeru od 0,2 do 3,0 mm s krokem 0,2 mm a testovány byly všechny 3 nově vyrobené vzorky aktuátoru a dále 3 náhodně vybrané stávající aktuátory, aby mohly být výsledky porovnány. Pro představu je zařízení pro měření statické charakteristiky zobrazeno na *Obr. 4.3*.

Výsledné hodnoty z měření jsou zapsány v *Tabulce 4.1* a vykresleny do grafů na *Obr. 4.4 – 4.10*.

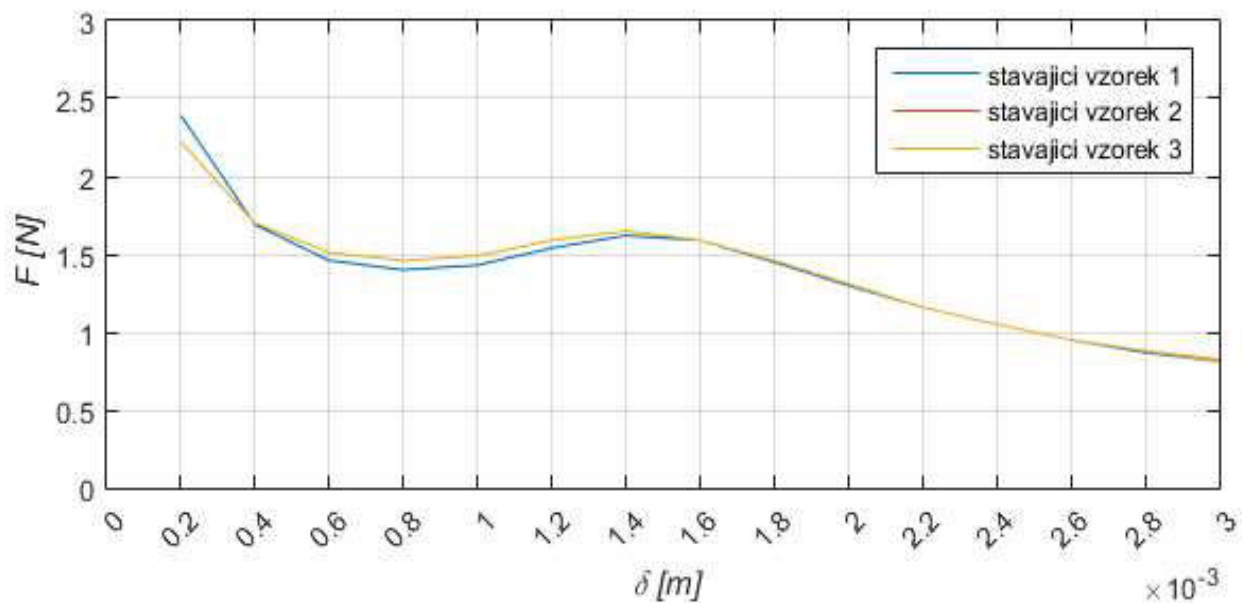


Obr. 4.3: Zařízení pro měření statické charakteristiky

Tab. 4.1: Výsledné hodnoty z měření statických charakteristik

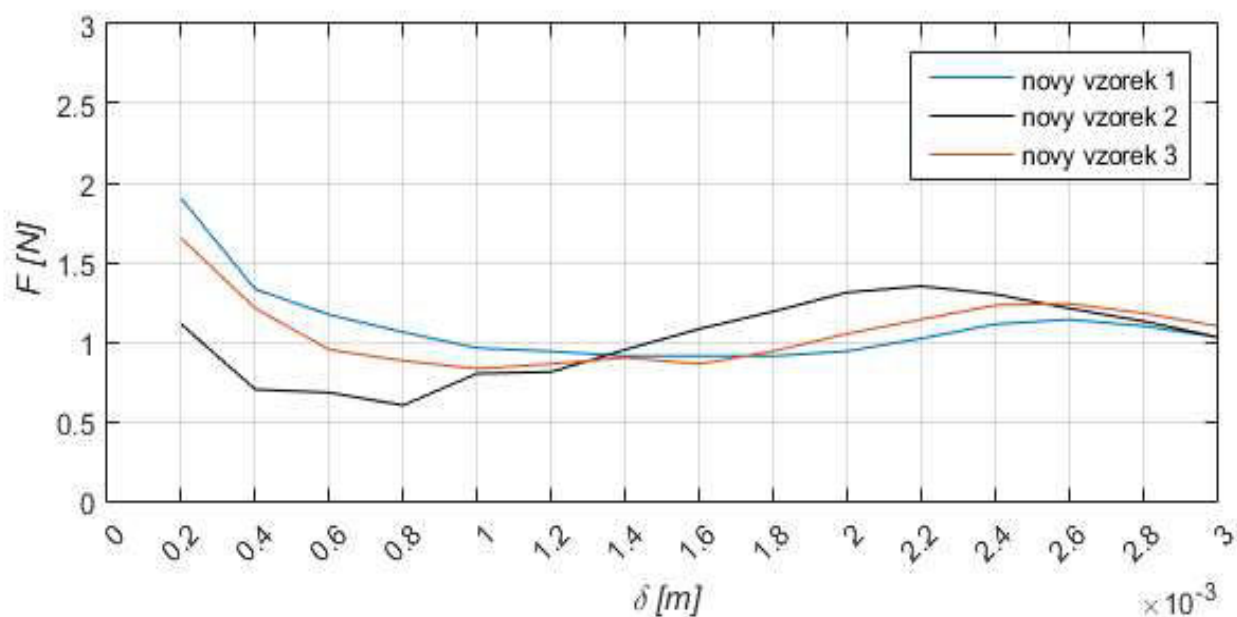
s [mm]	Nový			Stávající			Kombinace	
	1 [N]	2 [N]	3 [N]	1 [N]	2 [N]	3 [N]	A [N]	B [N]
0,20	1,90	1,11	1,65	2,39	2,28	2,22	1,33	1,50
0,40	1,33	0,70	1,21	1,69	1,67	1,70	1,10	1,35
0,60	1,17	0,68	0,95	1,46	1,48	1,51	1,05	1,30
0,80	1,06	0,60	0,88	1,40	1,44	1,46	1,05	1,29
1,00	0,96	0,80	0,83	1,43	1,46	1,49	1,10	1,37
1,20	0,94	0,81	0,86	1,54	1,56	1,59	1,16	1,55
1,40	0,91	0,95	0,90	1,62	1,62	1,65	1,22	1,63
1,60	0,91	1,08	0,86	1,59	1,55	1,59	1,24	1,41
1,80	0,91	1,19	0,94	1,45	1,43	1,46	1,19	1,30
2,00	0,94	1,31	1,05	1,30	1,28	1,31	1,11	1,11
2,20	1,02	1,35	1,14	1,16	1,16	1,16	1,03	0,99
2,40	1,11	1,30	1,23	1,05	1,04	1,05	0,95	0,90
2,60	1,14	1,21	1,24	0,95	0,95	0,95	0,88	0,82
2,80	1,10	1,13	1,18	0,87	0,88	0,88	0,83	0,79
3,00	1,03	1,03	1,10	0,81	0,82	0,81	0,77	0,72

V grafu na Obr.4.4 jsou naměřené statické charakteristiky stávajících vzorků. V grafu jsou diagramy tří různých vzorků, které byly před měřením označeny čísly 1, 2 a 3.



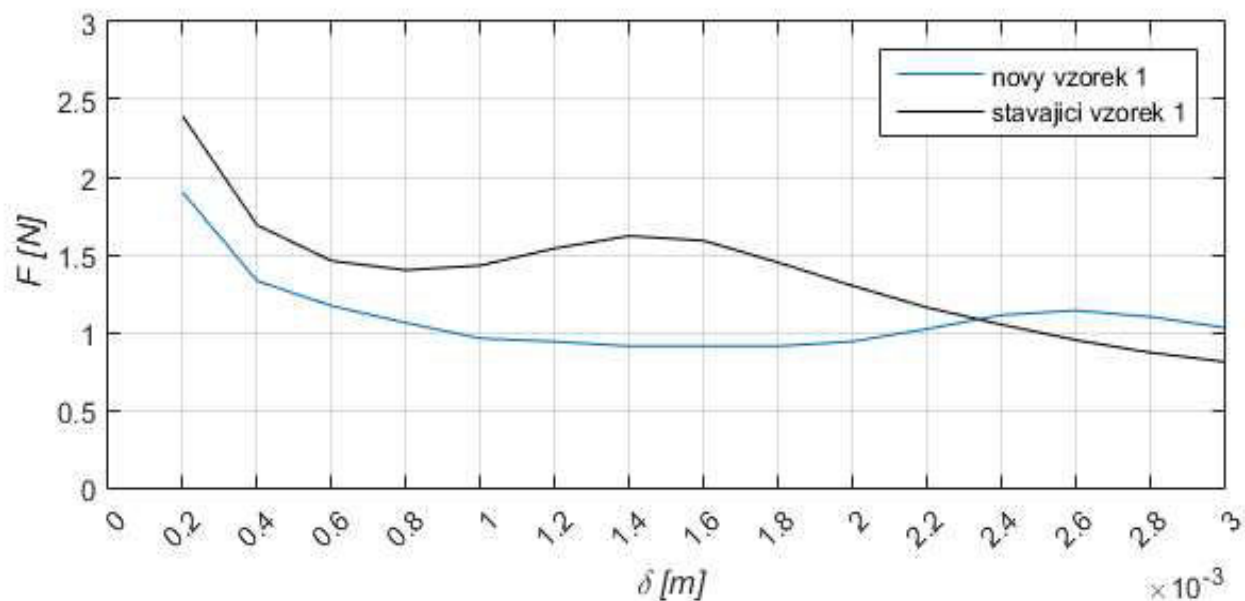
Obr. 4.4: Statické charakteristiky stávajících aktuátorů

Graf na Obr.4.5 zobrazuje statické charakteristiky vzorků, které byly navrženy v této diplomové práci za účelem snížení otevíracího napětí čtečky čipových karet. Jedná se taktéž o 3 vzorky, které byly před měřením označeny čísly 1, 2 a 3.



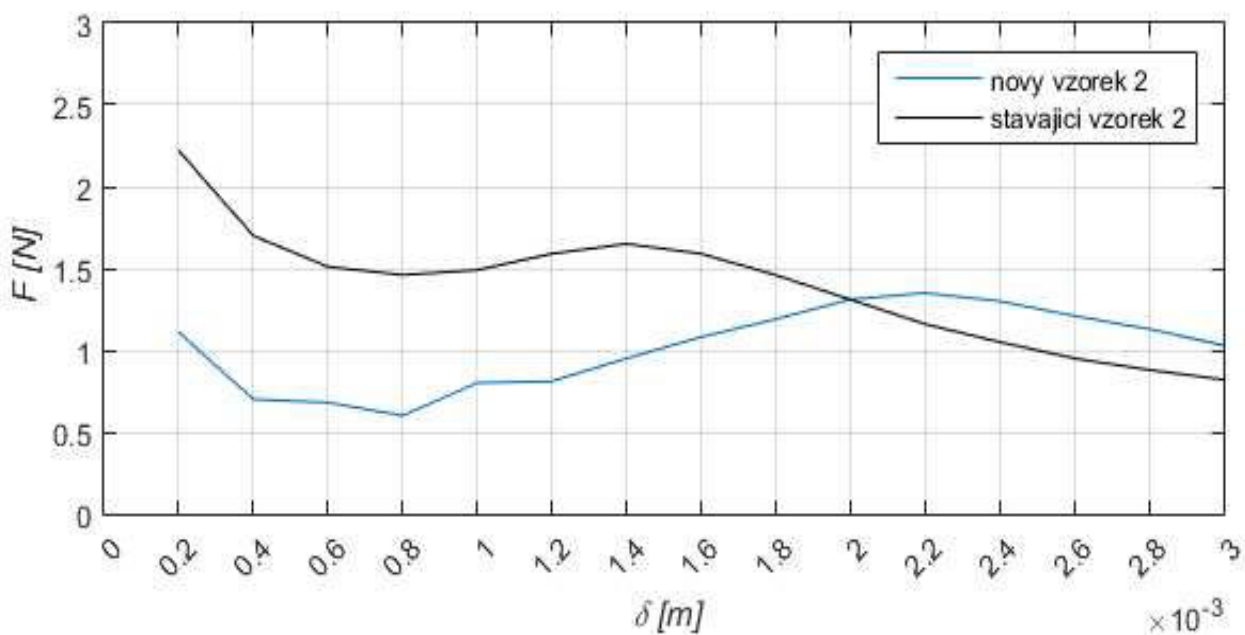
Obr. 4.5: Statické charakteristiky nových aktuátorů

Graf na Obr. 4.6 zobrazuje statické charakteristiky nového a původního aktuátoru. Jedná se o vzorky s číslem 1.



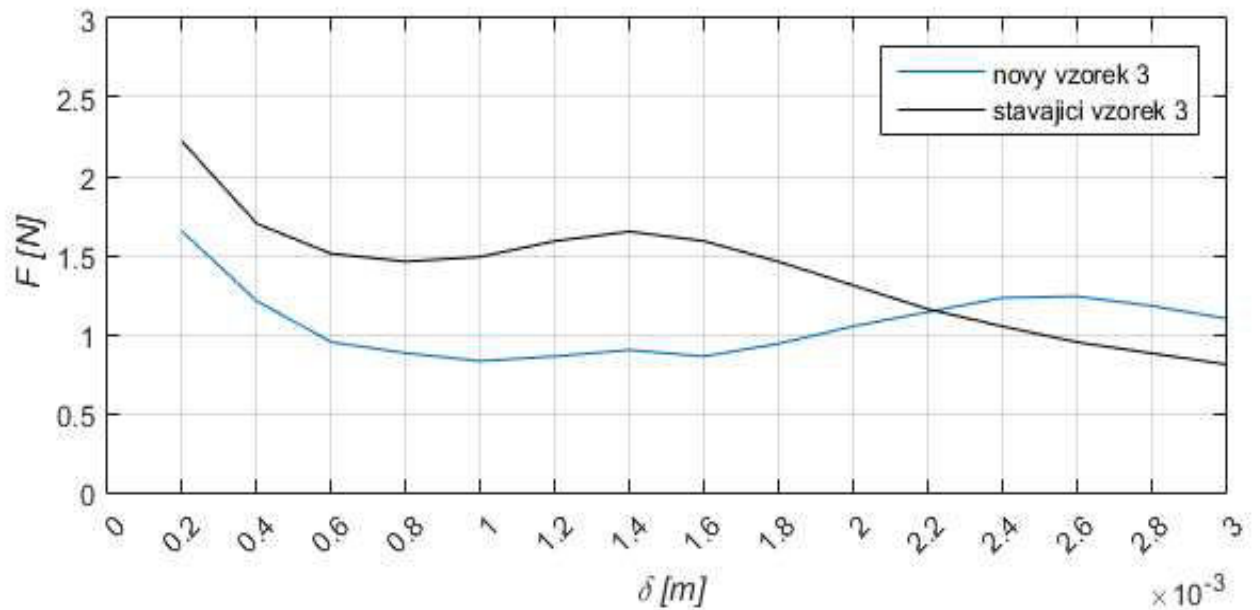
Obr. 4.6: Statické charakteristiky nového a stávajícího vzorku č. 1

V grafu na Obr. 4.7 jsou statické charakteristiky nového a původního aktuátoru, v tomto případě se jedná o vzorky s číslem 2.



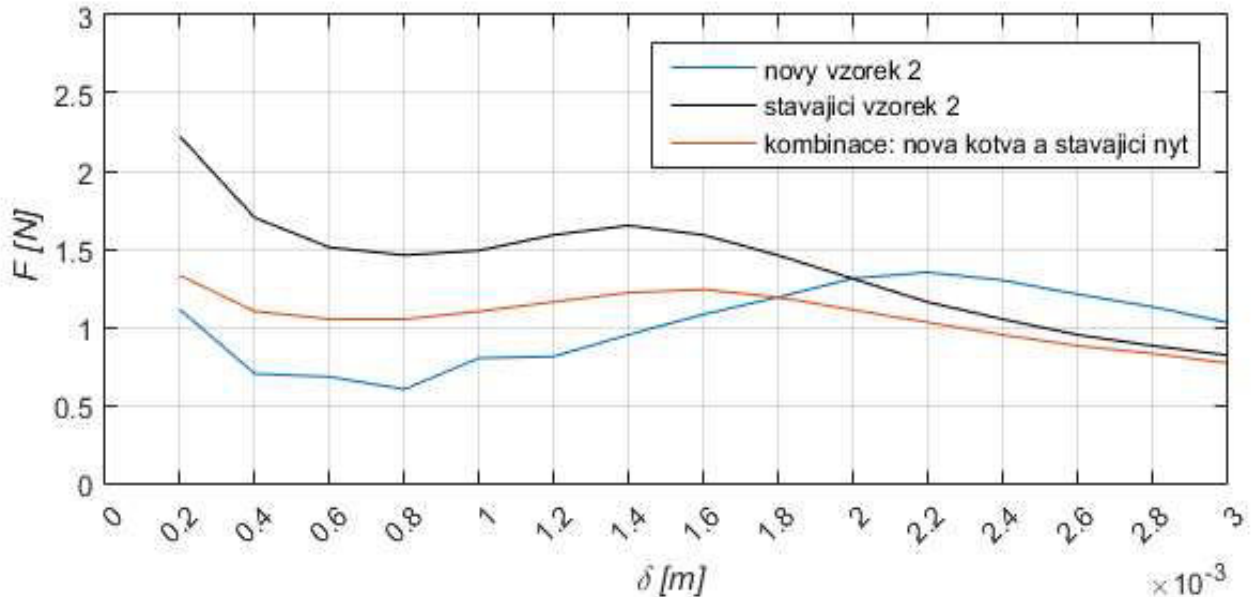
Obr. 4.7: Statické charakteristiky nového a stávajícího vzorku č. 2

V grafu na Obr. 4.8 jsou statické charakteristiky nového a původního aktuátoru. Zde se jedná o vzorky s číslem 3.



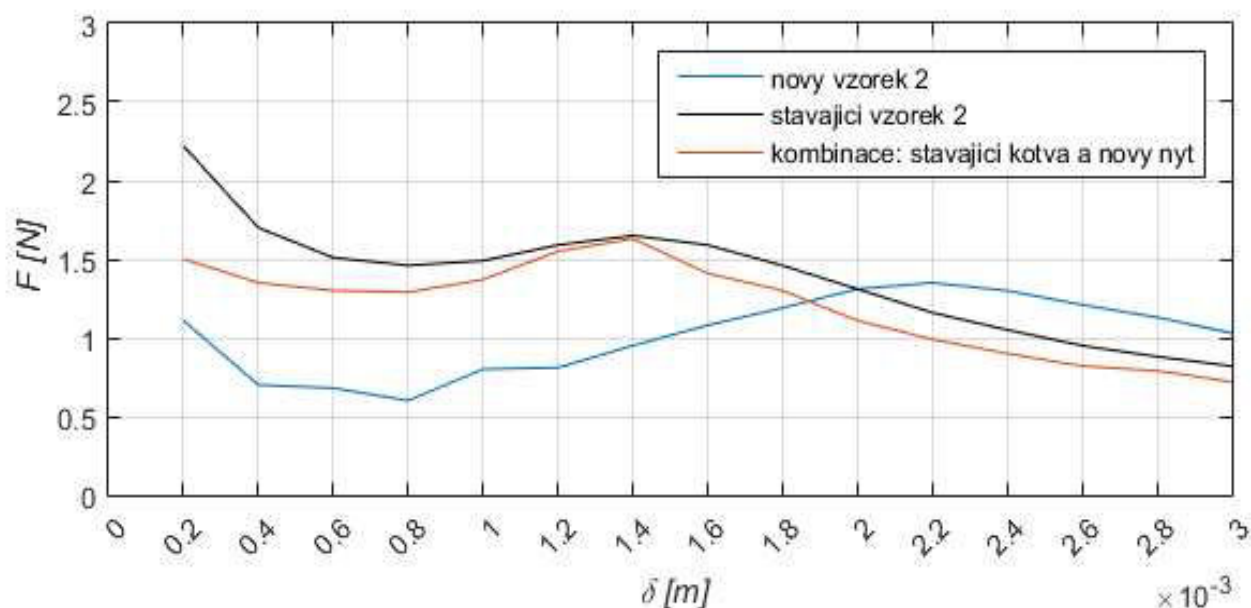
Obr. 4.8: Statické charakteristiky nového a stávajícího vzorku č. 3

Graf na Obr. 4.9 zobrazuje statické charakteristiky vzorků s číslem 2 a dále kombinaci těchto vzorků, která je v tabulce naměřených hodnot označena písmenem A, což je kombinace stávajícího nýtu a nově vyrobené kotvy.



Obr. 4.9: Statické charakteristiky s kombinací A

Poslední z grafů výsledků měření je na Obr. 4.10. Jedná se o statické charakteristiky vzorků s číslem 2 a kombinace těchto vzorků, která je v tabulce naměřených hodnot označena písmenem B, což je kombinace stávající kotvy a nově vyrobeného nýtu.



Obr. 4.10: Statické charakteristiky s kombinací B

4.2.2 Měření odemykacího napětí čtečky

Měření odemykacího napětí čtečky čipových karet proběhlo také v měřicí laboratoři společnosti Amphenol. Při tomto měření se testuje minimální amplituda pulsu, při které dojde k odemčení čtečky a tedy k vysunutí karty, která byla zasunuta ve čtečce. K tomuto měření byl potřeba zdroj napěťových pulzů, na němž byla zvyšována či snižována amplituda tak, abychom našli nejmenší napětí, při kterém dojde k otevření čtečky. Výsledky tohoto měření obsahuje *tabulka 4.2*.

Tab. 4.2: Výsledné hodnoty měření odemykacího napětí čtečky

Aktuátor:	číslo vzorku:	Napětí [V]
Nový	1	7,8
	2	7,8
	3	7,6
Stávající	1	2,8
	2	2,7
	3	2,9

4.3 Zhodnocení výsledků měření

V této kapitole jsou zhodnoceny výsledky laboratorních testů silových účinků vzorků aktuátoru. Na první pohled je patrné, že se průběhy charakteristik liší od simulovaných průběhů. Dle předpokladů je ve skutečnosti síla nižší, než je tomu u průběhů získaných simulací, což je vysvětleno v kapitole 3.2.

V grafech na *Obr. 4.6 – 4.8* jsou porovnávány silové průběhy nových a stávajících vzorků aktuátoru. V nejlepším případě, což je při porovnávání vzorků číslo 2, vychází silový průběh nového aktuátoru vyšší při vzduchové mezeře větší než 2 mm, v ostatních případech je tomu tak až za hranicí pracovní oblasti.

Při bližším prozkoumání grafů na *Obr. 4.4 a 4.5* lze konstatovat, že nově vyrobené vzorky aktuátorů nebyly vyrobeny s takovou přesností, jako stávající aktuátory. V případě velikosti vzduchové mezery 0,4 mm je rozdíl silového působení nových vzorků číslo 1 a 2 téměř 0,8 N, zatímco u stávajících vzorků je rozdíl mezi silami minimální v celém průběhu charakteristiky. Takový rozptyl průběhů lze vysvětlit typem výroby, neboť stávající aktuátory pochází ze sériové výroby, zatímco vzorky nově navržených aktuátorů byly vyrobeny ručním soustružením.

Konstrukční odlišností mezi stávajícími a nově navrženými aktuátory je způsob spojení nýtu a jha. V případě sériové výroby je do jha vyvrtán otvor, do kterého je následně vsazen nýt a nakonec je přesahující část nýtu zalisována do jha, čímž je vyplněn prostor mezi těmito dvěma částmi. V případě výroby navržených vzorků nebyla možnost rozlisování přesahující části nýtu, proto je otázkou, jak velký vliv má tento fakt na silové působení, neboť v případě nových vzorků se může vyskytovat větší magnetický odpor v přechodu těchto dvou částí, což způsobuje horší přechod magnetického indukčního toku a tedy i silového působení.

Další zhodnocení jsme získali měřením minimálního odemykacího napětí čtečky. V *tabulce 1.1* je stanovena hodnota minimálního odemykacího napětí jako 3,6 V, což při zhodnocení výsledků měření uvedených v *tabulce 4.2* splňují pouze stávající aktuátory. Odemykací napětí u všech nově navržených aktuátorů tuto hodnotu přesahuje více než dvojnásobně.

5 Závěr

Předkládaná diplomová práce se zabývá optimalizací otevírací charakteristiky čtečky čipových karet. Práce je rozdělena do několika částí zabývajících se teoretickým popisem, simulacemi, návrhem optimalizace a laboratorním testováním solenoidového aktuátoru, který je součástí čtečky čipových karet vyráběné společností Amphenol-Tuchel Electronics GmbH.

V úvodu práce je popsán stávající stav čtečky čipových karet a solenoidového aktuátoru, který je základním prvkem otevíracího mechanismu čtečky. V dalších odstavcích je teoretický rozbor funkce impulzního solenoidu, v rámci čehož byl popsán model magnetického pole, dynamické charakteristiky a parametry ovlivňující otevírací charakteristiku. Pro simulaci dynamických parametrů byl vytvořen skript v programu MATLAB, který je součástí přílohy.

Další část předkládané práce se zabývá návrhem optimalizace solenoidového aktuátoru. Pro tyto účely byl vytvořen model aktuátoru v programu Agros2D, kde byly simulovány silové účinky elektromagnetického pole aktuátoru na kotvu. Vzhledem k požadavkům a možnostem společnosti Amphenol bylo navrženo několik variant možných úprav aktuátoru, z nichž byl vytvořen návrh nového aktuátoru, který byl vyroben a následně laboratorně otestován. Výsledky testování jsou popsány v kapitole 4.

Cílem práce bylo navrhnout takovou úpravu aktuátoru, aby došlo ke zmenšení minimálního odemykacího napětí čtečky čipových karet. Z navržených variant se z hlediska optimalizace nejlépe jevila změna materiálu a prodloužení zakončení kotvy. Vzhledem k nemožnosti výroby vzorku s použitím materiálu s vyšší permeabilitou byly vyrobeny pouze vzorky s prodlouženým zakončením kotvy. Zhodnocení výsledků laboratorního testování je popsáno v kapitole 4.3. Z výsledků testování minimálního odemykacího napětí čtečky vyplývá zhoršení otevírací charakteristiky oproti stávajícím aktuátorům. Otázkou je, zda byl při výrobě nově navržených aktuátorů použit stejný materiál jako při výrobě stávajících aktuátorů, neboť automatových ocelí existuje mnoho variací s různou permeabilitou a jejich přesné složení nebylo známo jak v případě stávajících, tak v případě nových aktuátorů.

Dále také stojí za zvážení, zda je opravdu potřeba otevírací charakteristiku stávajících aktuátorů optimalizovat, neboť minimální odemykací napětí je u všech tří testovaných vzorků pod hranicí 3,6 V, což je předepsané minimální odemykací napětí.

Vzhledem k potřebám a možnostem společnosti Amphenol považuji stávající aktuátor za dobře navržený a dostačující.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MAYER D., ULRICH B.: Elektromagnetické aktuátory. BEN - technická literatura, Praha, 2008, ISBN 978-80-7300-216-9, EAN 9788073002169.
- [2] MAYER D.: Teorie elektromagnetického pole 1.díl. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2004, ISBN 80-7082-826-9.
- [3] Amphenol – Tüchel Electronics GmbH Katalog [online] – [cit. 1. 12. 2016]. Dostupné z URL: <https://www.amphenol.de/downloads/19_smartcardconnectors_2013_09.pdf>.
- [4] Techmania Science Center – Eduportál [online] – [cit. 25. 3. 2017] Dostupné z URL: <<http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/sila/tiha-tihova-sila>>
- [5] Nabla – fyzika [online] – [cit. 26. 3. 2017] Dostupné z URL: <<http://www.nabla.cz/obsah/fyzika/mechanika/treci-sila-smykove-treni.php>>
- [6] EPP plasty [online] – [cit. 26. 3. 2017] Dostupné z URL: <<http://www.eppplasty.cz/ptfe.php>>
- [7] Tachografy – emise [online] – [cit. 6. 4. 2017] Dostupné z URL: <<http://www.tachografy-rk.cz/tachografy/digitalni-tachografy/spravne-zachazeni-s-digitalnim-tachografem-ridic/>>
- [8] Biconusa – DC solenoids [online] – [cit. 6. 4. 2017] Dostupné z URL: <http://www.biconusa.com/pdfs/BICRON_DC_Solenoids.pdf>
- [9] MAYER D.: Aplikovaný elektromagnetismus. Kopp, České Budějovice, 2012, ISBN 978-80-7232-436-1.
- [10] LEPIL O., ŠEDIVÝ P.: Fyzika pro gymnázia – Elektřina a magnetismus. Prometheus, Praha, 2008, ISBN 978-80-7196-202-1.
- [11] Biconusa – DC solenoids [online] – [cit. 6. 4. 2017] Dostupné z URL: <http://www.biconusa.com/pdfs/BICRON_DC_Solenoids.pdf>
- [12] BENEŠOVÁ Z., LEDVINOVÁ M.: Základy elektrických obvodů v příkladech. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2012, ISBN 978-80-261-0140-6.
- [13] Permeabilita materiálů [online] – [cit. 24. 3. 2017] Dostupné z URL: <<https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=60094>>

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Čtečka čipových karet	10
Obr. 1.2: Pushmatic – způsob manipulace s čipovou kartou.....	10
Obr. 1.3: Princip otevření čtečky, zleva 1., 2. a 3. stav.....	11
Obr. 1.4: Model s popisem částí aktuátoru.....	12
Obr. 1.5: (Zleva) 1., 2. a 3. stav pohybu jádra při odemykání čtečky.....	12
Obr. 2.1: Nákres řešeného aktuátoru jako vstup do Agros2D.....	14
Obr. 2.2: Rozdělení definiční oblasti na podoblasti.....	15
Obr. 2.3: Rozložení magnetického pole aktuátoru pro (zleva) otevřený aktuátor a uzavřený aktuátor.....	16
Obr. 2.4: Závislost indukčnosti na vysunutí jádra.....	19
Obr. 2.5: Statická charakteristika modelovaného stávajícího aktuátoru v Agros2D.....	20
Obr. 2.6: Grafy závislosti (zleva) napětí a proudu na čase.....	23
Obr. 2.7: Grafy závislosti (zleva) dráhy a rychlosti kotvy solenoidu na čase.....	23
Obr. 2.8: Schématické rozložení dílčích sil.....	24
Obr. 3.1: Statické charakteristiky pro různé permeability materiálu.....	27
Obr. 3.2: Statické charakteristiky pro různé objemy jha.....	28
Obr. 3.3: Tvary zakončení kotvy, (zhora) stepped, šikmý a plochý.....	28
Obr. 3.4: Statické charakteristiky pro různé tvary zakončení kotvy.....	29
Obr. 3.5: (zhora) kotva s původní a s prodlouženou délkou zakončení.....	29
Obr. 3.6: Statické charakteristiky pro různé délky zakončení konce kotvy.....	30
Obr. 3.7: Statické charakteristiky pro změny délky kotvy.....	30
Obr. 3.8: Statické charakteristiky pro změny průměru kotvy.....	31
Obr. 4.1: Rozměrový výkres vyrobeného vzorku – kotva.....	35
Obr. 4.2: Rozměrový výkres vyrobeného vzorku – nýt.....	35
Obr. 4.3: Zařízení pro měření statické charakteristiky.....	37
Obr. 4.4: Statické charakteristiky stávajících aktuátorů.....	38
Obr. 4.5: Statické charakteristiky nových aktuátorů.....	38
Obr. 4.6: Statické charakteristiky nového a stávajícího vzorku č. 1.....	39
Obr. 4.7: Statické charakteristiky nového a stávajícího vzorku č. 2.....	39
Obr. 4.8: Statické charakteristiky nového a stávajícího vzorku č. 3.....	40
Obr. 4.9: Statické charakteristiky s kombinací A.....	40
Obr. 4.10: Statické charakteristiky s kombinací B.....	41

Seznam tabulek

Tab. 1.1: Předepsané parametry aktuátoru.....	12
Tab. 2.1: Tabulka podoblastí s přiřazenými rovnicemi.....	16
Tab. 2.2: Tabulka materiálových parametrů použitých v Agros 2D.....	17
Tab. 3.1: Materiály použité při simulaci aktuátoru.....	26
Tab. 3.2: Tabulka hodnot sil ze simulací možných optimalizací.....	32
Tab. 3.3: Permeability vybraných materiálů	33
Tab. 4.1: Výsledné hodnoty z měření statických charakteristik.....	37
Tab. 4.2: Výsledné hodnoty měření odemykacího napětí čtečky.....	41

Příloha

Příloha A – výpočet dynamických parametrů v MATLAB

```

function [] = aktuator()
clear
clc

s=linspace(0.0002,0.0024,200);
U0 = 4.9;
R = 1.5;
L = 0.1564*s + 0.00081259;
tau = L./R;
F = 3.280163490829268e+20 * s.^7 - 3.403019650837314e+18*s.^6 +
1.4056990669053e+16*s.^5 - 28996724997308.99*s.^4 + 30942638665.5692*s.^3 -
16557987.4417*s.^2 + 4775.5416*s + 0.38;

m = 1.32e-3;

function disvdt = rce(t, isv)
    i = isv(1);
    s = isv(2);
    v = isv(3);

    L = 0.000154*s + 0.0008;
    F = 3.280163490829268e+20 * s.^7 - 3.403019650837314e+18*s.^6 +
1.4056990669053e+16*s.^5 - 28996724997308.99*s.^4 + 30942638665.5692*s.^3 -
16557987.4417*s.^2 + 4775.5416*s + 0.38;

    di = [(U0 - R*i) / L];
    ds = v;
    dv = F/m;

    disvdt = [di;ds;dv];
end

function stop = naraz(t, isv)
    stop = false;
    if isv(2) >= 2.2e-3
        stop = true;
    end
end

tau = 5e-3;
n = 1e5;
[t, isv] = runge_kutta(@rce, [0, tau], [0,0,0], n, @naraz);

i = isv(:,1);
s = isv(:,2);
v = isv(:,3);

UR = R*i;
UL = U0 - UR;

subplot(1, 4, 1);
plot(t, UL);
grid on;
xlabel('t (s)');
ylabel('U (V)');

xlim([0, 3e-3]);

```

```
subplot(1, 4, 2);
plot(t, i);
grid on;
xlabel('t (s)');
ylabel('I (A)');
xlim([0, 3e-3]);

subplot(1, 4, 3);
plot(t, s);
grid on;
xlabel('t (s)');
ylabel('s (m)');
xlim([0, 3e-3]);

subplot(1, 4, 4);
plot(t, v);
grid on;
xlabel('t (s)');
ylabel('v (m/s)');
xlim([0, 3e-3]);
end
```

Příloha B – Funkce Runge-Kutta pro výpočet dynamických parametrů v MATLAB

```
function [x, y] = runge_kutta(fce, interval, y0, n, stop)
a = interval(1);
b = interval(2);
x = linspace(a, b, n+1)';
h = (b-a)/n;
y = zeros(n+1, length(y0));

y(1,:) = y0;
for i = 1 : (length(x) - 1)
    if stop(x(i), y(i,:))
        y = y(1:i, :);
        x = x(1:i);
        break
    end

    k_1 = fce(x(i), y(i,:))';
    k_2 = fce(x(i) + 1/2*h, y(i,:) + 1/2*h*k_1)';
    k_3 = fce(x(i) + 1/2*h, y(i,:) + 1/2*h*k_2)';
    k_4 = fce(x(i) + h, y(i,:) + h*k_3)';

    y(i+1,:) = y(i,:) + h*(k_1 + 2*k_2 + 2*k_3 + k_4)/6;
end
end
```