

# Simulační model a identifikace voice coil servopohonu

Autor: Bc. Tomáš Hladovec

Vedoucí práce: Nečas Martin, Ing. MSc., Ph.D

**Abstrakt:** Tato práce pojednává o vytvoření simulačního modelu voice coil servopohonu a následném nalezení parametrů simulačního modelu tak, aby byl vytvořen model pro konkrétního voice coil servopohon. Data pro nalezení parametrů byla získána pomocí experimentů na daném zařízení. Identifikace má umožnit nalezení ideálního nastavení řízení daného servopohonu pro danou třídu aplikací např. PTP (Point to Point) řízení.

**Klíčová slova:** pohon, servopohon, voice coil servopohon, simulační model

## 1 Úvod

Jedním z nejrozšířenějších typů pohonů jsou dnes pohony elektromechanické. Jejich funkcí je řízená přeměna elektrické energie na energii mechanickou. Můžeme se na ně tedy dívat jako na zařízení, do kterých když přivedeme elektrický proud, tak nám ho převedou na sílu (moment). Tento pohled může být v jistých případech dostačující, mnohdy však k tomu abychom dosáhli požadovaných výsledků, musíme pochopit, jaké děje vlastně uvnitř pohonu probíhají. Případně nám toto pochopení může umožnit dosáhnout výrazně lepších výsledků při užívání elektromechanických pohonů. Cílem této práce bylo vytvoření co možná nejpřesnějšího modelu elektromagnetického pohonu, konkrétně pak voice coil servopohonu. Aby bylo možné tento úkol splnit, bylo nejprve nutné se seznámit s problematikou elektromagnetických pohonů respektive servopohonů.

Následně bylo využito možnosti provést měření na konkrétním voice coil servopohonu, který byl dodán firmou InoMech. Data získaná z experimentu na tomto zařízení byla poté použita k nalezení parametrů v simulačních modelech tohoto voice coil servopohonu.

### 1.1 Základní princip elektromagnetických pohonů

#### 1.1.1 Síla působící na vodič v magnetickém poli

Je-li vodič v magnetickém poli, působí magnetické síly na elektrony pohybující se uvnitř vodiče. Protože elektrony nemohou vodič opustit, přenášejí se tyto síly na látku vodiče, takže na vodič jako celek působí síla. Magnetická síla působící na elektrony se nazývá Lorentzova síla a je kolmá jak na proud, tak na magnetický tok. Matematicky lze tuto sílu popsat následovně:

$$\vec{F} = q \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right). \quad (1)$$

Kde:  $\vec{F}$  - síla,  $q$  - elektrický náboj,  $\vec{v}$  - rychlost náboje,  $\vec{E}$  - intenzita elektrického pole,  $\vec{B}$  - magnetická indukce. Tento vzorec můžeme přepsat do tvaru:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} = \vec{F}_{el} + \vec{F}_{mg}, \quad (2)$$

$\vec{F}_{el}$  je příspěvek elektrického pole,  $\vec{F}_{mg}$  je příspěvek magnetické síly. Rychlost náboje můžeme napsat ve tvaru  $\vec{v} = d\vec{x}/dt$ , když tuto závislost dosadíme do rovnice (2) přepsané do diferenciálního tvaru a zanedbáme  $\vec{F}_{el}$ , která je obvykle výrazně menší než síly magnetické, dostaneme:

$$d\vec{F} = dq \frac{d\vec{x}}{dt} \times \vec{B} = \frac{dq}{dt} d\vec{x} \times \vec{B} = i d\vec{x} \times \vec{B} \Rightarrow \vec{F} = \int i \left( d\vec{x} \times \vec{B} \right), \quad (3)$$

kde  $i$  je proud a  $d\vec{x}$  je diferenciální prvek délky vodiče v magnetickém poli.

Za předpokladu, že proud ani magnetická indukce se na celé délce vodiče nemění, vychází velikost síly pro přímý vodič o délce  $l$ , který svírá se směrem indukce úhel  $\alpha$ :

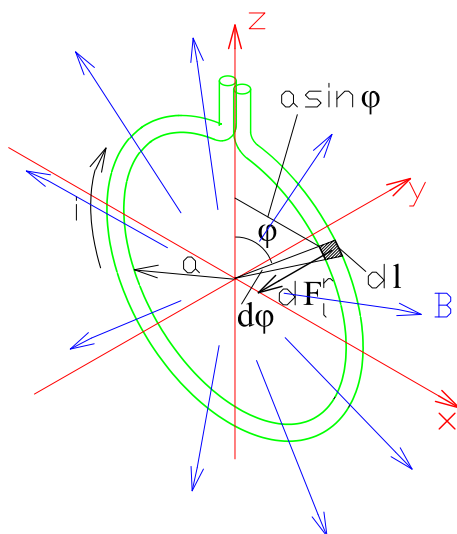
$$F = iBl \sin \alpha. \quad (4)$$

Tento vzorec se nazývá Ampérův silový zákon. Je-li proudovodič kolmý k indukčním čarám, pak je síla  $F$  maximální a platí pro ni:

$$F = iBl. \quad (5)$$

### 1.1.2 Síla působící na kruhovou smyčku v „radiálním“ magnetickém poli

Smyčka s poloměrem  $a$  v rovině  $xz$  je umístěna v „radiálním“ homogenním magnetickém poli o indukci  $B$  viz Obr. 1.



Obr. 1: Kruhová smyčka v „radiálním“ magnetickém poli<sup>1</sup>

Smyčkou prochází proud  $i$ , který je v tomto uspořádání pro každé  $\varphi$  kolmý k indukci  $B$ . Síla  $dF_l^r$  působící na element smyčky  $dl (= a d\varphi)$  je kolmá k rovině  $xz$  a směřuje proti směru osy  $y$ . Její velikost je podle vzorce (4),  $dF_l^r = iBa d\varphi$ .

Celkovou sílu působící na smyčku dostaneme integrací  $\varphi$  od 0 do  $2\pi$

$$F_l^r = iBa \int_0^{2\pi} d\varphi = iBa2\pi = iBl, \quad (6)$$

kde  $l = 2\pi a$  je délka smyčky.

### 1.1.3 Síla působící na solenoid v „radiálním“ magnetickém poli

Síla na solenoidu o  $N$  závitěch v homogenním „radiálním“ magnetickém poli o indukci  $B$  je popsána vzorcem:

$$F_c^r = NiBl \sin \alpha. \quad (7)$$

Ve vztahu je  $\alpha$  úhel, který svírá osa solenoidu se směrem pole. Síla je maximální, když indukce je rovnoběžná s rovinami závitů (kolmá k podélné ose solenoidu):

$$F_c^r = NiBl. \quad (8)$$

<sup>1</sup>magnetická indukce  $B$  je pro přehlednost zobrazena jen v rovině  $xz$

### 1.1.4 Indukované napětí ve vodiči

Pohybem vodiče (cívky) v magnetickém poli vzniká indukované elektrické pole. Pro začátek budeme uvažovat, že magnetické pole je příčné (příčným magnetickým polem označíme homogenní pole, jehož indukční čáry jsou kolmé k rychlosti pohybu vodiče  $v$ ), časově neměnné o indukci  $\vec{B}$  ( $= konst$ ). Příslušné indukované elektromotorické napětí lze popsat vztahem:

$$U_i^B = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (9)$$

kde  $d\Phi$  je element magnetického indukčního toku. Při zahrnutí počátečního předpokladu ( $\vec{B} = konst$ ,  $\vec{B} \perp \vec{v}$ ), bude indukované elektrické napětí podél vodiče homogenní a můžeme vztah (9) přepsat do tvaru:

$$U_i^B = -vBl. \quad (10)$$

### 1.1.5 Indukované napětí solenoidu v „radiálním“ magnetickém poli

Pro kruhovou smyčku v „radiálním“ magnetickém poli viz Obr. 1, kterou by neprotékal proud  $i$  a pohybovala se rychlostí  $v$  kolmo k rovině  $xz$  (směrem k nám). Vyjdeme z rovnice (9) přepsané do diferenciálního tvaru:

$$dU_{il}^{Br} = -d\left(\frac{d\Phi}{dt}\right) = -d\left(\frac{BdS}{dt}\right) = -Ba\frac{drd\varphi}{dt} = -Bavd\varphi. \quad (11)$$

Po integraci přes  $\varphi$  od 0 do  $2\pi$  dostaneme celkové indukované napětí ve smyčce:

$$U_{il}^{Br} = -Bav \int_0^{2\pi} d\varphi = -Bav [\varphi]_0^{2\pi} = -Bav2\pi = -Bvl, \quad (12)$$

kde  $l$  je délka vodiče ve smyčce. Pro stejně umístěný solenoid platí podobný vztah:

$$U_{is}^{Br} = -NBvl, \quad (13)$$

kde  $N$  je počet závitů cívky.

### 1.1.6 Indukované napětí ve vodiči pro $B \neq konst$ .

Dosud jsme uvažovali, že magnetická indukce je konstantní. V případě, že máme například cívku umístěnou v magnetickém poli, vytvořeném permanentními magnety, je celkový magnetický tok součtem magnetického toku od permanentního magnetu a magnetického toku vytvořeném proudem protékajícím cívku  $\Phi = \Phi_p + \Phi_c$ . Je-li proud v cívce proměnný je i  $\Phi_c$  nekonstantní v čase, tentokrát však ne změnou plochy  $\vec{dS}$ , ale změnou magnetické indukce  $B$ . Tento magnetický tok  $\Phi_c$  lze popsat vztahem:

$$\Phi_c = Li, \quad (14)$$

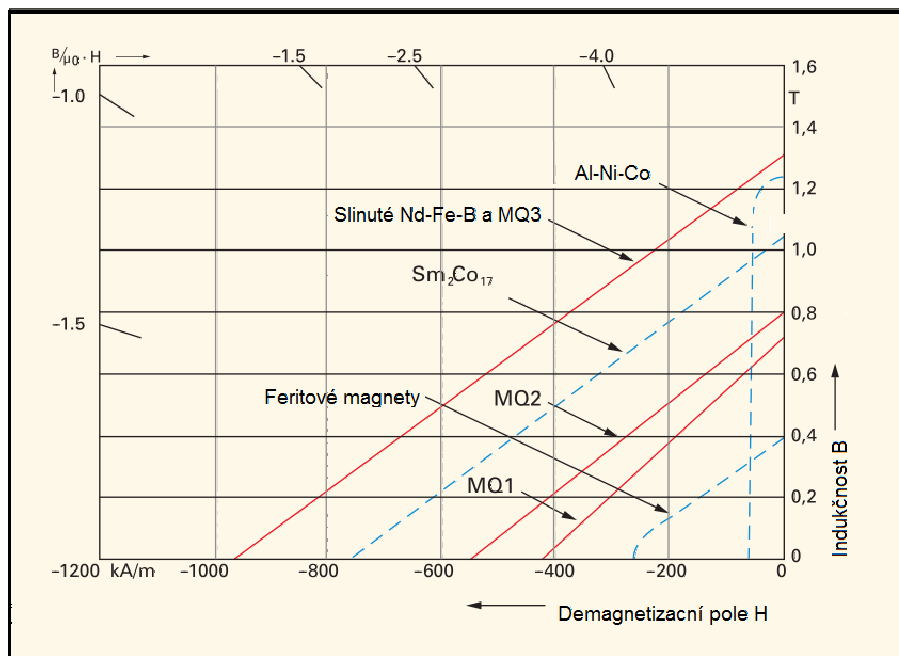
kde  $L$  vlastní indukčnost vodiče. Tento vztah se nazývá statický definiční vztah pro indukčnost. Dosadíme-li tuto závislost do vztahu (9) dostaneme:

$$U_i^s = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Phi_c}{dt} = -\frac{d}{dt}(Li). \quad (15)$$

Rovnice v této kapitole popisují fungování elektromagnetických pohonů. Síla  $F$  popsaná rovnicí (1) je hnací silou všech elektromagnetických pohonů.

## 1.2 Magnetické pole a magnety ve VCM

Velmi podstatnou částí VCM tvoří permanentní magnety. Dnes se používají téměř výhradně neodymové  $Nd_2Fe_{14}B$  magnety. Obrázek 2 zobrazuje závislost hustoty magnetického toku ( $B$ ) na intenzitě demagnetizačního pole ( $H$ ) neboli části hysterezních křivek nejběžnějších magnetických materiálů:  $AlNiCo$ , feritové magnety ( $BaFe_2O_3$ ), samarium-kobaltové magnety ( $SmCO_5$  nebo  $Sm_2CO_{17}$ ) a různé typy neodymových magnetů ( $MQ1$ ,  $MQ2$ ,  $MQ3$ ). Z křivek na obrázku lze



Obr. 2: Demagnetizační křivky pro permanentní magnety (při pokojové teplotě) [10]

vyčíst, že hlavní výhodou neodymových magnetů je jejich vysoký energetický součin  $(BH)_{max}$  a vysoká vnitřní koercitivita. <sup>2</sup> Tyto vlastnosti umožňují vytvoření velkého magnetického toku i přes větší vzduchové mezery, které vyplývají z konstrukce CVM a zároveň schopnost odolávat demagnetizačním polím vytvořených vinutím cívek CVM. Neméně důležitou skutečností pro použití neodymových magnetů je i jejich nižší výrobní cena, než pro srovnatelné samarium-kobaltové magnety. Jistou nevýhodou je jejich nízká odolnost proti korozi, která vede k nutnosti povrchových úprav. Při použití neodymových magnetů je třeba si dávat pozor na jejich celkem nízkou tepelnou odolnost (kolem  $150^\circ C$ ) a případně i na demagnetizaci způsobenou mechanickými nárazy.

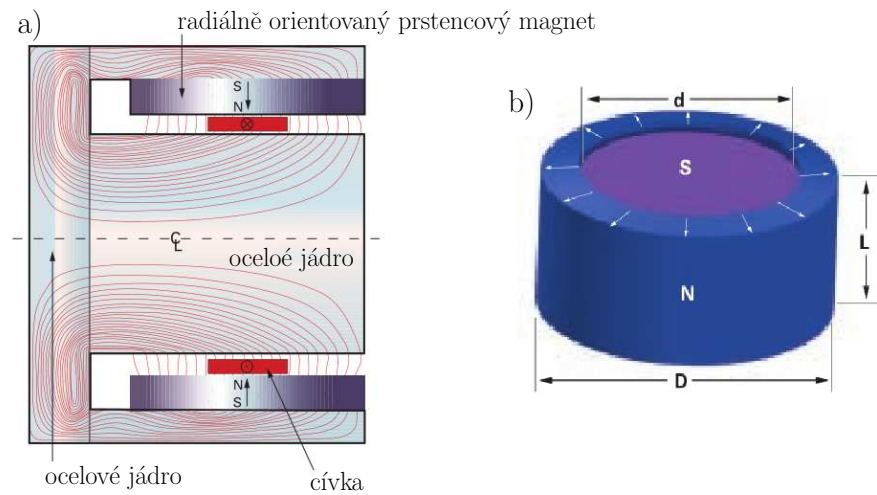
## 1.3 Typy voice coil motorů v závislosti na typu magnetu

První koncepce je zobrazena na Obr.3 a) kdy se cívka nachází v radiálně orientovaném magnetickém poli vytvořeném radiálně zmagnetizovaným prstencem viz Obr.3 b). Ten je vložen do vnitřního průměru dutého ocelového válce. Spolu s ocelovým jádrem a pouzdem slouží k uzavření magnetického obvodu. Je-li na cívku přiveden proud, působí na cívku síla popsaná vzorcem (8). Pracovní vzduchová mezera magnetického obvodu je v axiálním směru poměrně dlouhá a zhruba odpovídá axiální délce magnetu. Hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře je přibližně (0.4 – 0.6) hodnoty remanence <sup>3</sup> použitého magnetu.

Obrázek 4 a) zobrazuje druhou variantu uspořádání VCM. Tato konstrukce používá axiálně magnetizovaný disk (nebo „donut“), jak je znázorněno na Obr.4 b) a 4 c). Magnetické pole je

<sup>2</sup>Koercitivita, také zvaná koerzivní síla, je to schopnost permanentního magnetu odolávat demagnetizaci externím magnetickým polem a také svým vlastním demagnetizačním polem. Používá se pro ní označení  $(H_c)$  [A/m].

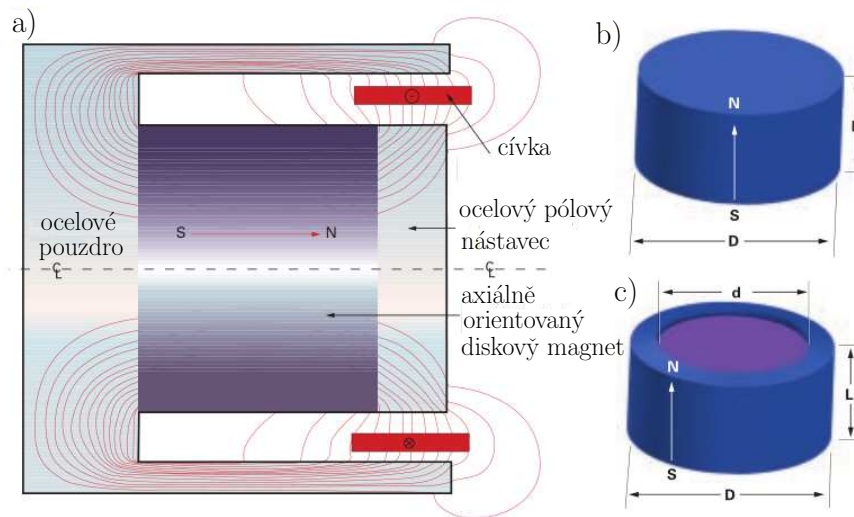
<sup>3</sup>Magnetická remanence ( $B_r$ ) je zbytková magnetizace, kterou si podrží feromagnetický materiál, když na něj přestane působit vnější magnetické pole. Jednotkou remanence je Tesla (T)



Obr. 3: a) VCM s radiálním magnetem, b) radiální orientovaný prstencový magnet

zde ohnuto radiálně ven skrz ocelový pólový nástavec a pracovní vzduchovou mezeru, ve které se nachází vinutí cívky do ocelového pouzdra, přes který se magnetický obvod uzavírá. I zde, je-li do cívky puštěn proud, působí na cívku síla, popsána vzorcem (8). Pracovní vzduchová mezera magnetického obvodu je v axiálním směru výrazně kratší než v předešlé koncepci. Tím je i počet závitů cívky, které jsou v magnetickém poli menší a tím menší je i síla na cívku. Výhodou této koncepce je snadnější výroba axiálního magnetu pro vyšší energie než u magnetu radiálního využitím v předešlém designu a skutečnost, že magnetická indukčnost vzduchové mezery je výrazně větší než v předešlé koncepci. Její hodnota odpovídá (0.6 – 0.9) násobku remanence ( $B_r$ ). To umožňuje větší magnetické toky  $B$ , což vede k větší síle na cívku. Jistou nevýhodou je horší homogenita magnetického pole.

Existují i další koncepce VCM, poměrně užívanou je například obdélníková koncepce a další které jsou detailněji popsány v [10].



Obr. 4: a) VCM s axiálním magnetem; b) a c) axiálně orientovaný diskový a „donut“ magnet

### 1.4 Cívka ve VCM

Důležitým prvkem v CVM je cívka, konkrétně pak typ zvaný solenoid. Jak už bylo zmíněno dříve, máme-li cívku v magnetickém poli, působí na ni síla popsána vzorcem (8). V tomto vzorci vystupuje počet závitů cívky  $N$ . Tím se nemyslí celkový počet závitů cívky, ale počet závitů cívky aktuálně v magnetickém poli. Tato hodnota nemusí být konstantní a pro krajní polohy, kdy cívka

vyjíždí (vjíždí) do magnetického pole se může měnit. Další proměnná ve vzorci je magnetická indukčnost  $B$ , vytvořená permanentním magnetem. Jak lze vidět na Obr.2 tato indukčnost je závislá na velikosti demagnetizačního pole  $H$ . Toto pole je vytvářeno průchodem proudu cívkou.

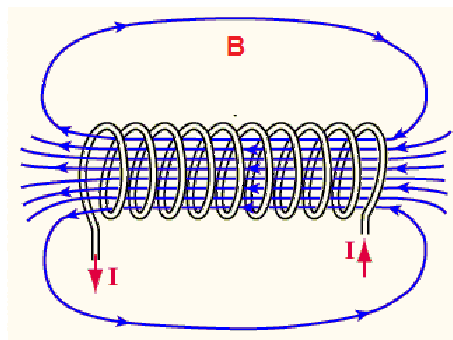
Vztah mezi magnetickou indukcí  $B$  a intenzitou magnetického pole  $H$  je:

$$\vec{H} = \frac{B}{\mu_0} - \vec{M}, \quad (16)$$

kde  $\vec{M}$  je magnetizace. Na Obr.5 je zobrazeno, jak vypadá magnetické pole  $B_c$  hustě vinuté cívky při průtoku proudu  $i$ . Velikost magnetická indukčnost  $B_c$  uvnitř cívky je dána vzorcem:

$$\vec{B}_c = \mu \frac{N}{l} i, \quad (17)$$

platí, že  $l$  je délka cívky a  $N$  je počet závitů na cívce a  $\mu = \mu_r \mu_0$ , kde  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} H/m$  kde  $\mu_r$  je relativní permeabilita materiálu. Zde však pro výpočet nastává zásadní problém, jak je na zmíněných obrázcích vidět, vytvořený magnetický tok neteče jen jádrem cívky, ale je uzavírán i vně cívky. Proto je těžké určit velikost permeability, počítat jen s permeabilitou jádra (jako například v [5]) je chybné. Jistou možností je vytvořit MKP model například v programu Vizimag. Nakonec jsme se však rozhodli, že vliv demagnetizačního pole na permanentní magnet zjistíme experimentálně viz kapitola 3.1. Obecně však předpokládáme, že u našeho zařízení nebude mít toto pole příliš velký vliv, protože Neodymový magnety mají velkou odolnost proti demagnetizačním polím.



Obr. 5: Magnetické pole hustě vinuté cívky

## 1.5 Základní vzorce popisující VCM

V této chvíli bychom měli mít popsány všechny potřebné vztahy k tomu, abychom popsali fungování VCM zobrazeném na Obr. 7. Síla působící na pohybující se část voice coil motoru  $F$  (elektromagnetická síla) je popsána vzorcem (8), ve kterém však obecně budeme uvažovat, že hustota magnetického toku  $B$  může být závislá na proudu  $i$  a počet aktivních závitů  $N_a$  může být obecně závislý na poloze ( $N_a$  nemusí být ani celé číslo, může zabírat jen část závitů cívky, to nám umožňuje uvažovat konstantní  $l$ , které reprezentuje délku jednoho závitů cívky).

$$F = F_c^r = N_a(x) B(i) i l \quad (18)$$

Často je tento vzorec přepisován do tvaru:

$$F = C_e(x, i) i, \quad (19)$$

kdy při jistém zjednodušení se uvažuje  $C_e$  za konstantu a nazývá se silová konstanta (rozměr  $\frac{N}{A}$ ) i my ji takto budeme nazývat, i když zatím ji za konstantu považovat nebudeme.

Proud v cívce lze popsat spojením rovnic (13), (15) a Ohmova zákona, tím vznikne rovnice:

$$\begin{aligned} Ri &= U + U_{is}^{Br} + U_i^s \\ Ri &= U - N(x)B(i)vl - \frac{d}{dt}(Li), \end{aligned} \quad (20)$$

kde  $U$  je řídicí napětí,  $R$  je odpor cívky,  $L$  je indukčnost cívky a  $v$  je relativní rychlost mezi cívkou a magnetickým polem. Pro další výpočty budeme uvažovat, že indukčnost cívky je nezávislá na čase. Pak lze tuto rovnici přepsat do obvyklejšího tvaru:

$$Ri + L\frac{di}{dt} = U - C_e(x, i)v, \quad (21)$$

zde se opět vyskytuje proměnná  $C_e = N(x)B(i)vl$ , ale protože u jiných uspořádání může být rozdílná, nazývá se zde napěťová konstanta (rozměr  $\frac{N}{A} = \frac{Vs}{m}$ ). Abychom nenazývali stejnou proměnnou různě, budeme pro  $C_e$  používat výraz voice coil konstanta. Další rovnice popisující toto uspořádání VCM je pohybová rovnice systému ve směru  $x$ :

$$m_p\ddot{x} + C_p\dot{x} = F - F_z, \quad (22)$$

kde  $C_p$  konstanta tlumení,  $F_z$  je vnější zátěžná síla a  $x$  je poloha cívky. Ve VCM většinou není přítomen tlumič, ale  $C_p$  představuje tření mezi pohyblivou částí a rámem případně tření v lineárním vedení.

## 1.6 Pohony a servopohony

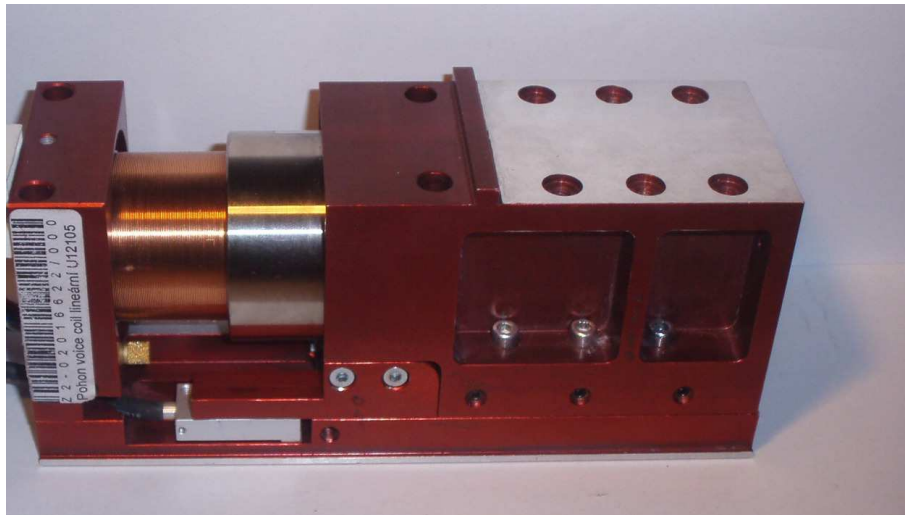
Dále v této práci budeme pod pojmem motor uvažovat přístroj přeměňující elektrickou energii na energii mechanickou. Přidáním ovládacího bloku k motoru, případně přidáním transformačního bloku (transformuje pohyb z motoru na žádaný výstupní pohyb) získáme pohon.

Za servopohon považujeme pohon, který obsahuje zpětnovazební řízení (polohy, rychlosti). K tomu se často používá jednosmyčková PID regulace polohy. Výhodou tohoto konceptu jsou nízké náklady na zařízení. Mnohdy však pro náročnější aplikace, které požadují kratší doby ustálení případně robustnější regulaci je tato metoda nedostačující. V těchto případech přicházejí na řadu pokročilejší metody regulace jako například LQR, stavová zpětná vazba nebo kaskádní regulace. V oblasti regulace servopohonů se nejvíce rozvinula poslední jmenovaná, která se jeví jako přirozený další krok po jednosmyčkové PID regulaci.

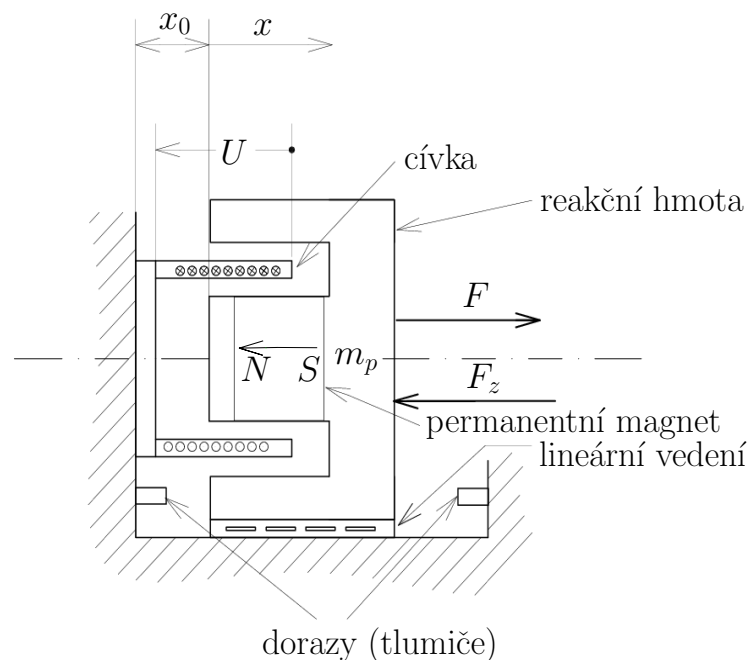
## 2 Oživení experimentálního voice coil servopohonu

Tato práce se primárně bude zabývat voice coil servopohony (lineárním, jednofázové servopohony). Jejich kladem je schopnost vyvinout velké zrychlení (až  $20 \text{ m/s}^2$ ) při zachování velké přesnosti polohování (až v řádech mikrometrů) při vhodném řízení. Dalším plusem je fakt, že pohyb výstupního bodu motoru je bez nutnosti převodového bloku rovnou lineární a že pohon má nulovou mechanickou vůli. Nevýhodou je pak omezený zdvih motoru. [4]

Firmou Inomech byl dodán voice-coil servopohon viz Obr. 6. Schéma VCM od firmy Inomech je na Obr. 7. Třecí síla v lineárním vedení lze popsat vzorcem  $F_t = C_p v$ . Zkoumaný motor obsahuje dorazy (tlumiče) na okrajích pracovního prostoru. Ty mají za úkol zamezit poškození jak lineárního vedení, tak permanentního magnetu (který špatně snáší rázy, jak již bylo řečeno) při špatně zvolených parametrech řízení, kdy dochází k vyjetí mimo pracovní prostor. Vliv těchto dorazů nebude při popisu motoru brán v úvahu, protože bude uvažován jen pohyb v pracovním prostoru. Pohon se skládá z lineárního vedení od firmy Schneeberger, cívky s magnetickým jádrem od firmy Akribis Systems, konkrétně typ VCA AVM-40-20.



Obr. 6: INOMECH Voice coil servopohon



Obr. 7: Upravné schéma voice-coil motoru

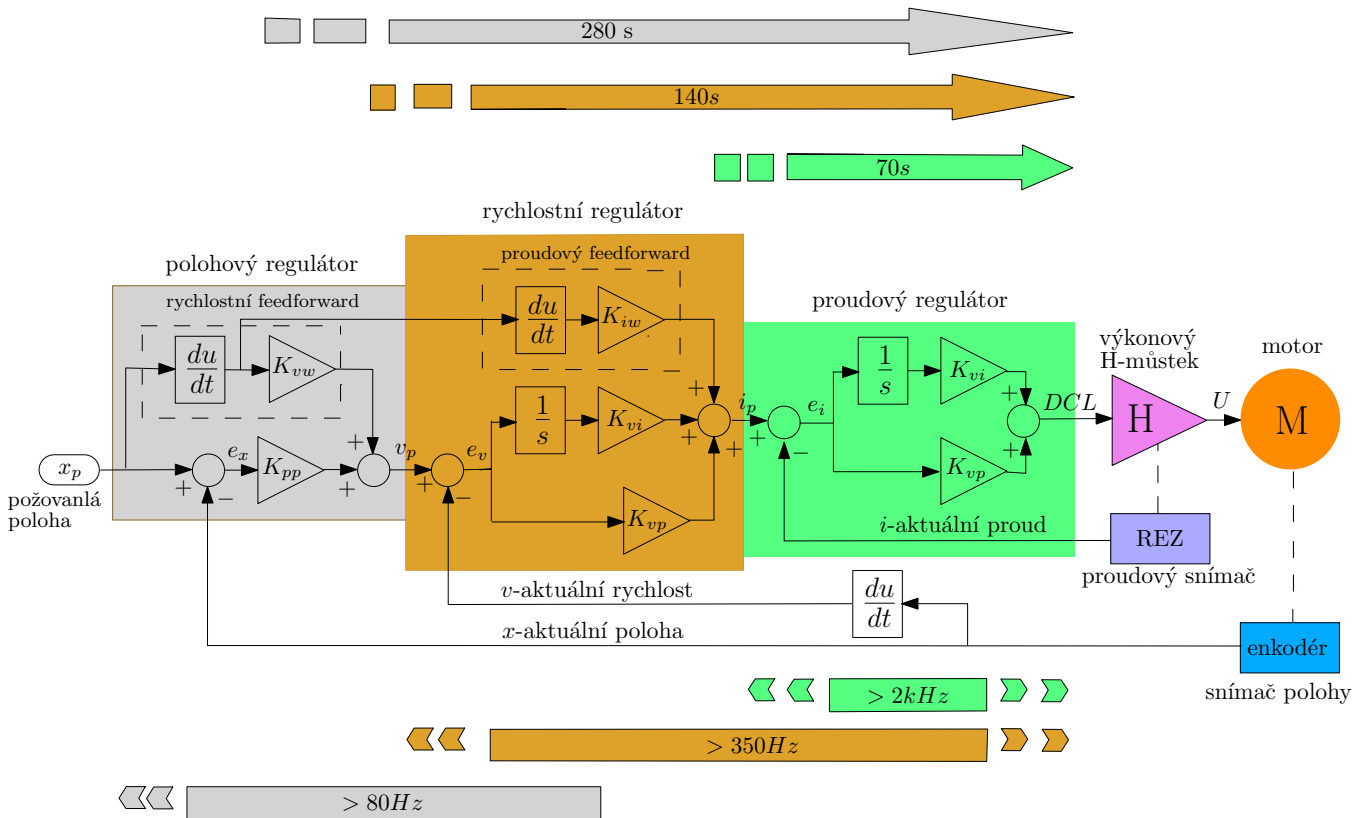
Aby z motoru vznikl servopohon byl přidán řídicí blok Digitální servoměnič Cello 50/60 od firmy Elmo. Více o tomto řídicím bloku viz [2]. Podle tohoto manuálu byla navázána se servoměničem komunikace a nastaveny parametry tak, aby bylo možno motor bezpečně využívat. Z dalších zdrojů od výrobce bylo vyčteno schéma kaskádní regulace kterou servoměnič obsahuje viz Obr. 8.

Informace o aktuální poloze motoru získává ovládací blok z optického odměřování od firmy Numerik Jena. Konkrétně s využitím inkrementálního enkodéru LIK41-P32-WZ.

### 3 Statické experimenty na experimentálním VCP

Prvním experimentem na voice-coil servopohonu bylo určení hmotnosti reakční hmoty (pohybující se části motoru). Byla zvolena nejjednodušší varianta, jak danou hmotnost zjistit a to danou část odmontovat a zvážit. K tomu byla použita váha Skrebbba skre-2000N, přesnost vážení do 1 kg je 1 g. Pro hodnoty od 1 kg do 2 kg je přesnost vážení 2 g. Z měření vyšlo, že hmotnost reakční





Obr. 8: Schéma kaskádní regulace servoměniče Cello Elmo

hmoty  $m_p = 440 \pm 1 \text{ g}$ . Dalším krokem bylo zjištění polohy dorazů a tím ověření správnosti nastavení omezení polohy v servoměniči. Dorazy se nacházejí v polohách  $x_{dor1} \cong -170\,000$  bodů a  $x_{dor2} \cong 180\,000$  bodů. Třetím krokem bylo změřit proměnné charakterizující cívku. Odpor  $R$  a indukčnost  $L$ . K tomu byl použit příruční LCR metr od firmy Escort. Měření probíhalo na frekvenci  $f = 1 \text{ kHz}$ . Bylo změřeno, že  $L = 6.67 \text{ mH}$  a  $R = 18 \Omega$ . Výrobce v katalogovém listu k cívce udává, že  $L_{vyrobce} = 6.22$  a  $R_{vyrobce} = 11 \Omega$ . Dále budou v práci používány změřené hodnoty.

### 3.1 Určení voice-coil (silové) konstanty $C_e$

Dalším úkolem bylo zjistit hodnotu voice-coil konstanty  $C_e$ . Výrobce udává, že její hodnota ve středu zdvihu cívky je  $C_{e,vyrobce} = 12.9 \text{ N/A}$  (Vs/m). Vzhledem k tomu, že není jistota nezávislosti této hodnoty na poloze a proudu, raději byl proveden experiment k zjištění této konstanty. Nejprve byl proveden experiment založený na závislosti (19) ve kterém  $C_e$  představuje silovou konstantu.

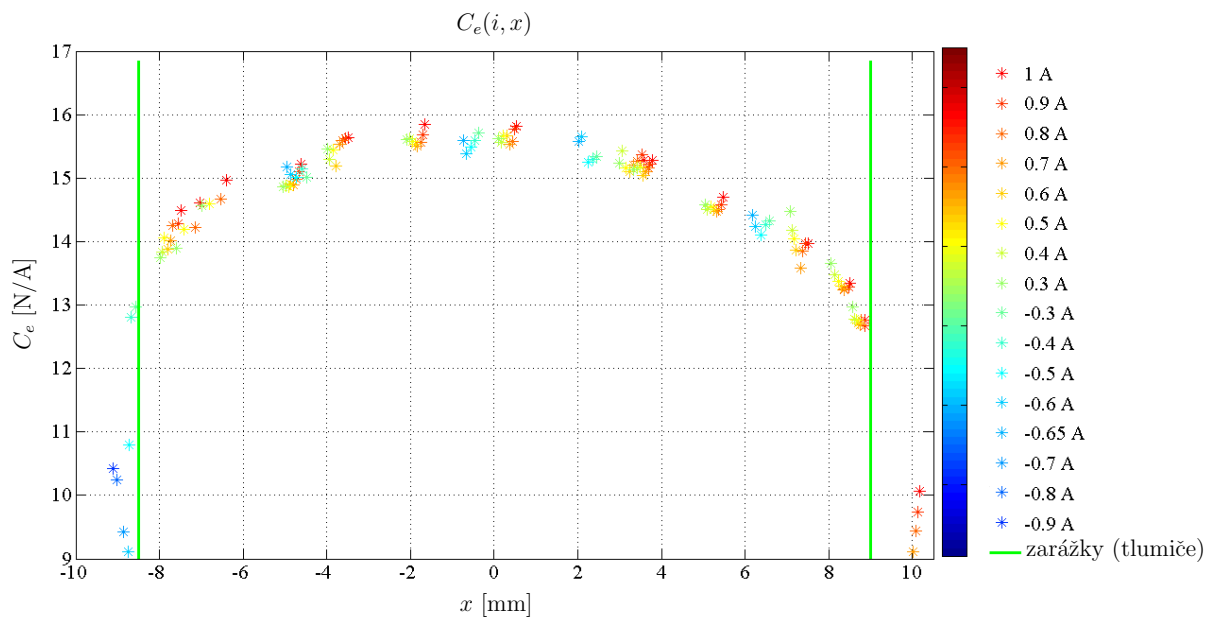
Na servoměniči Cello byl využit mód řízení síly (proudu). Tak bylo možno řídit vstupní veličinu, velikost proudu v motoru. Výstupní veličinou byla síla, kterou motor při průchodu proudu produkuje. Ta byla měřena pomocí váhy Xavax-Milla, která umožňuje vážit do 5 kg s přesností 1 g. Uspořádání měření je na obr. 9.

Průběh měření: motor byl umístěn vertikálně a pohyblivá část motoru byla umístěna do polohy  $x$ . Pod ní byla umístěna váha. Protože se během měření ukázalo, že váha pohyblivé části je příliš malá a při vyšších záporných proudech se motor začne pohybovat a přestane mít kontakt s váhu, bylo k pohyblivé části připojeno závaží. Následně byla odečtena váha pohyblivé části se závažím vypnutého motoru. Poté byl motor zapnut a postupně byly odečítány hodnoty z váhy pro proudy od  $i = 1 \text{ A}$  do  $i = -0.9 \text{ A}$ . Zároveň s proudem a „hmotností“ byla zaznamenávána aktuální poloha motoru  $x$ , protože se se mírně měnila v závislosti na proudu. To bylo způsobeno konstrukcí váhy. Po odečtení všech hodnot pro různé proudy, byla změněna výchozí poloha  $x$  a celý proces se opakoval.



Obr. 9: Aparatura pro měření  $C_e$

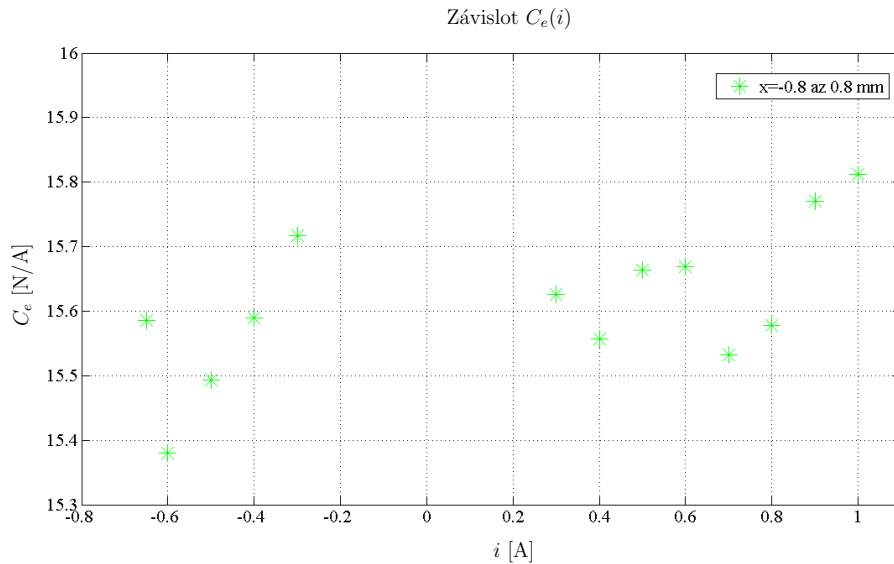
Data z váhy byla použita k výpočtu sil, které voice coil motor vyvinul, když jím protékal proud. Tyto síly byly vypočítány pomocí vzorce:  $F = (m_{zap} - m_{vyp}) \cdot g$ , kde  $m_{zap}$  je „hmotnost“ pohyblivé části když motorem protéká proud,  $m_{vyp}$  je hmotnost pohyblivé části motoru a  $g$  je tíhové zrychlení. Voice coil konstanta pak byla vypočítána pomocí vztahu (19).



Obr. 10: Závislost voice coil konstanty na poloze

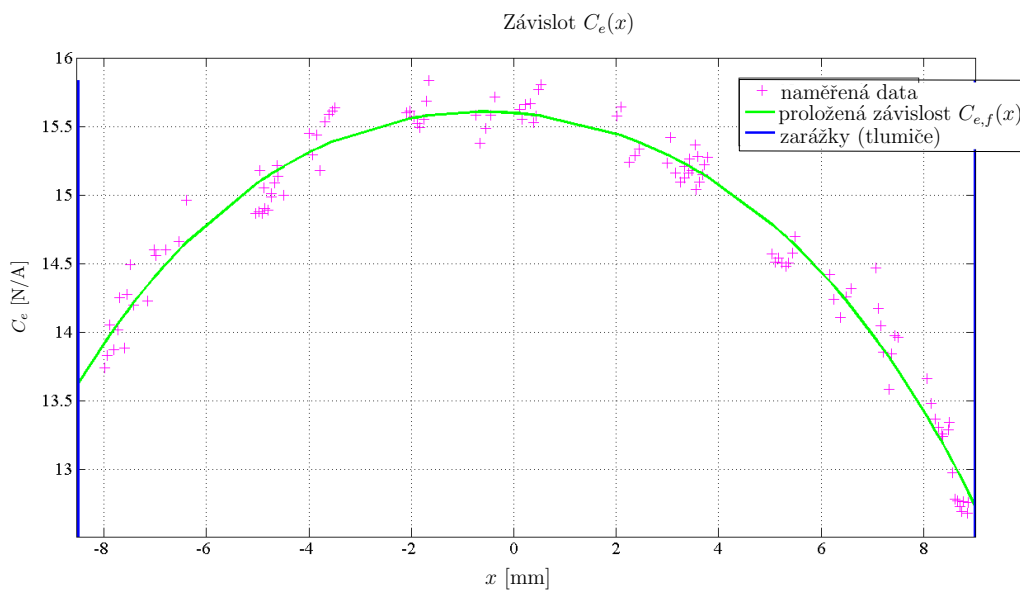
Obrázek 10 zobrazuje závislost voice coil konstanty na poloze a proudu. Hodnoty byly vypočítány s přesností  $\pm 0.2$  N/A. Není však patrné zda existuje spojitost mezi velikostí proudu a konstantou. Proto byla vybrána měření s malým rozptylem polohy. Konkrétně data s polohou od  $-0.8$  mm do  $0.8$  mm. Data byla použita k získání průběhu  $C_e(i)$  viz Obr.11. Z grafu by se mohlo zdát, že voice coil konstanta má tendenci s proudem růst, přírůstek je však velmi malý (srovnatelný s přesností experimentu). Budeme proto brát, že konstanta je nezávislá na proudu.

Jak už bylo dříve odvozeno  $C_e = N_a(x) B(i) l$ , pro konstantním  $x$ , musí proměnné  $N_a$  a  $l$  být také konstantní. Z toho plyne, že pokud není  $C_e$  závislá na proudu, nemůže být ani hustota magnetického toku  $B$  závislá na proudu. Což je důkaz, že vliv demagnetizačního pole cívky, který se řeší v kapitole 1.4 je v našem případě zanedbatelný.



Obr. 11: Závislost voice coil konstanty na proudu

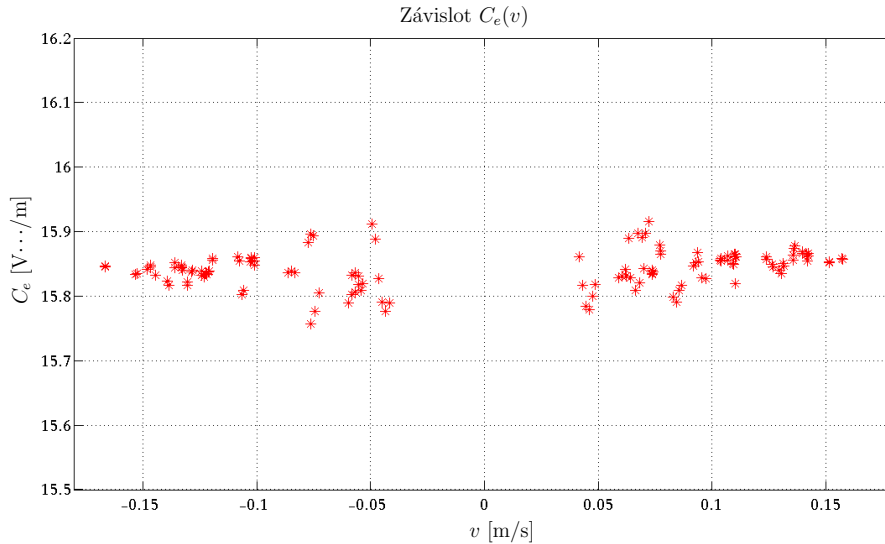
Na Obr. 12 je zobrazen průběh voice coil konstanty v závislosti na poloze. Naměřenými daty byla v programu Matlab proložena pomocí funkcí *polyfit* a *polyval* křivka čtvrtého řádu. Rovnice křivky je  $C_{e,f} = -0.00010x^4 - 0.00004x^3 - 0.02378x^2 + 0.02791x + 15.60293$ . Střední hodnota chyby proložení je  $1.13319 \cdot 10^{-015}$  N/A a směrodatná odchylka je rovna  $0.16112$  N/A.



Obr. 12: Závislost voice coil konstanty na poloze

### 3.2 Určení voice coil (napěťové) konstanty $C_e$

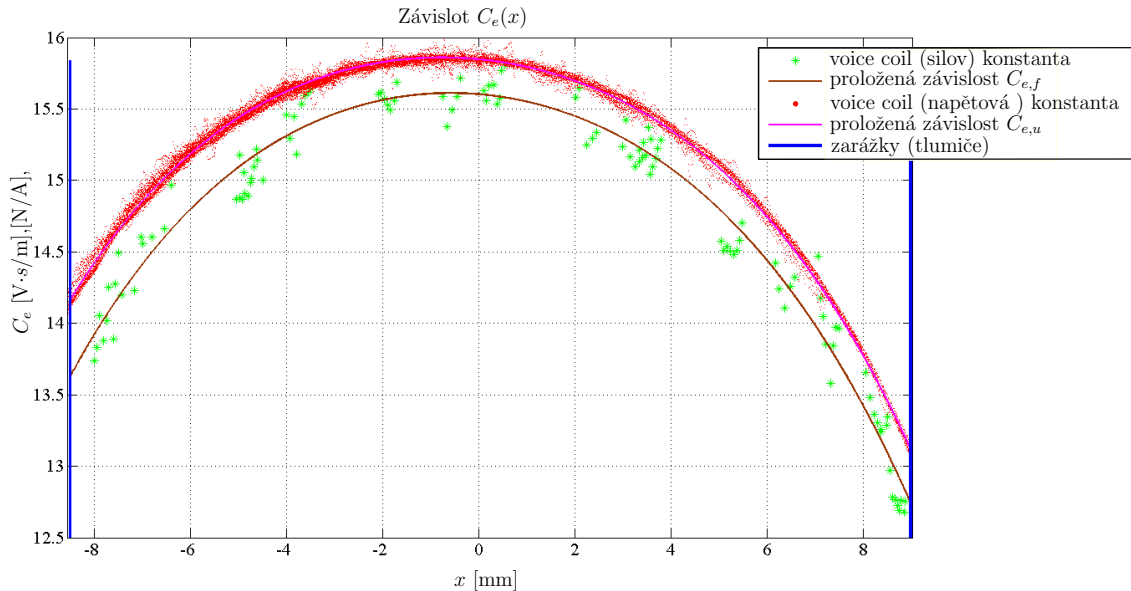
Pro kontrolu a zpřesnění průběhu voice coil konstanty bylo provedeno ještě jedno měření. Měřila se velikost indukovaného napětí v závislosti na rychlosti, to umožnilo vypočítat  $C_e$  z rovnice  $U_i = C_e v$ . Postup experimentu byl následující: nejprve bylo odpojeno napájení motoru ze servoměniče. Motor byl připojen přes napájecí kabely k měřicí platformě cDAQ od firmy National Instruments, konkrétně k modulu NI 9215, který umožňuje měřit napětí. Enkodér zůstal připojený k servoměniči Cello, z něj byl vyveden kabel nesoucí informaci o pohybu motoru. Ten byl připojen do modulu NI 4901. Signál z modulů byl zaznamenáván pomocí programu LabView 2013. Následně bylo ručně pohybováno pohyblivou částí motoru a snímána poloha a indukované napětí. Poloha byla zaznamenána jak v Labview tak v servoměniči Cello. V programu LabView bylo nutno měřit jak napětí tak polohu z důvodů synchronizace měření. Bohužel v Labview bylo možno zaznamenávat jen relativní přírůstek polohy a proto bylo nutno měřit i v servoměniči. Při vyhodnocování dat byly hodnoty poloh zaznamenané pomocí LabView posunuty podle hodnot získaných ze servoměniče tak, aby odpovídaly absolutní poloze. Následně byla data ještě upravena v programu matlab Simulink. Konkrétně byl odfiltrován šum z dat a z průběhu polohy byla derivací získána rychlost. Podle již zmíněného vzorce  $C_e = U_i/v$  byly vypočítány hodnoty voice coil konstanty pro jednotlivé rychlosti.



Obr. 13: Závislost voice coil konstanty na rychlosti

Následovalo zkoumání, zda  $C_e$  je závislá na rychlosti. Aby nebyly výsledky zkresleny závislostí  $C_e$  na  $x$  byly ze všech dat vybrány hodnoty naměřené na „jedné“ poloze. Byly zvoleny polohy  $x = (-0.05, 0.05)$  mm. Vybrané hodnoty byly vyneseny do grafu viz Obr. 13. Z grafu je patrné, že  $C_e$  je nezávislá na rychlosti. Jak je vidět na Obr. 14 jsou vyneseny hodnoty voice coil konstanty v závislosti na poloze. Jsou zde vyneseny hodnoty získané pomocí měření síly (voice coil silová konstanta), tak hodnoty získané pomocí měření indukovaného napětí (voice coil napěťová konstanta). Data napěťové konstanty opět proložena křivka čtvrtého řádu. Rovnice křivky je  $C_{e,u} = -0.00010x^4 - 0.00012x^3 - 0.02092x^2 - 0.03211x + 15.84742$ . Střední hodnota chyby proložení je  $-0.00265$  V·s/m a směrodatná odchylka je rovna  $0.03788$  V·s/m.

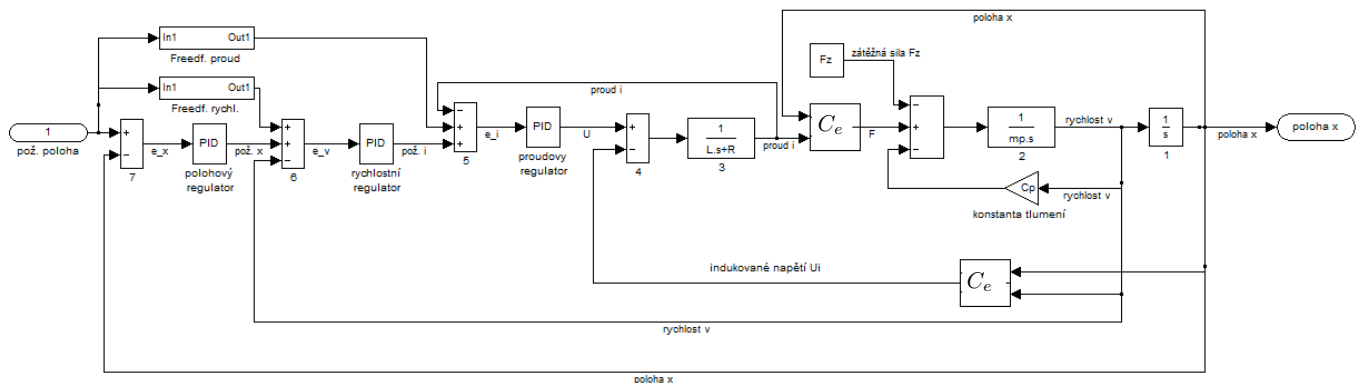
Z grafu je patrné, že křivky mají podobný tvar. Jen hodnoty silové konstanty jsou pro všechny polohy přibližně o  $0.3$  N/A (V·s/m) menší než hodnoty napěťové konstanty, přestože by se křivky měli překrývat. Reálnému průběhu voice coil konstanty odpovídá pravděpodobně křivka napěťové konstanty. K této úvaze nás vede skutečnost, že její průběh byl počítán z mnohem většího množství dat, při jejichž získání byla menší šance na systematické chyby. Odchylka  $C_{e,f}(x)$  od  $C_{e,u}(x)$  může být způsobena nepřesným měřením proudu v servoměniči. Je nutno podotknout, že odchylka je malá. Pod 2% průměrné hodnoty  $C_e$ .



Obr. 14: Závislost voice coil (silové, napěťové) konstanty (silové, napěťové) na poloze

## 4 Simulační model VCP

Zjištěné informace o voice coil pohonu umožnily vytvořit jeho simulační model. Měřeními byly zjištěny všechny parametry, které jsou do simulačního modelu potřeba až na konstantu tlumení



Obr. 15: Simulační model voice coil servopohonu

## 5 Závěr

Byly odvozeny základní vzorce pro popis chování voice coil servopohonu. Následně byl prozkoumán dodaný servopohon a seznámeno se s řídicím prvkem tohoto pohonu servoměničem Cello Elmo. To umožnilo zprovoznění zařízení a provedení experimentů na něm. Nejprve byla zjištěna hmotnost reakční hmoty motoru  $m_p = 440 \pm 1 \text{ g}$ , indukčnost cívky  $L = 6.67 \text{ mH}$  a odpor cívky  $R = 18 \Omega$ . Dále bylo zjištěno, že voice coil konstanta není konstantní, ale závisí na poloze. Experimenty byla zjištěna závislost  $C_{e,f} = -0.00010x^4 - 0.00004x^3 - 0.02378x^2 + 0.02791x + 15.60293$ . Znalost motoru umožnila vytvořit simulační model servopohonu. Následovat by mělo ověření správnosti simulačního modelu, kdy se změřením hodnoty (proudu, rychlosti, polohy) na reálném zařízení a porovnají se s hodnotami generovanými simulačním modelem. Následně bude zkoumáno, zda nastavení kaskádní regulace (automaticky vygenerované servoměničem) je ideální. K tomu bude použita metoda geometrického místa kořenů.

## Seznam symbolů:

$\vec{F}$ -síla	[N]
$q$ -elektrický náboj	[C]
$\vec{E}$ -intenzita magnetického pole	[V/m]
$\vec{B}$ -magnetická indukce	[T]
$\vec{F}_{el}$ -síla elektrického pole	[N]
$\vec{F}_{mg}$ -síla magnetického pole	[N]
$i$ -stejnoseměrný proud v cívce	[A]
$l$ -délka vodiče v mag. poli	[m]
$\alpha$ -úhly mezi vodičem a mag. indukci	[rad]
$a$ -poloměr smyčky, cívky	[m]
$F_l^r$ -síla působící na kruhovou smyčku v „radiálním“ mag. poli	[N]
$F_l^c$ -síla působící na cívku v „radiálním“ mag. poli	[N]
$\Phi$ -magnetický indukční tok	[Wb]
$v$ -rychlost	[m/s]
$U_i^B$ -indukované napětí ve vodiči při $B$ =konst.	[V]
$U_{il}^{Br}$ -indukované napětí v cívce v radiálním mag. poli při $B$ =konst.	[V]
$U_i^s$ -indukované napětí způsobené změnou proudu v cívce	[V]
$N$ -počet závitů cívky	[-]
$N_a$ -počet závitů cívky v magnetickém poli	[-]
$B_r$ -magnetická remanence	[T]
$H_c$ -koercitivita	[A/m]
$H$ -intenzita magnetického pole	[A/m]
$R$ -odpor cívky	[ $\Omega$ ]
$L$ -indukčnost cívky	[H]
$U$ -řídící napětí	[V]
$C_e$ -voice coil konstanta	[N/A],[V·s/m]
$C_p$ -konstanta tlumení	[N·s/m]
$m_p$ -hmotnost reakční hmoty motoru (pohybující se část motoru)	[kg]
$x$ -poloha reak. hmoty motoru	[m]
$F_t$ -ztrátová (třecí) síla v lin. vedení	[N]

## Reference

- [1] BOHUMIL VYBÍRAL. Elektromagnetická indukce: Elektrodynamika 3 [online]. [cit. 2013-10-05]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/indukce.pdf>
- [2] ELMO MOTION CONTROL. Cello Digital Servo Drive: Installation Guide. 2012-6, 83 s. 2012. Dostupné z: <http://www.elmomc.com/support/manuals/MAN-CELIIG.pdf>
- [3] ELMO MOTION CONTROL. Elmo Composer: Software Manual. 2003-9, 83 s.2012. Dostupné z: [http://www.elmomc.com/support/manuals/COM\\_UG\\_0903.pdf](http://www.elmomc.com/support/manuals/COM_UG_0903.pdf)
- [4] Gogue, George P. a Stupak, Joseph J. Jr. [online]. [cit. 2013-04-4]. Dostupné z : <http://www.consult-g2.com/papers/paper8/paper.html>
- [5] Hyperphysics - Georgia state university. Magnetic: Solenoid [online]. 2013 [cit.2013-10-31]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/solenoid.html>
- [6] Kmitající cívky řady AVM [online]. [cit. 2013-20-2]. Dostupné z: [http://www.servo-drive.com/pdf\\_catalog/voice\\_coil\\_drives\\_avm\\_cs.pdf](http://www.servo-drive.com/pdf_catalog/voice_coil_drives_avm_cs.pdf)
- [7] Lorentz. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2003-10-28 [cit. 2013-07-12]. Dostupné z: [upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/Lorentzkraft-graphic.PNG](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/Lorentzkraft-graphic.PNG)
- [8] Mayer, Daniel a Bohuš Ulrych. Elektromagnetické aktuátory. 1. vyd. Praha: BEN, 2008. 120 s. ISBN 978-80-7300-216-9.
- [9] Metody zlepšení PI regulace. Automa [online]. 2001, roč. 2001, č. 12 [cit. 2013-10-06]. Dostupné z: [www.odbornecasopisy.cz/download/au120104.pdf](http://www.odbornecasopisy.cz/download/au120104.pdf)
- [10] MORCOS, Tony. The Straight Attraction part one. [online]. 2000-9, s. 5 [cit. 2013-10-30]. Dostupné z: [www-cdr.stanford.edu/dynamic/linear\\_engine/eng\\_ref/electric\\_motors/motion1.pdf](http://www-cdr.stanford.edu/dynamic/linear_engine/eng_ref/electric_motors/motion1.pdf)
- [11] Preumont, André. Vibration control of active structures: an introduction. 2nd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. xvii, 364 s. ISBN 1-4020-0496-6.
- [12] Rydlo, Pavel. Úvod do teorie servomechanismů [online]. [cit. 2013-04-3]. Dostupné z: [http://www.mti.tul.cz/files/svm/SVM\\_servo\\_1.ppt](http://www.mti.tul.cz/files/svm/SVM_servo_1.ppt)
- [13] Sběrka řešených úloh z fyziky: Magnetické pole solenoidu [online]. 2013-7-26 [cit. 2013-10-31]. Dostupné z: <http://fyzikalniulohy.cz/uloha.php?uloha=451>
- [14] Vladimír ANDRLÍK. Průmyslové roboty a manipulátory. Přednáška. Praha:CVUT, 2013