

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Model elektromagnetického aktuátoru
ve funkci ventilu**

Abstrakt

Předložená bakalářská práce je zaměřena na sestavení matematického modelu elektromagnetického aktuátoru ve funkci ventilu a posouzení jeho provozních charakteristik. Matematický model byl realizován pomocí programu Agros2D a skriptovacího jazyka MathWorks Matlab. Pro ověření modelu aktuátoru, bylo provedeno měření jeho dynamických charakteristik.

Klíčová slova

Matematický model, elektromagnetický aktuátor, elektromagnetické pole, teoretická analýza, solenoidální ventil, počítačová simulace.

Abstract

This bachelor thesis is aimed at building of mathematical model of an electromagnetic actuator in function of a solenoid valve and investigation of its operating characteristics. The model was realized using the Agros2Dsoftware and scripting language MathWorks Matlab. Measurements of dynamic characteristics were performed to verify its design and functionality.

Key words

Mathematical model, electromagnetic actuator, electromagnetic field, theoretical analysis, solenoid valve, computer simulation.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2017

Ondřej Sodomka

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Ivu Doleželovi, CSc.za odborné vedení, cenné profesionální rady i podněty k práci a metodické vedení práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Františku Machovi, Ph.D., se kterým jsme po celý rok vzájemně spolupracovali při výzkumu.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	7
Úvod	8
1 Úvod do problematiky	9
1.1 Solenoidální ventily	9
1.2 Rešerše metod tvorby matematického modelu.....	10
2 Teoretická analýza problému a její spojitý matematický model	11
2.1 Elektrický model	12
2.2 Mechanický model	12
2.3 Magnetický model	13
3 Numerický model	17
3.1 Metoda konečných prvků.....	17
4 Simulace konkrétního ventilu	18
4.1 Specifikace parametrů ventilu.....	18
4.2 Model ventilu v počítačových simulacích.....	21
4.3 Výsledky počítačových simulací	23
5 Zhodnocení výsledků a jejich experimentální verifikace	24
5.1 Určení indukčnosti systému a její závislosti	24
5.2 Naměřené dynamické charakteristiky ventilu.....	27
Závěr	29
Zdroje	30
Příloha	31

Seznam symbolů a zkratek

i [A]	proud
R [Ω]	odpor
L [H]	indukčnost
u [V]	napětí
s [m]	poloha, posun, dráha
m [kg]	hmotnost
v [m/s]	rychlost
t [s]	čas
F [N]	síla
f [-]	třecí koeficient
g [m/s ²]	gravitační zrychlení
B [T]	magnetická indukce
A [Wb/m]	magnetický vektorový potenciál
E [V/m]	intenzita elektrického pole
J [A/m ²]	proudová hustota
γ [S/m]	elektrická vodivost
μ [H/m]	permeabilita
H [A/m]	intenzita magnetického pole
D [C/m ²]	elektrická indukce
φ [V]	elektrický skalární potenciál
w [J/m ³]	hustota energie
W [J]	energie
V [m ³]	objem
P [W]	činný výkon

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na sestavení matematického modelu elektromagnetického aktuátoru ve funkci ventilu a posouzení jeho provozních charakteristik. Elektromagnetické aktuátory se rozšiřují do různých odvětví řídicích systémů jako alternativa pneumatických či hydraulických akčních členů, neboť oproti nim mají dvě výhody: silové a momentové účinky elektromagnetického pole lze přenášet bezkontaktně a reakce elektromagnetu jsou značně rychlejší, než dovolují dynamické vlastnosti ovládané soustavy [1].

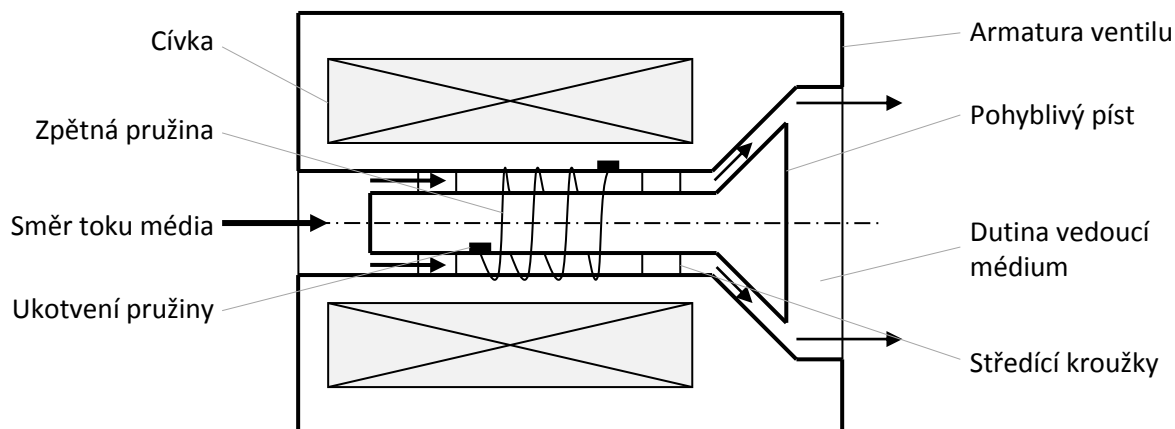
Složitou soustavu můžeme vnímat jako jeden celek nebo jako systém dílčích celků, jejichž parametry jsou předmětem zkoumání. Parametry systému lze získat pomocí experimentálních měření na prototypu nebo vytvořit pouze jeho model a na něm provést počítačovou simulaci. K provedení měřicího experimentu je zapotřebí celý prototyp zkoumané soustavy nebo alespoň jeho část, což může být velmi nákladné, nebo jej lze provozovat pouze za určitých podmínek. Provedení těchto experimentů může být často nebezpečné anebo prototyp zkoumané soustavy (systému) ještě nemusí ani existovat. Kvůli všem těmto potížím s měřením může být matematické modelování v mnoha případech výhodnější, nebo dokonce jedinou možnou volbou [2][3].

1 Úvod do problematiky

Model systému je nástroj k zodpovězení otázek ohledně systému, aniž bychom na něm prováděli experimenty nebo jej přímo fyzicky měli k dispozici. Fyzikální a matematické modely jsou příklady modelů, které lze vytvořit. V matematickém modelu, který zde bude vytvářen konkrétně pro solenoidální ventil, budou pozorované veličiny systému kombinovány a transformovány do matematických vztahů. Matematický model je v podstatě soustava matematických vztahů a jejich vhodným skloubením lze popsat chování systému, buď provedením matematických výpočtů, nebo numerickými experimenty zvanými simulace [2].

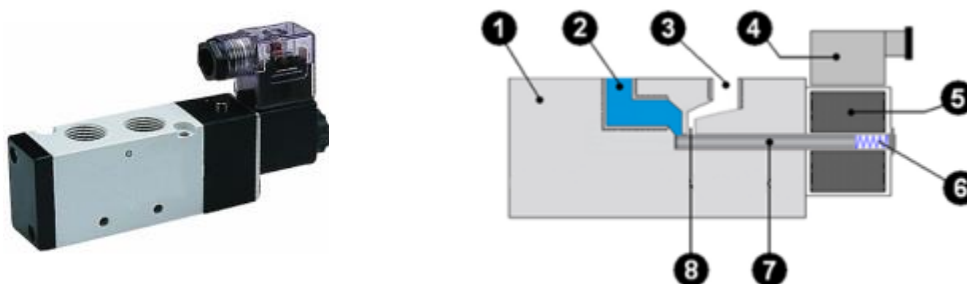
1.1 Solenoidální ventily

Solenoidální ventil je druh elektromechanického ventilu, jehož dynamické vlastnosti ovlivňují či řídí chování medií (kapalin nebo plynů). Tyto ventily jsou ve své podstatě komplexní zařízení, které obsahují čtyři subsystémy, jež se navzájem ovlivňují: elektrický, magneto-dynamický, mechanický a subsystém dynamiky proudění.



Obr. 1 Schematické zobrazení solenoidálního ventilu

Přivedeme-li do systému (obr. 1) elektrický proud, začne se v cívce generovat magnetické pole, jež bude působit určitou magnetickou silou na příslušný akční člen. Tato síla musí překonat mechanické síly působící proti ní (například síla pružiny, tření nebo aerodynamické síly) a způsobit otevření (případně zavření, dle návrhu zařízení) ventilu [2]. Solenoidální ventily pracují vždy na stejném principu, ale mohou se ovšem lišit konstrukcí (obr. 2).



Obr. 2 Pneumatický solenoidální ventil a jeho řez (1 - armatura ventilu, 2 - vstup, 3 - výstup, 4 - napájení, 5 - cívka, 6 - zpětná pružina, 7 - kotva, 8 - výstupní kanál)

Solenoidální ventil je klíčový akční či řídicí člen v automobilovém průmyslu, výrobním, leteckém, těžebním a mnoha dalších. Charakter členu vyplývá ze soustav elektromagnetických a mechanických rovnic a rovnic proudění. Již řadu let je úspěšně používán pro svou vysokou přesnost a robustnost, což jsou pro regulaci faktory kritické. I přes všechny pozitivní stránky ani solenoidální ventil není zcela dokonalý. Jeho nevýhodou mohou být například elektromagnetické a mechanické části, neboť vlivem mnoha použitých prvků má ventil vyšší náchylnost k poruchám, a je tedy stále co zlepšovat [4]. Příkladem takové poruchy mohou být například odskoky kotvy způsobené nerovnováhou elektromagnetických sil a tlaku média.

Solenoidální ventily se mohou dělit dle použitého média (pneumatické, hydraulické) nebo dle elektrického proudu, který řídicí obvod budí (stejnoseměrný, střídavý).

K ventilům se také často připsuje označení NO (případně NC), což je anglická zkratka popisující stav ventilu bez přivedeného napětí na řídicí cívku ('Normally open' nebo 'Normally closed') [5].

Další dělení zároveň popisují, jakých funkcí je daný ventil schopen, což je značeno dvěma čísly oddělenými lomítkem (např. 3/2, 5/2, atd.). První číslo označuje počet cest do i z ventilu (tj. všechny výstupy, výfuky, přívody apod.), avšak nezapočítávají se do něj případné pneumatické řídicí signály. Druhé číslo odpovídá počtu jednotlivých poloh (stavů). Běžné ventily jsou většinou monostabilní či bistabilní, ale vyskytují se i vícestavové [6].

1.2 Rešerše metod tvorby matematického modelu

Výběr správné metody řešení je velmi důležitý. Zvolená metoda může být velmi přesná, ale při výpočtech budeme pracovat s příliš velkým množstvím dat a ke správnému výsledku bychom dospěli až za velmi dlouhou dobu. Naopak vybereme-li metodu, jež pracuje s menším množstvím dat, k výsledku se nepochybně dostaneme rychleji, avšak výsledek nemusí být dostatečně přesný [7]. V praxi se při řešení různých problémů metody často kombinují a prolínají k dosažení co nejpřesnějších výsledků v co nejkratším časovém intervalu. Již bylo vyvinuto mnoho rozličných metod různých postupů a charakteru, níže je jich několik zmíněno.

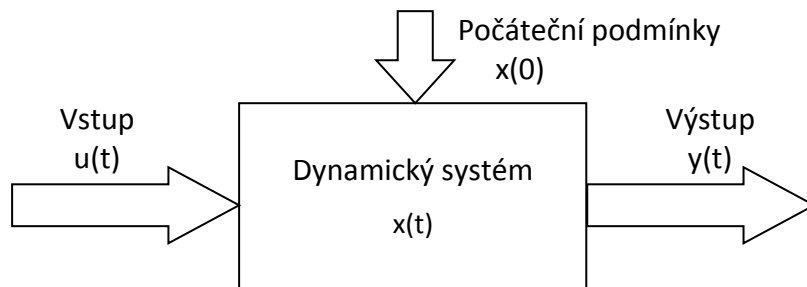
Metoda soustředěných parametrů

Tato metoda je založená na zjednodušení popisu chování prostorově rozložených fyzikálních systémů do jedné topologie sestávající z dílčích prvků, které aproximují chování systému za určitých podmínek [8]. Opačnou metodou k této může být metoda rozložených parametrů.

Typickým příkladem užití této metody lze uvést řešení libovolného elektrického obvodu. Metoda soustředěných parametrů elektrického obvodu provede zjednodušení, které rozložené vlastnosti elektrického obvodu (elektrický odpor, kapacitu, indukčnost apod.) koncentruje do idealizovaných prvků (rezistorů, kapacitorů, induktorů apod.), jež jsou propojeny dokonale vodivými spoji.

Metody stavových proměnných

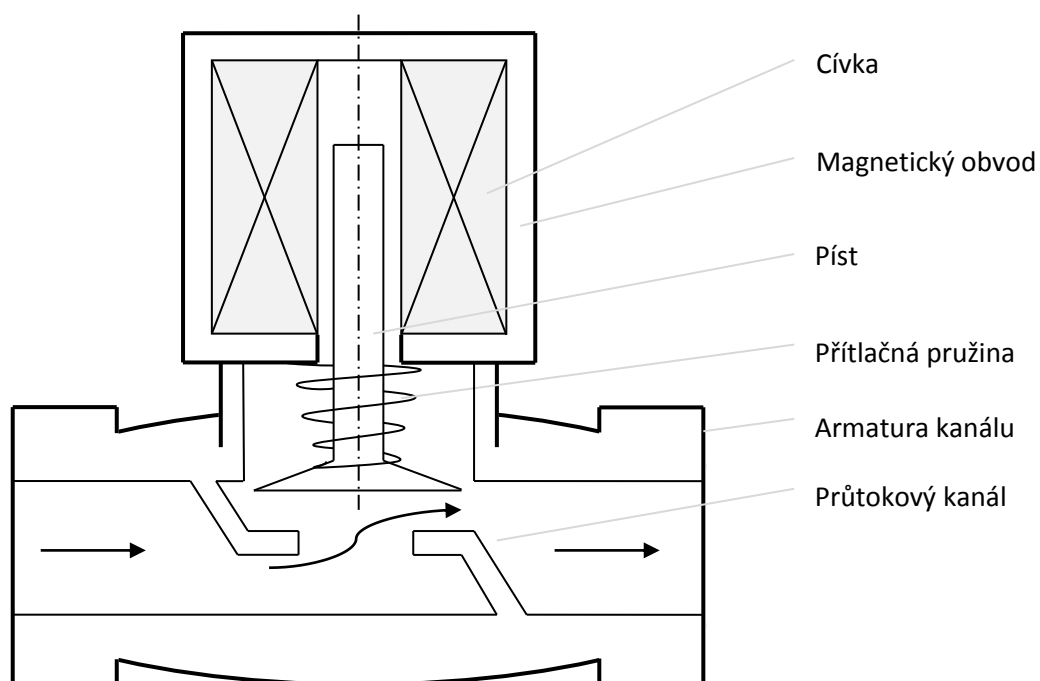
Touto metodou je chování systému popsáno soustavou rovnic pomocí stavových proměnných, jež popisují dynamické vlastnosti onoho systému (obr. 3). Na základě vstupů a doplnění počátečních podmínek lze pomocí stavových proměnných určit následující stav systému a předpovídat tak jeho vývoj a chování [9].



Obr. 3 Blokové schéma metody stavových proměnných

2 Teoretická analýza problému a její spojitý matematický model

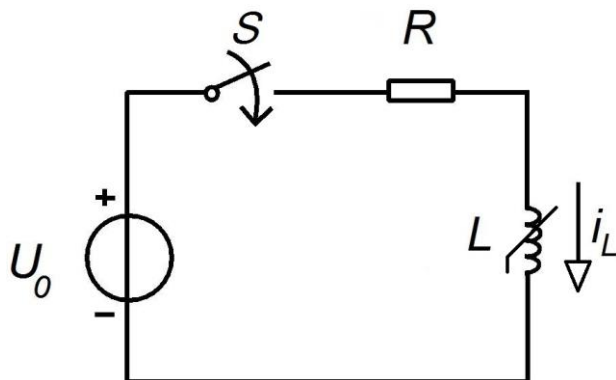
V systému solenoidálního ventilu spolu všechny výše zmíněné subsystemy navzájem souvisí. Síla, působící na píst, vyvolaná elektrickým napětím způsobí posun pístu a tím i změnu parametrů magnetického obvodu, které zpětně ovlivňují velikost síly působící na píst. Síla je tedy závislá na poloze pístu. A jelikož záleží, jak dlouho bude připojený zdroj napětí, případně jaká je jeho okamžitá hodnota, budou navíc všechny stavové veličiny v čase závislé [10].



Obr. 4 Schematické znázornění ventilu, pro který je sestavován matematický model

2.1 Elektrický model

U elektrického modelu se provedla zjednodušení metodou soustředěných parametrů a výsledkem byl elektrický obvod na obrázku 5.



$$R \cdot i_L + \frac{d(L \cdot i_L)}{dt} - U_0 = 0 \quad (1)$$

$$i_L(0) = 0 \quad (2)$$

$$L = L(i_L, s) \quad (3)$$

Obr. 5 Schéma elektrického obvodu solenoidálního ventilu

Samotný elektrický obvod je sériovým spojením rezistence R (odpor drátu), indukčností L , spínače S a napájecího zdroje U_0 . Obvod lze popsat pomocí druhého Kirchhoffova zákona rovnicemi (1-3). V těch se vyskytuje proud procházející cívkou i_L jako stavová proměnná a parametr nelineární indukčnosti L (3), jež závisí na právě procházejícím proudu i_L a na poloze jádra s vůči magnetickému obvodu. Pro jednoznačné určení parametru nelineární indukčnosti bude potřeba z energie magnetického pole určit předpis chování nelinearity indukčnosti a tím konečně získat informaci o chování proudu.

2.2 Mechanický model

U mechanického modelu se posun jádra předpokládá pouze v ose z . Pomocí druhého Newtonova pohybového zákona jsme získali následující rovnice (4-7).

$$m \frac{dv}{dt} = F_{elm} - F_{br} \quad (4)$$

$$v = \frac{dz}{dt} \quad (5)$$

$$v(0) = 0 \quad (6)$$

$$z(0) = z_0 \quad (7)$$

V rovnici (4) se vyskytuje hmotnost pístu m , jeho rychlost v , elektromagnetická síla F_{elm} a brzdící síly F_{br} , které působí proti požadované elektromagnetické síle. Brzdící síla sestává z několika složek, například třecí síly, síly pružiny či aerodynamické síly.

Třecí síla F_t – brzdící síla vznikající třením pístu o stěnu aktuátoru.

$$F_t = f F_n \quad (8)$$

Třecí síla je součinem třecího koeficientu f a normálové síly F_n , jež je shodná se silou gravitační F_g .

$$F_n = F_g = mg \quad (9)$$

kde m je opět hmotnost pístu a g je konstanta gravitačního zrychlení.

Síla pružiny zpětně působící na jádro je pak součinem koeficientu tuhosti k a výchylky x pružiny z klidového stavu

$$F_s = -k \cdot x \quad (10)$$

2.3 Magnetický model

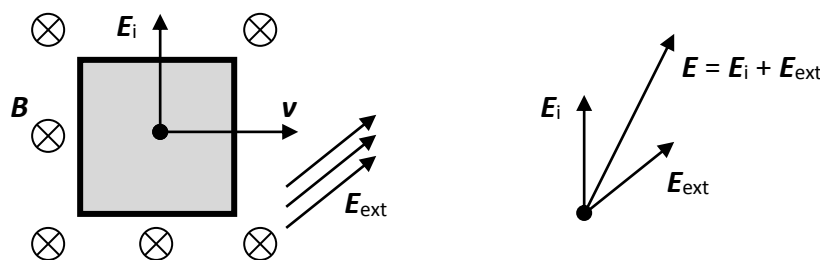
Odvození rovnice pro magnetický vektorový potenciál

Pro vyjádření magnetického pole v okolí a uvnitř ventilu využijeme tzv. magnetický vektorový potenciál \mathbf{A} s Coulombovskou kalibrační podmínkou.

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (11)$$

$$\text{div } \mathbf{A} = 0 \quad (12)$$

Povědomí o chování magnetického potenciálu získáme za použití Maxwellových rovnic a následujících úvah.



Obr. 6 Elektromagnetické pole indukované v pohybujícím se tělese ve vnějším magnetickém poli

Důsledkem druhé Faradayova indukčního zákona se v tělese pohybujícím se rychlostí \mathbf{v} v magnetickém poli \mathbf{B} (obr. 6) indukuje elektrické pole \mathbf{E}_i .

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (13)$$

V tělese o vodivosti γ se následně mohou indukovat proudy \mathbf{J} . Působí-li však v okolí tělesa jiné – externí – elektrické pole \mathbf{E}_{ext} , jsou indukované proudy důsledkem pole výsledného \mathbf{E} .

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_i + \mathbf{E}_{\text{ext}} \quad (14)$$

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} = \gamma(\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{E}_{\text{ext}}) \quad (15)$$

V první Maxwellově rovnici

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (16)$$

dosadíme za intenzitu magnetického pole \mathbf{H} magnetickou indukci \mathbf{B} a za ni magnetický potenciál \mathbf{A} . Posuvné proudy zde můžeme zanedbat, neboť se znatelně projevují až při mnohem rychlejších časových změnách.

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (17)$$

Do druhé Maxwellovy rovnice

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (18)$$

dosadíme z rovnice (15) výslednou intenzitu elektrického pole \mathbf{E} a magnetický potenciál \mathbf{A} z rovnice (11) a obdržíme

$$\text{rot} \left(\frac{\mathbf{J}}{\gamma} - \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right) = -\frac{\partial(\text{rot } \mathbf{A})}{\partial t} = -\text{rot} \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) \quad (19)$$

dále úpravou získáme

$$\frac{\mathbf{J}}{\gamma} - \mathbf{v} \times \mathbf{B} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \text{grad } \varphi \quad (20)$$

kde φ je libovolná skalární funkce odpovídající elektrickému potenciálu.

Vynásobením rovnice (19) elektrickou vodivostí γ a dosazením do rovnice (16) obdržíme

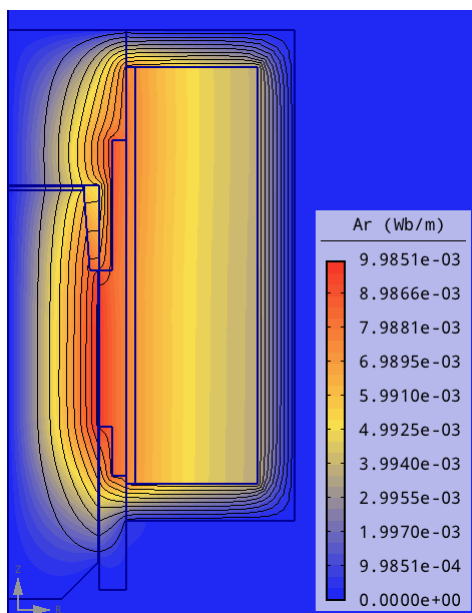
$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{A} \right) = \gamma(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \text{grad } \varphi \quad (21)$$

V modelu zanedbáme hustotu indukovaných proudů vlivem časové změny magnetického potenciálu a výslednou rovnicí, se kterou budeme pracovat, bude

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{A} \right) - \gamma(\mathbf{v} \times \text{rot } \mathbf{A}) = \mathbf{J}_{\text{ext}} \quad (22)$$

kde druhý člen rovnice vyjadřuje hustotu indukovaných proudů v důsledku pohybu jádra (pístu) rychlostí \mathbf{v} a \mathbf{J}_{ext} vyjadřuje hustotu externích proudů z vnějšího zdroje – budící cívky.

Názorné rozložení magnetického potenciálu je patrné na obr. 7.



Obr. 7 Rozložení magnetického vektorového potenciálu ve ventilu

Výpočet indukčnosti a elektromagnetické síly

Pro indukčnost soustavy potřebujeme nejprve hustotu energie, s jakou se energie v soustavě vyskytuje. Ta je z teorie elektromagnetických polí obecně rovna

$$w_m = \int_0^B \mathbf{H} d\mathbf{B} \quad (23)$$

kde \mathbf{H} je intenzita magnetického pole a \mathbf{B} je magnetická indukce. Budeme-li znát hustotu energie, můžeme integraci přes celý objem soustavy získat velikost celkové magnetické energie

$$W_m = \int_V w_m dV \quad (24)$$

A nyní lze dopočítat indukčnost celé soustavy z energetické definice indukčnosti

$$L = \frac{2W_m}{i^2} \quad (25)$$

Celkovou energii W_m využijeme i při výpočtu složky elektromagnetické síly F_y , kterou získáme derivací energie ve směru posuvu jádra, tedy podle osy y .

$$F_y = -\frac{\partial W_m}{\partial y} \quad (26)$$

Určení kubického polynomu metodou nejmenších čtverců

Nelineární indukčnost systému (obr. 4) závisí na dvou parametrech – posunu jádra v cívce a velikosti proudu procházejícího cívku. Graficky vyjádřeno tedy hledáme plochu, která nám popisuje velikost indukčnosti $L(i,s)$ měnící se v osách proudu a posunu. Předpis pro tuto plochu získáme metodou nejmenších čtverců porovnáním s výsledky tohoto předpisu a hodnot z numerického modelu.

Předpis obecného kubického polynomu, který zvolíme pro popis plochy, bude tedy následující

$$L(i, s) = a_0 + a_1 i + a_2 s + a_3 i s + a_4 i^2 + a_5 s^2 + a_6 i^2 s + a_7 i s^2 + a_8 i^3 + a_9 s^3 \quad (27)$$

Cílem metody nejmenších čtverců je dosáhnout v součtu co nejmenší plochy všech čtverců, jejichž strany jsou rovné odchylkám mezi naměřenou hodnotou $L_{i,j}$ v bodech (i,s_j) a aproximovanou hodnotou plochy $L(i,s_j)$ [10], tedy

$$L = \sum (L_{i,j} - L(i, s_j))^2 = \min \quad (28)$$

Dosažením rovnice (26) do předpisu metody nejmenších čtverců (27) obdržíme

$$L = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} [L_{i,j} - (a_0 + a_1 i + \dots + a_9 s^3)]^2 = \min \quad (29)$$

kde n_x je počet hodnot na ose proudu (v této práci tedy 6 hodnot proudu rovnoměrně rozdělených od 0 do jmenovitého proudu) a n_y počet hodnot na ose polohy (zde 17 hodnot, kde prvních 10 hodnot je od sebe s menším rozestupem pro přesnější popis chování).

Požadované minimum funkce uvedené v rovnici (28) získáme parciálními derivacemi funkce podle všech 9 koeficientů, které položíme rovné nule (nulovému sloupcovému vektoru).

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial L}{\partial a_0} \\ \frac{\partial L}{\partial a_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial a_9} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} \varphi_{i,j} \\ \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} \varphi_{i,j} i_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} \varphi_{i,j} s_j^3 \end{pmatrix} = 0 \quad (30)$$

kde polynom $\varphi_{i,j}$ můžeme rozepsat jako

$$\varphi_{i,j} = n_x n_y a_0 + n_y a_1 \sum_{i=1}^{n_x} i_i + \dots + n_x a_9 \sum_{j=1}^{n_y} s_j^3 - \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} L_{i,j} \quad (31)$$

a po dosažení rovnice (31) do soustavy (30) tedy konečně dostáváme soustavu rovnic o 10 neznámých koeficientech kubického polynomu $L(i,s)$

$$\begin{pmatrix} n_x n_y & n_y \sum_{i=1}^{n_x} i_i & \dots & n_x \sum_{j=1}^{n_y} s_j^3 \\ n_y \sum_{i=1}^{n_x} i_i & n_y \sum_{i=1}^{n_x} i_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} s_j^3 i_i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_x \sum_{j=1}^{n_y} s_j^3 & \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} i_i s_j^3 & \dots & n_x \sum_{j=1}^{n_y} s_j^6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} L_{i,j} \\ \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} L_{i,j} i_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} L_{i,j} s_j^3 \end{pmatrix} \quad (32)$$

což můžeme jednoduše zapsat jako

$$\underline{M} \cdot \underline{a} = \underline{L} \quad (33)$$

kde \underline{a} je vektor neznámých koeficientů, \underline{L} je vektor pravé strany rovnice a \underline{M} je stavová matice. Z této rovnice již můžeme získat hledané koeficienty kubického polynomu popisujícího plochu indukčnosti v závislosti na proudu a posunu jádra. Předpis tohoto polynomu bude v následujících simulacích využíváno stejně tak jako předpisu polynomu síly, který bychom obdrželi stejným způsobem [11][12].

3 Numerický model

Jelikož není možné řešit výše uvedené modely analyticky, muselo se přistoupit k numerickému řešení. Vybraným výpočetním rozhraním byl Agros2D pracující s numerickou metodou výpočtu zvanou - metoda konečných prvků (v angličtině finite element method – FEM).

3.1 Metoda konečných prvků

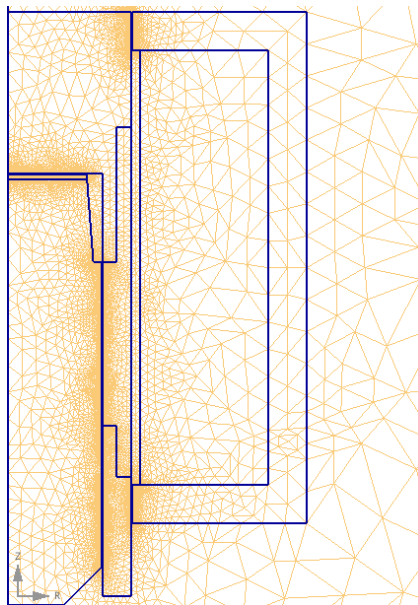
Metoda konečných prvků je numerická metoda sloužící k simulaci chování veličin na vytvořeném fyzikálním modelu. Ačkoliv jsou principy této metody známy již delší dobu, k jejímu masovému využití došlo teprve s nástupem moderní výpočetní techniky. Vznikla díky potřebě řešit složité úlohy z pružnosti a strukturální analýzy v inženýrské praxi (50. léta 20. století) [13].

Princip metody konečných prvků můžeme rozdělit do několika kroků.

Nejprve navrhne fyzikální model, který popíšeme soustavou parciálně diferenciálních rovnic určujících jeho chování v definičním (zkoumaném) prostoru. K těmto rovnicím doplníme počáteční a okrajové podmínky, kterými předdefinujeme, jak se systém chová na hranicích zkoumaného prostoru. V našem případě, určení rozložení magnetického pole v modelu, stanovíme okrajové podmínky magnetického vektorového potenciálu následovně.

Předpokládáme, že magnetický potenciál se ve velké vzdálenosti od zkoumaného uspořádání rovná nule. A jelikož je náš fyzikální model osově symetrický, platí v ose okrajová podmínka antisymetrie – magnetický potenciál je podél ní roven nule.

Dalším krokem je diskretizace definičního prostoru do sítě konečného počtu elementů (obr. 8) zvoleného tvaru (zde trojúhelníky). Hustotu elementů zvolíme podle toho, kde očekáváme prudké změny či potřebujeme přesnější – podrobnější přehled o chování pole.



Obr. 8 Rozložení diskretizační výpočetní sítě v popisovaném modelu

Dále zvolíme tvar a stupeň funkce, kterou budeme popisovat hledané veličiny ve zvolených prvcích, čím velmi ovlivňujeme přesnost, ale i celkovou dobu výpočtu a tedy nároky na výpočetní systém.

Po rozvržení modelu, stanovení okrajových podmínek a rozprostření diskretizační sítě, se rozsáhlá soustava rovnic řeší pomocí slabé formulace, což je matematický výraz pro způsob řešení soustavy diferenciálních rovnic, které využívá Agros2D [14].

4 Simulace konkrétního ventilu

K úspěšnému zpracování modelu je potřeba specifikovat vlastnosti a parametry ventilu (tab. 1), neboť od přesnosti parametrů, vložených k simulaci, se odvíjí i celková přesnost sestavovaného modelu.

4.1 Specifikace parametrů ventilu

Tab. 1 Štítkové hodnoty modelovaného ventilu [15]

Typ ventilu	EVPE 1050.02
Příkon	20 W
Pracovník přetlak	5 kPa
Napájecí napětí	230 V, AC
Frekvence	50 Hz
Jmenovitá světlost	40 mm
Spínací čas	max. 1s
Použitý materiál	Těleso – mosaz; vnitřní části – nerez, Al, mosaz; těsnění – pryž NBR, HNBR

Ventil se skládá ze třech hlavních částí – z elektricky ovládané cívky, pístu ventilu a mosazné armatury kanálu (obr. 9). Z hlediska modelování si blíže popíšeme píst a cívku ventilu a jejich výrobní materiály.



Obr. 9 Složený ventil

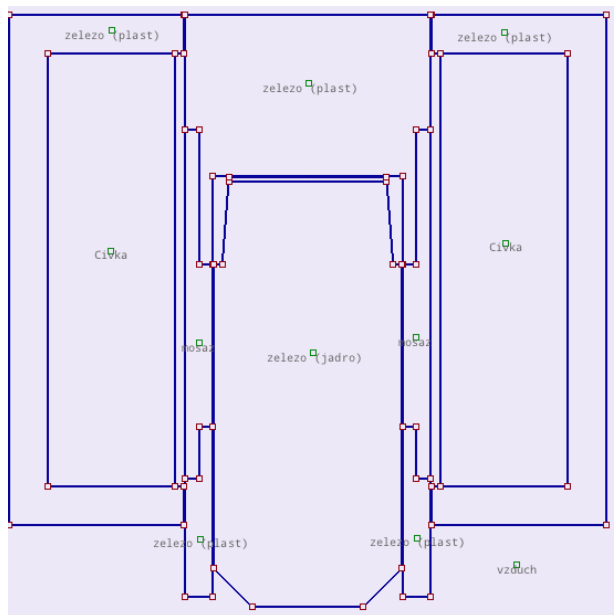


Obr. 10 Cívka ventilu, vložka, jádro ventilu

Součástí cívky ventilu je dvoucestný můstkový usměrňovač připevněný na vstup cívky (patrný na Obr. 9), který převádí síťové napětí na stejnosměrné a přenáší jej na svorky cívky samotné.

Závity cívky jsou zvenku uzavřeny v nerezovém plášti (obr. 10 vlevo) a vnitřek dutiny je zalit určitým druhem slídy – nemagnetickým, elektricky nevodivým materiálem.

Jádro cívky (obr. 10 vpravo) je válcového tvaru tvořeného z feromagnetického materiálu. Feromagnetické tělísko je přes mosaznou ojnici a mosazný kloub připevněné k pryžovému těsnění. Dále je na ojnici navlečená nerezová pružina, která byla v době pořizování obrázku sejmutá pro jednodušší manipulaci.



Obr. 11 Schematické zobrazení průřezu cívkou s vloženým jádrem i vložkou

Jádro ale není v cívce vloženo jen tak volně. Zasouvá se do vložky umístěné nepohyblivě v cívce. Tato vložka (obr. 10 uprostřed) byla slisovaná za tepla ze tří částí – ze dvou feromagnetických částí (vrchní a spodní kus vložky) a z mosazného prstence spojujícího horní a dolní feromagnetikum.

Určení počtu závitů cívky a průměr jednoho závitu

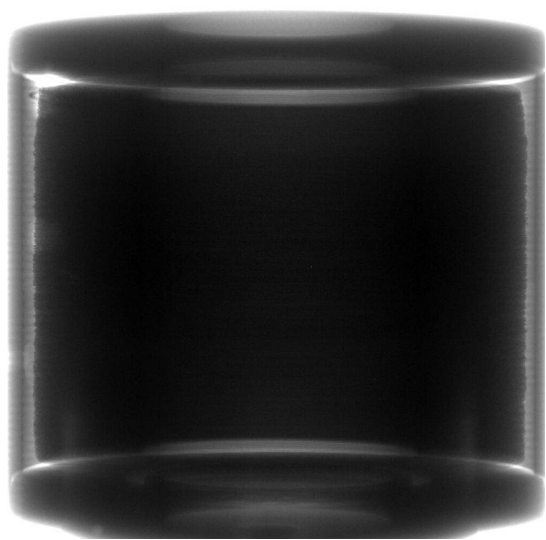
Většinu parametrů (rozměry, použité materiály) jsme byli schopni získat změřením ventilu či nahlédnutím do katalogového listu výrobce. Dva parametry jsme však měřením získat nemohli – počet závitů v cívce a průměr jednoho závitu, a byli jsme nuceni je obdržet jiným, kreativnějším způsobem. K výpočtu jsme použili soustavu rovnic, kde první rovnice (34) popisuje výpočet odporu cívky, který jsme byli schopni změřit, a druhá (35) je výpočet koeficientu plnění, který byl empiricky stanoven na 66%.

$$R = N \frac{1}{\gamma} \frac{2\pi r_z}{S_{Cu}} \quad (34)$$

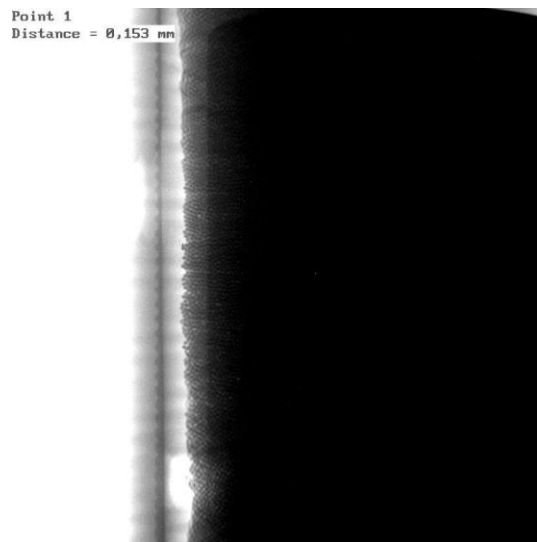
$$k = \frac{NS_{Cu}}{S_C} \quad (35)$$

kde R je elektrický odpor cívky, N je hledaný počet závitů v cívce, γ je elektrická vodivost mědi, r_z je střední poloměr cívky, S_{cu} je neznámý průřez jednoho závitu, ze kterého dopočteme průměr jednoho drátu a S_c je celkový průřez cívky.

Výsledky obdržené ze soustavy rovnic během počítačové simulace ($N = 20\,437$ závitů a průměr drátu $d = 0,09$ mm) bylo potřeba ověřit, k čemuž jsme využili počítačové tomografie.

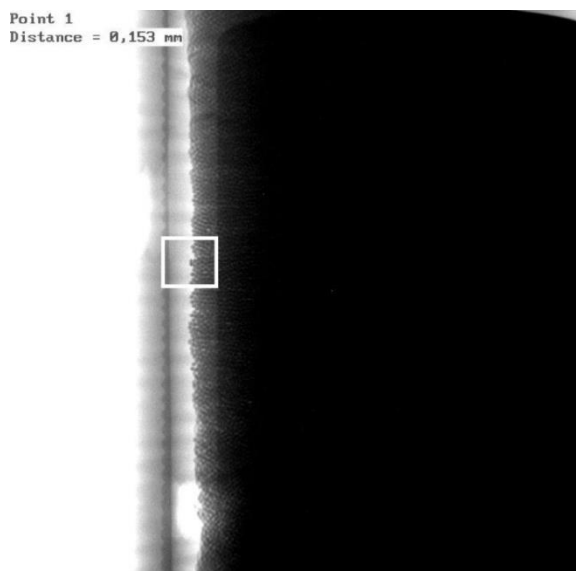


Obr. 12 CT scan celé cívky



Obr. 13 Snímek boční strany

Celou cívku se nepodařilo prozářit (obr. 12), kvůli extrémnímu počtu závitů – množství mědi bránícímu počítačové tomografii v prozáření cívky. Jelikož není tolik závitů v boku cívky, bylo možné pořídit alespoň částečný scan boční strany (obr. 13), na kterém již jsou patrnější rozměry jednoho závitu a zároveň jsme získali představu o tom, jak hustě je cívka navinutá a jak tenký drát k tomu byl využit.



Obr. 14 CT scan boční strany



Obr. 15 Detail jednoho závitu

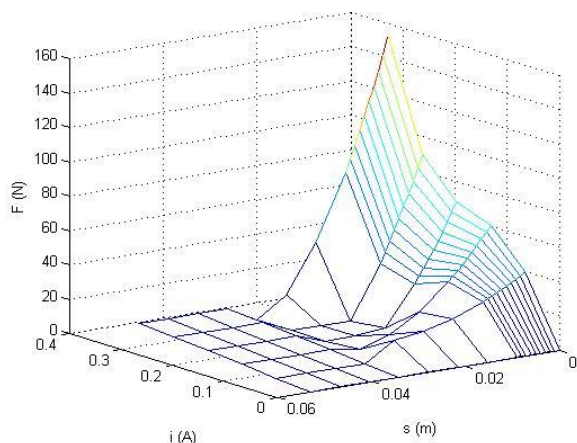
Při takovém množství závitů (obr. 14) bylo přesné určení rozměru samotného jednoho závitu velmi obtížné a nepřesné. Zásadní roli hrála kvalita snímku, neboť šířka závitu se pohybovala v jednotkách pixelu (obr. 15). I přesto jsme se alespoň dozvěděli, že šířka

jednoho závitu se pohybuje řádově v desetinách až setinách milimetru, čemuž odpovídal i výsledek předchozího výpočtu a jak velké množství závitů je v cívce navinuto.

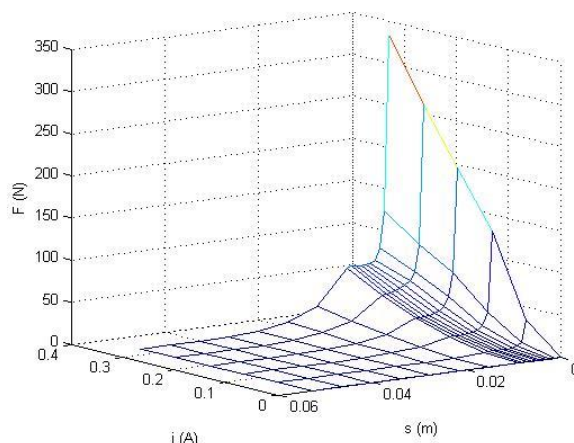
4.2 Model ventilu v počítačových simulacích

V následujících kapitolách budou stručně popsány dvě počítačové simulace modelující dynamické vlastnosti elektromagnetického ventilu, které jsem v rámci své bakalářské práce s nemalou pomocí vytvořil. V první jsem dynamické charakteristiky získal iterační metodou s pomocí kubických polynomů síly a indukčnosti. Druhá z nich je napsána ve výpočetním programu Matlab a je v ní využita analogie elektrických obvodů s magnetickým tokem. Výsledky obdržené v těchto simulacích však budou popsány až v dalších kapitolách.

První simulace spočívala v napočítání indukčností a sil působících ve ventilu pomocí programu Agros2D, jejich aproximace pomocí kubických polynomů postupem popsaným v podkapitole 2.3, dopočtení indukčnosti a síly při daném posunu a proudu a jejich dosazení je do rovnic elektrického i mechanického modelu (rovnice 1 a 4). A pak konečně Eulerovou metodou s dostatečně malým časovým krokem získat dynamické charakteristiky určující chování elektromagnetického ventilu.



Obr. 16 Rozložení aproximované plochy polynomu síly



Obr. 17 Rozložení naměřené plochy síly

Jak je patrné na obrázcích 16 a 17, plochu síly se mi nepodařilo dokonale aproximovat, naopak ji bylo potřeba ještě uměle upravit, neboť v některých úsecích například klesala do záporných hodnot apod.

Při výpočtech indukčností potřebných pro určení koeficientů aproximovaného polynomu jsem dostával extrémní a nereálné hodnoty a byl jsem nucen postup výpočtu s indukčností popsanou tímto polynomem zavrhnout. V této simulaci je indukčnost proto dále stanovena na konstantní hodnotu. Indukčnost je pro tento ventil velkým tématem, ale vysvětlení těchto extrémních výsledků budu popisovat později.

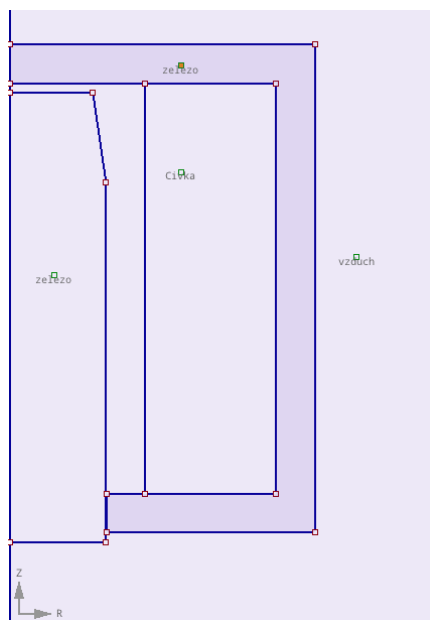
Druhá simulace je napsána v programovacím prostředí Matlab. Nyní tedy budu popisovat jednotlivé části skriptu, přičemž celý skript bude k dispozici k nahlédnutí v příloze této práce.

V první části skriptu jsou definovány materiálové konstanty, rozměry ventilu a napětí zdroje včetně odporu cívky. Všechny informace stanovené v této části byly obdrženy z měření či katalogových hodnot ventilu.

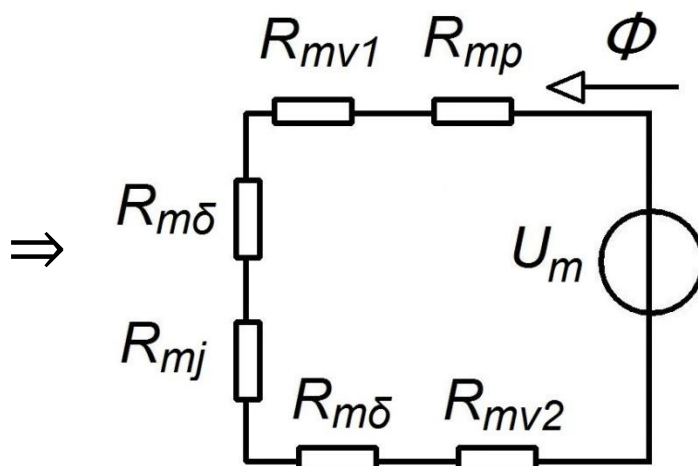
Další částí programu je výpočet celkového počtu závitů výše uvedeným způsobem – ze soustavy rovnic (33) a (34).

Nyní bylo potřeba stanovit nelinearitu permeability a vytvořit tak možnost sycení magnetického obvodu. Nelinearita byla stanovena tabulkou (tabulka hodnot závislosti magnetické indukce na relativní permeabilitě) o pěti hodnotách, která odpovídala feromagnetické oceli ČSN 12040. Tabulka byla interpolována polynomem pátého řádu, se kterým se dále snadno pracovalo, a tím jsme zahrnuli nelinearitu permeability do naší simulace. (Poznámka: při požadavku hodnot relativní permeability, jež ležely mimo definiční obor tabulky, byly hodnoty zvoleny jako krajní hodnoty tabulky – mimo definiční obor stanovený tabulkou tedy byly hodnoty konstantní)

Důležitým bodem modelu bylo určení celkové reluktance, neboli magnetického odporu, jednotlivých prvků ventilu, přičemž reluktance byla závislá na magnetickém toku (vliv sycení) a poloze jádra. Celková reluktance byla počítána metodou soustředěných parametrů s využitím analogie s elektrickými obvody (obr. 18 - 19). Na obr. 19 se vyskytuje šest do série spojených magnetických odporů (ve směru toku: odpor pláště, horního víka, vzduchové mezery, jádra, opět vzduchové mezery, spodního víka a zdroje magnetického napětí) z nichž odpory horního a spodního víka byly spočteny numerickou integrací k postižení nerovnoměrného rozložení magnetického toku vlivem narůstající plochy při integraci.



Obr. 18 Zjednodušené schéma ventilu



Obr. 19 Popis schématu magnetickým obvodem

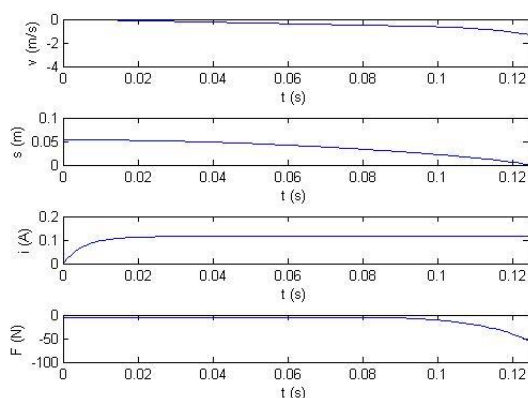
Dále následovaly funkce pro výpočet rezidua z Hopkinsonova zákona, funkce pro výpočet energie a indukčnosti systému.

V následujících částech skriptu se nachází funkce Newtonovy numerické metody pro určení derivace, která byla hned použita následně ve výpočtech dynamických charakteristik.

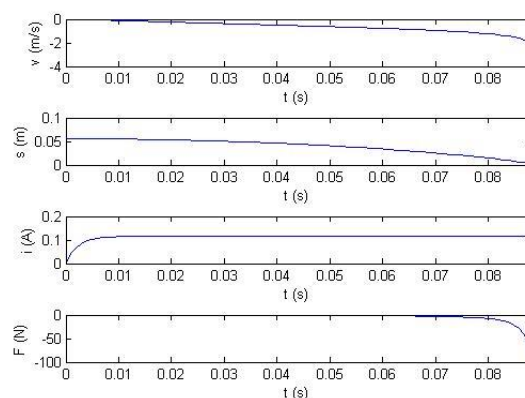
V závěru skriptu se nachází jen příkazy pro vykreslení grafů s příslušnými kosmetickými úpravami.

4.3 Výsledky počítačových simulací

Z výše uvedených simulací jsem obdržel tyto výsledky dynamických charakteristik



Obr. 20 Dynamické charakteristiky
napočítané iterační metodou



Obr. 21 Dynamické charakteristiky
napočítané ze skriptu v Matlabu

Výsledné průběhy obou metod (obr. 20 a 21) mají stejné proporce, ale přesto se lehce liší, což byl jev očekávaný. Nyní popíši rozdíly mezi jednotlivými výsledky simulací a pokusím se je zdůvodnit.

Začneme-li průběhem proudu (třetí graf), je na něm patrný ideální exponenciální průběh. Exponenciála dosahuje u první simulace (Iterační metoda na obr. 20) ustálené hodnoty během dvaceti milisekund, nicméně ve druhé simulaci už během deseti milisekund. Tuto chybu připisuji k neuvažování nelinearity indukčnosti, kdy jsem byl nucen její hodnotu nastavit jako konstantní. Pro určení kubického polynomu aproximací bylo potřeba mít napočítané správné hodnoty indukčnosti při různých hodnotách proudu a posunu jádra. Tyto hodnoty jsem zjistil prostřednictvím programu Agrosu2D. Důvodem takto velkých indukčností pravděpodobně bylo, že výpočty v Agrosu2D byly pojaty jako statická úloha – posunul jsem jádro a změnil indukčnosti v ustáleném stavu atd. – ale později, v měření, byla zjištěna jednoznačně dynamická vlastnost. Tou bylo indukované napětí, které se vlivem pohybu feromagnetického jádra v magnetickém poli indukovalo v cívce a působilo proti napětí zdroje, (což popisuje Lenzův zákon), což vedlo k výrazné deformaci průběhu proudu [16].

Průběhy sil jsou také značně odlišné. Kubický polynom použitý v první simulaci dosahoval vlivem aproximace nižších maximálních hodnot, než byly hodnoty sil změřené prostřednictvím Agrosu2D. Z toho důvodu se jeví postupný nárůst síly jako pomalý a dosahuje nižších hodnot ve špičce. Oproti tomu bylo chování sil ve druhé simulaci, psané kompletně v Matlabu, výrazně agresivnější.

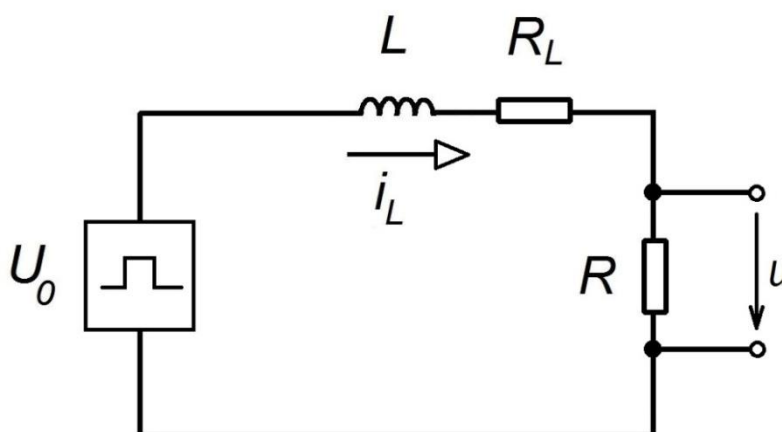
Se silou úzce souvisí průběhy rychlosti a posunu, kdy nižším působením síly dosahovalo jádro ventilu nižší rychlosti a tím i prodloužení celkové doby zasunutí ventilu.

5 Zhodnocení výsledků a jejich experimentální verifikace

Během práce na dříve uvedených simulacích zvoleného elektromagnetického ventilu jsem se postupně setkal s opravdu velkým množstvím výsledků různého původu a příčin, a proto bylo třeba provádět nespočet měření a ověřování správnosti simulací. Nyní bych chtěl v této kapitole tyto informace shrnout, odůvodnit, proč či z jakého důvodu jsme se během simulací nedopracovali kýžených výsledků a tak postupně zakončit svojí bakalářskou práci.

5.1 Určení indukčnosti systému a její závislosti

Indukčnost jsme měřili nepřímo pomocí generátoru obdélníkových impulzů U_0 a osciloskopu snímajícího průběh napětí u na předřadném odporu R ($u = u(i_L) = R \cdot i_L$) (obr. 22). Cívka je v obvodě zastoupená vlastní indukčností L a sériovým odporem R_L .



Obr. 22 Schéma zapojení

Měření jsme prováděli od 0 Hz (jako napěťový skok) až do 1 kHz po 100 Hz při amplitudě 1V a snímali vždy náběžnou hranu výstupního napětí u na odporu R . Pro každou hodnotu frekvence proběhla tři měření – nejprve samotné cívky, cívky se vsunutou vložkou a konečně s vložkou i jádrem.

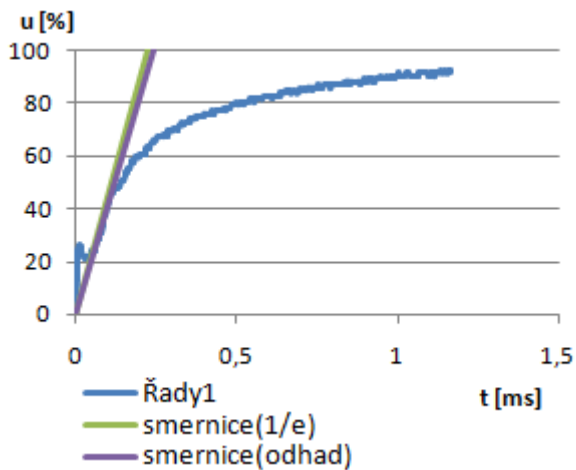
Cílem každého z měření bylo určit časovou konstantu τ , ze které jsme mohli spočítat indukčnost cívky L

$$L = \tau \cdot R_c, \quad R_c = R_L + R = 2000 + 39000 = 41000 \Omega$$

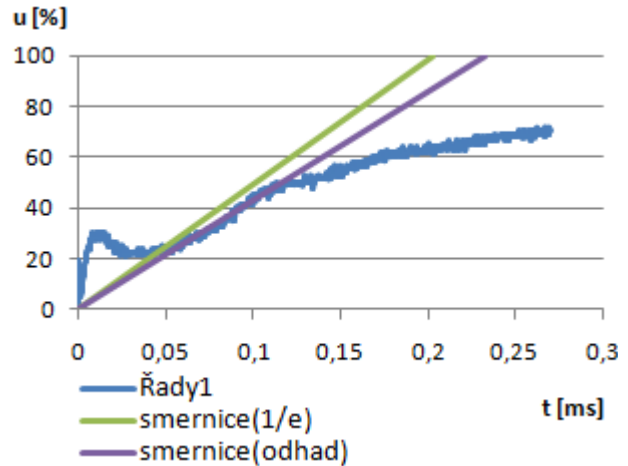
kde $R_L = 2 \text{ k}\Omega$ je odpor cívky určený z předešlého měření jednoduše Ohmovou metodou a $R = 39 \text{ k}\Omega$ je předřadný odpor zvolený pro snímání napětí.

Časovou konstantu jsme určovali dvěma způsoby. Z definice exponenciály, kdy exponenciála za dobu τ dosáhne 62,3% ($0,623 = 1 - 1/e$) z ustálené hodnoty. Anebo odhadem, kdy jsme určili rovnici tečné přímky procházející počátkem přechodného děje a dobu τ jako průsečík přímky s ustálenou hodnotou.

Při nízkých frekvencích byly výsledky obou metod téměř shodné (obr. 22), ale se zvyšující se frekvencí se exponenciála deformovala a přesnější výsledky poskytoval spíše odhad (obr. 23).

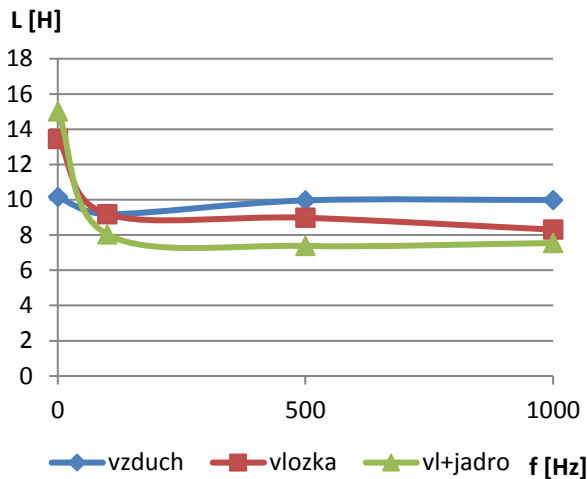


Obr. 23 Určení časové konstanty při 100 Hz se zasunutou vložkou

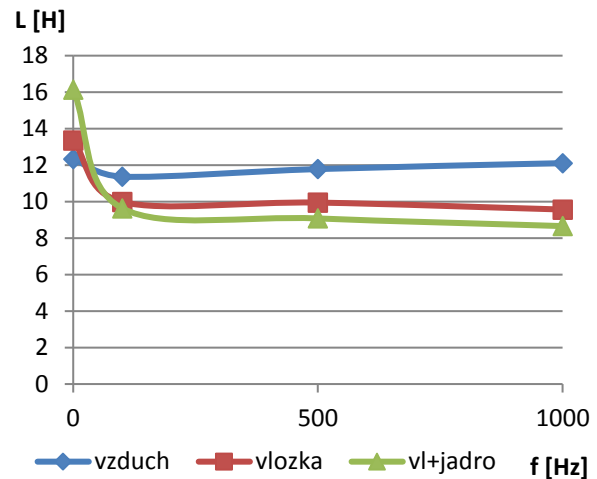


Obr. 24 Určení časové konstanty při 1 kHz se zasunutou vložkou

Ze všech provedených měření byly výše uvedené metody aplikovány na měření třech frekvencí – 100 Hz, 500 Hz a 1 kHz a pro tři zmíněné polohy jádra a vložky.

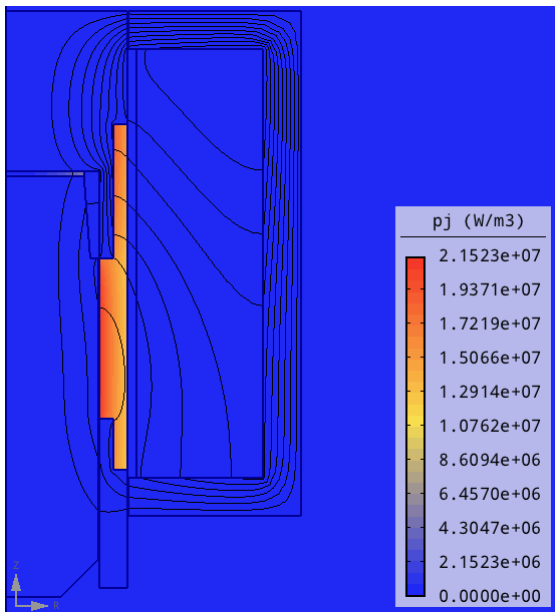


Obr. 25 Indukčnosti získané metodou 1/e

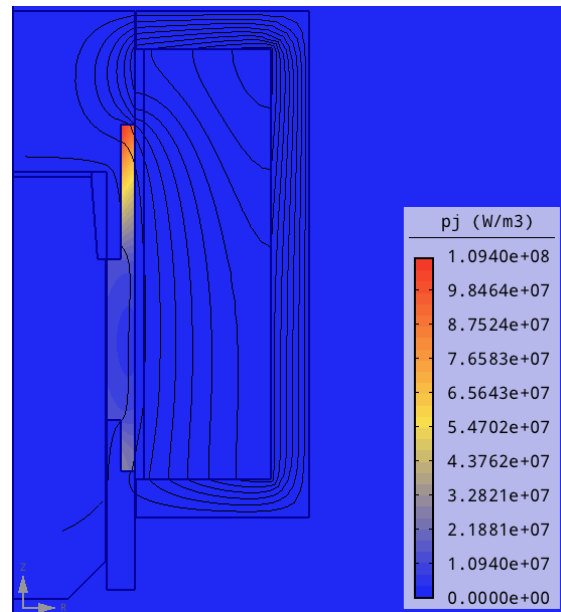


Obr. 26 Indukčnosti získané metodou odhadu

Zvláštním jevem je, že s přibývajícím výplní cívky magnetickým materiálem (vložka a pak vložka s jádrem) u napěťového skoku indukčnost stoupá, kdežto při vyšších frekvencích je naopak menší. Tento jev bude nejspíše způsoben vířivými proudy naindukovaných v mosazné části vložky, jejichž magnetické pole působilo proti původnímu poli cívky. Následující dvě simulace v Agrosu2D blíže ukáže vliv vířivých proudů na magnetický obvod ventilu.



Obr. 27 Rozložení hustoty ztrát vířivých proudů při 50 Hz



Obr. 28 Rozložení hustoty ztrát vířivých proudů při 1 kHz

Pro projevení vířivých proudů musí být tok magnetickým obvodem časově proměnný a tedy i proud procházející cívkou. Frekvence použitá při simulaci vlevo (obr. 27) byla 50 Hz pro projevení vířivých proudů. Při této frekvenci se indukcí vířivých proudů podařilo prozářit mosaznou vložku a rovnoměrně rozložit hustotu ztrát, tím část magnetického toku, kterou pole vířivých proudů nedokázalo přesměrovat, se uzavírá přes magnetické jádro umístěné ve vložce.

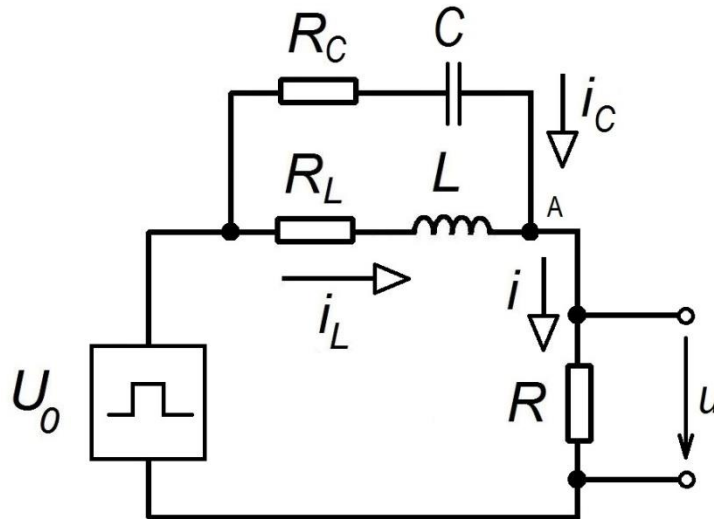
Při použití vyššího kmitočtu byl výsledek na simulaci vpravo (obr. 28), kdy se indukcí vířivých proudů mosaznou vložku prozářit nepodařilo. Rozložení hustoty ztrát je nerovnoměrné a pole vytvořené vířivými proudy působící proti poli cívky úplně přesměruje tok obvodem mimo magnetické jádro.

Shrňme-li tedy poznatky ze simulací zaměřených na vířivé proudy, můžeme mosaznou část vložky označit za jakési stínění sloužící k omezení průchodu magnetického toku jádrem cívky.

Budeme-li brát v úvahu ustálený stav bez vlivu vířivých proudů, pak bez protichůdného toku od vířivých proudů jde veškerý magnetický tok přes jádro cívky a způsobuje nasycení magnetického obvodu. To má za následek zvýšení celkové energie systému a tedy i indukčnosti, se kterou je přímo úměrná celková doba sepnutí (zasunutí) jádra do vložky. Výrobce tímto způsobem dosáhl kratší doby sepnutí ventilu.

I přes vysokou indukčnost v obvodu se v každém průběhu napětí na počátku objevuje napěťová špička (patrná na obr. 23 a 24).

Jelikož má cívka velký počet závitů, bude se zde i významně projevovat mezizávitová kapacita. První špička v každém průběhu napětí bude právě způsobena proudovým skokem přes mezizávitovou kapacitu, který se průchodem přes snímaný odpor projeví jako špička napětí. Náhradní schéma bychom tedy měli upravit asi takto

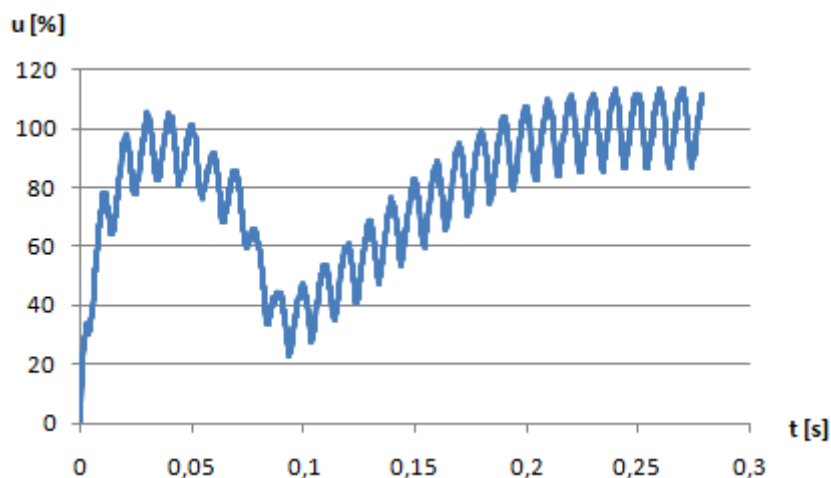


Obr. 29 Upravené schéma zapojení respektující mezizávitovou kapacitu

kde C zastupuje mezizávitovou kapacitu a R_C nedokonalou izolaci závitů v cívce (dielektrika kapacity). Tím pádem se vše mění a předchozí výsledky indukčnosti při různých frekvencích a další nejsou přesné, neboť časová konstanta τ již není pouhý podíl indukčnosti a odporu obvodu, nýbrž jiný složitější výraz závislý rovněž na mezizávitové kapacitě.

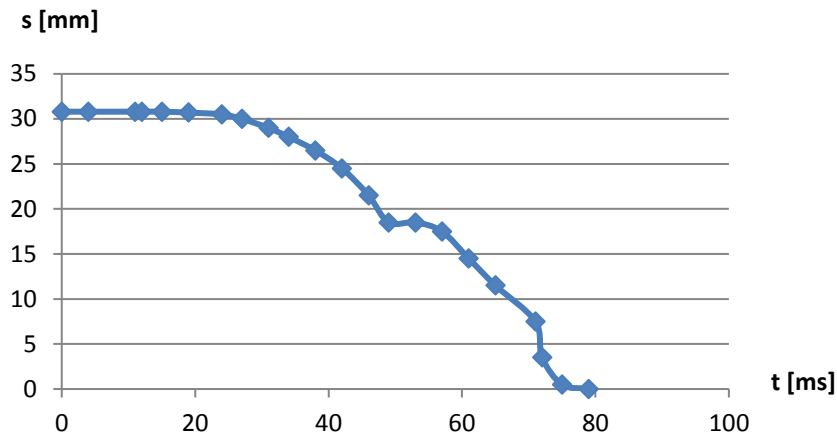
5.2 Naměřené dynamické charakteristiky ventilu

Během simulací se počítaly čtyři průběhy – proudu, rychlosti, poloha a síly v čase. Průběh proudu jsme změřili na osciloskopu, působení síly siloměrem a průběh polohy jsme měřili vysokorychlostní kamerou, ze které jsme byli schopni přibližně určit i okamžitou rychlost jádra.



Obr. 30 Průběh proudu při zasouvání jádra do ventilu

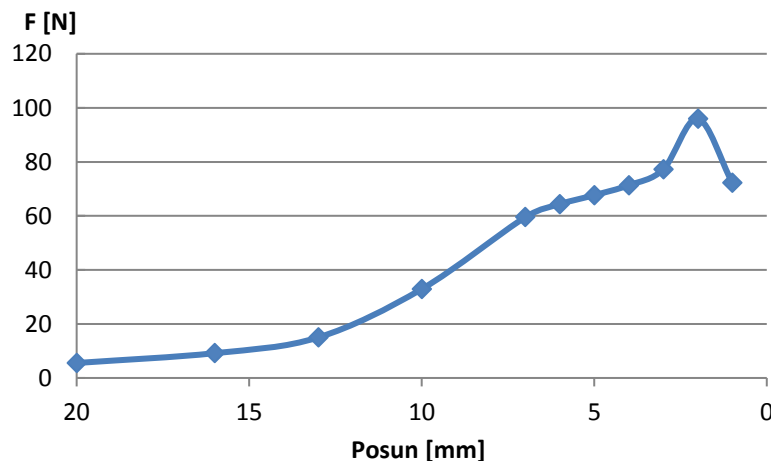
Na obrázku 30 je vidět nárůst proudu v okamžiku připnutí cívky ke zdroji napětí v provozních podmínkách. Během prvních desítek milisekund proud exponenciálně vystoupá na téměř ustálenou hodnotu, což už se nepovede, neboť po určité době proud dosáhne hodnoty, kdy již je schopen pohybovat jádrem do cívky a tím indukovat napětí v cívce, které působí proti napětí zdroje. Tím můžeme vysvětlit proudový pokles, jehož minimum zároveň naznačuje kompletní zatažení jádra do cívky (přibližně 80 ms). Dále se už jádro nepohybuje a začíná opět nárůst proudu s výrazně vyšší indukčností.



Obr. 31 Závislost polohy jádra na čase

Posun jádra je patrný na obrázku 31 a odpovídá průběhu proudu – přibližně v čase 50 ms se začalo jádro pohybovat a v 80 ms se zatáhlo do cívky. Navíc je tu ovšem patrné koleno přibližně v čase 50 ms, které bylo způsobené naražením jádra do nerovnosti ve vložce cívky, která vznikla lehkou deformací při manipulaci s vložkou. Dále je patrný strmý posun jádra, kdy už je velmi blízko konce a působí zde na něj velká magnetická síla.

Třetí charakteristikou, kterou se nám povedlo naměřit, byla silová charakteristika.



Obr. 32 Silová charakteristika

Na silové charakteristice je patrný strmý nárůst síly se zmenšováním se vzdálenosti jádra od dna cívky. Náhlý pokles u konce charakteristiky je chybou měření, které má mechanické zdůvodnění. Při poloze jádra pouze jeden milimetr ode dna cívky docházelo při působení značné síly k lehkému vychýlení jádra z měřené polohy, a tím se jádro mohlo opřít o dno cívky – síla působící na jádro se pak při měření jevila výrazně nižší.

Závěr

Charakteristiky získané měřením reálného ventilu s charakteristikami obdržnými v simulacích stejné nejsou, lokálně se však shodují. V simulacích nebylo uvažováno působení indukovaného napětí proti napětí zdroje, stejně tak jako vliv pole způsobené vířivými proudy v mosazné vložce, vliv mezizávitové kapacity na proudové špičky, odskoky jádra při zasouvání vlivem zpětné pružiny nebo jev blízkosti, kdy pole cívky mohlo indukovat vířivé proudy zpět do měděných závitů cívky. Vše se vším souvisí a to se na ideálních průbězích simulací velmi projevilo.

Na první pohled jednoduchý elektromagnetický ventil. Opak byl však pravdou, neboť vše, s čím jsem se během svého výzkumu na tomto ventilu setkal, bylo velmi spleť a k tomu všemu ještě složitě provázané. Byla mi tímto poskytnuta příležitost uvědomit si úroveň obtížnosti a komplexnosti, jakou je namodelovat reálný problém, přestože se jeví zdánlivě prostý.

Ve výzkumu tohoto typu jsem našel zalíbení a v budoucnu bych chtěl tento model rozšířit a dále na něm pracovat.

Zdroje

- [1] KURFIŘT, Martin. *Návrh aktuátoru s permanentním magnetem*. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [2] STEINSLAND, Vidar. *Modeling and Control of Retarder using On/O Solenoid Valves* [online]. Stockholm, 2008 [cit. 2017-06-03]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:572695/FULLTEXT01.pdf>
- [3] HŘEBÍČEK, Jiří a Michal ŠKRDLA. *Úvod do matematického modelování* [online]. 2006, , 83 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1431/podzim2007/Bi3101/um/skripta.pdf>
- [4] YAN-FANG, Liu, Dai ZHEN-KUN, Xu XIANG-YANG a Tian LIANG. Multi-domain modeling and simulation of proportional solenoid valve. *Springer* [online]. 2011, **2011**(18), 6 [cit. 2017-06-04]. DOI: 10.1007/s11771-011-0876-2. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11771-011-0876-2>
- [5] Solenoid Valve. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Solenoid_valve
- [6] Ventily - přehled sortimentu jejich funkce. *Kompresory vzduchotechnika s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/n/ventily-prehled-sortimentu-jejich-funkce>
- [Obr. 2] *Solenoid Valve Pneumatic, Bagian Selenoid Valve Pneumatic* [online]. In: . [cit. 2017-06-04]. Dostupný z: <https://laskarkalong.wordpress.com/2013/04/17/prinsip-kerja-solenoid-valve-pneumatic/>
- [7] Computational electromagnetics. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_electromagnetics
- [8] Lumped element model. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Lumped_element_model
- [9] GÜRDAL, Arslan. *State variable models* [online]. Rok vydání neuveden, , 33 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.site.uottawa.ca/~rhabash/ELG4152L305.pdf>
- [10] LEUBNER, Karel. *Numerický model urychlovače feromagnetických těles s uvažováním vlivu indukovaných proudů*. Praha, 2015. České vysoké učení technické v Praze.
- [11] FAJMON, Břetislav. *Metoda nejmenších čtverců* [online]. In: . Brno, s. 40 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.rozhovor.cz/ma+fy/03/metodanejmensichctvercu.pdf>
- [12] Budai Peter. *Sdružený model elektromagnetického aktuátoru s delší přídržnou dobou*. Diplomová práce, ČVUT Praha, 2016.
- [13] MAŠÍN, David. *Numerické modelování v aplikované geologii* [online]. Praha, Rok vydání neuveden [cit. 2017-06-03]. Dostupné z: <https://web.natur.cuni.cz/uhigug/masin/vyuka/download/prednaska-Geotech-handouts.pdf>. Karlova Univerzita v Praze.

[14] DOLEŽEL, Ivo, Pavel KARBAN a Pavel ŠOLÍN. *Integral methods in low-frequency electromagnetics*. New Jersey: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2008. ISBN 978-0-470-19550-5 (pbk.).

[15] *Přehled sortimentu: PEVEKO Regulační technika* [online]. Uherské Hradiště, 2017, s. 75 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.peveko.cz/data/peveko-katalog.pdf>

[16] Lenz's Law. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Lenz%27s_law

Příloha

Příloha A – Funkce pro výpočet dynamických charakteristik ventilu

```
function [] = actuator()

% materialove konstanty
mu_0 = 4*pi*1e-7;
mu_rl_I0 = 448.82; % mu_r pri I=0
% mu_r odpovida mu_rFe ČSN 12040
rho_Fe = 7850; %hustota zeleza
gamma_Cu = 56e6; %vodivost
g = 9.81; %gravitacni konstanta

% rozmery aktuatoru [m]
l = 0.06; % delka mg. obvodu
d = 0.0045; % sirka mg. obvodu
R = 0.07/2; % polomer mg. obvodu
r = 0.0275/2; % polomer jadra

delta = 0.001; % vzduchova mezera mezi civkou a
jadrem

U0 = 230;
RL = 2000;

I0 = U0/RL;

% rozmery civky
r_civky = R-d-r-delta; % sirka civky
S_civky = r_civky * (l-2*d); % plocha civky
r_zavitu = r_civky/2 + r + delta; % stredni polomer
zavitu
```

```
% vypocet N a S_dratu
N = sqrt(RL*gamma_Cu/(2*pi*r_zavitu) * S_civky*0.66);
S_dratu = 0.66*S_civky/N;
r_dratu = sqrt(S_dratu/pi);

% permeabilita nespojita - zadana tabulkou
Bt = [1.41; 1.585; 1.73; 1.79; 1.875];
mur = [448.82; 252.26; 137.67; 94.96; 74.6];

function [ vysledek ] = urceniKoeffPolynomu( X, Y )
% soustava rovnic pro urceni polynomu popisujiciho
nelinearity permeability
n=length(X);
SOUSTAVA = zeros(n);
for a=1:n
for j=1:n
SOUSTAVA(a,j)=X(a)^(n-j);
end
end
vysledek=SOUSTAVA\Y;
end

pB=urceniKoeffPolynomu(Bt,mur);
% spojity popis nelinearity permeability

function mu_r = permeabilita(B)
% zjisteni hodnoty mu_r
if B < Bt(1)
mu_r = mur(1);
elseif B > Bt(5)
mu_r = mur(5);
else
mu_r = polyval(pB, B);
end
end

function Rm = reluktance(s, phi)
% vypocet reluktance kazdeho prvku v zavislosti na
poloze a toku
S = (pi*R^2-(R-d)^2);
mu_r = permeabilita(phi/S);
Rm_p = 1/(mu_0*mu_r) * (l-2*d)/S; % plast

S = pi*r^2; % prurez jadra
mu_r = permeabilita(phi/S);
```



```

Rm_j = 1/(mu_0*mu_r) * (1-abs(s)-d)/S; % jadro
Rm_s= 1/(mu_0) * abs(s)/S; % vzduchova mezera
Rm_delta = 1/(mu_0) * delta/R*d; % mezera mezi
jadrem a vikem

% !!!!
% integruje se Rm pres r s nelinearni mu_r
(konstantni tok ale promenna plocha) - numericka
integrace (obdelnikove pravidlo)

% horni viko
n = 10;
dr = R/n;
Rm_v1 = 0;
for a = 0:n-1 % numericka integrace horniho vika
    Ss = 2*pi*d*(a*dr+(dr/2));
    mu_r = permeabilita(phi/Ss);
    Rm_v1 = Rm_v1 + 1/(mu_0*mu_r)*dr/Ss;
end

% spodni viko
dr = (R-r)/n;
Rm_v2 = 0;
for a = 0:n-1 % numericka integrace dolniho vika
    Ss = 2*pi*d*(r+a*dr+(dr/2));
    mu_r = permeabilita(phi/Ss);
    Rm_v2 = Rm_v2 + 1/(mu_0*mu_r)*dr/Ss;
end

Rm = Rm_p + Rm_v1 + Rm_delta + Rm_j + Rm_s +
Rm_v2;
end

function r = indukcnitok(phi, s) % err
    Um = N*I0*1/6;
    Rm = reluktance(s, phi);
    r = Rm*phi - Um;
end

function Wm = energie(s, i)
% vycet energie v zavislosti na poloze jadra a
proudu civkou
    Wm = 1/2*indukcnost(s)*i^2;
end

```

```
function L = indukcnost(s)
% vypočet indukčnosti v závislosti na poloze jádra
[phi, res, phi0] = newton(@indukcni_tok, 5e-6,
10, 1e-3, s);
Rm = reluktance(s, 0);
L = N^2/Rm;
end

function [x, y, x0] = newton(rce, x0, n, h, s) %
Newtonova metoda řešení
x = zeros(n, 1);
y = zeros(n, 1);

for j = 1:n
    y0 = rce(x0, s);
    dy = (rce(x0+h, s) - rce(x0-h, s))/(2*h);
    x0 = x0 - y0/dy;

    x(j) = x0;
    y(j) = rce(x0, s);
end
end

function [dvdsdi, F] = rce(vsi, dt)
v = vsi(1);
s = vsi(2);
i = vsi(3);

L = indukcnost(s);

ds = v*dt;
if abs(s) > ds
    F = (energie(s+ds, i)-energie(s-ds,
i))/(2*ds);
else
    F = (energie(0, i)-energie(ds, i))/ds;
end

if abs(s) > ds
    dv = F/(rho_Fe*pi*r^2*l) - g;
    ds = v;
else
    dv = -v/dt;
    ds = 0;
end
```

```
    di = U0/L - i*RL/L;
    dvdsdi = [dv, ds, di];
end

t0 = 0;
t1 = 0.1;
n = 1e2;
vsi0 = [1e-6, 1-d, 0];

t = linspace(t0, t1, n)';
dt = (t1-t0)/(n-1);
vsi = zeros(n, length(vsi0));
Ft = zeros(n, 1);
vsi(1,:) = vsi0;

for b = 1:(n-1)
    [dvdsdi, F] = rce(vsi(b,:), dt);
    vsi(b+1,:) = vsi(b,:) + dt*dvdsdi;
    Ft(b+1) = F;
end

figure
subplot(4,1,1)
v = vsi(:,1);
plot(t, v)
xlabel('t (s)')
ylabel('v (m/s)')
ylim([-4,0])
xlim([0, 0.088])

subplot(4,1,2)
s = vsi(:,2);
plot(t, s)
xlabel('t (s)')
ylabel('s (m)')
ylim([0, 0.1])
xlim([0, 0.088])

subplot(4,1,3)
i = vsi(:,3);
plot(t, i)
xlabel('t (s)')
ylabel('i (A)')
xlim([0, 0.088])

subplot(4,1,4)
```

```
plot(t, Ft)
xlabel('t (s)')
ylabel('F (N)')
xlim([0, 0.088])
end
```