

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

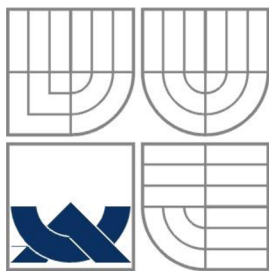
RELATIVNÍ SNÍMAČ POLOHY

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE
SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

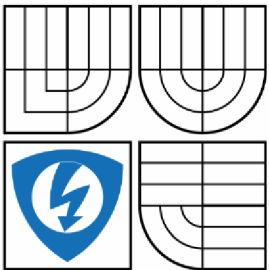
Bc. PETR KOUTNÝ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

RELATIVNÍ SNÍMAČ POLOHY

RELATIVE DISPLACEMENT SENSOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

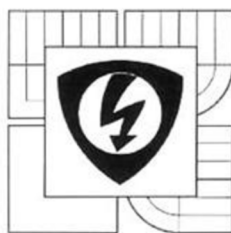
Bc. Petr Koutný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Petr Koutný

Ročník: 2

ID: 118601

Akademický rok: 2012/13

NÁZEV TÉMATU:

Relativní snímač polohy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh a realizace elektrodynamického snímače pro měření vzájemných relativních kmitů dvou povrchů. Snímač by měl co nejméně zatížit kmitající povrchy, vzdálenost kmitajících povrchů je max. 20 mm, měřená výchylka cca 0,1 mm ve frekvenčním rozsahu do 1 kHz.

Pro optimalizaci parametrů navrhovaného snímače se předpokládá využití vhodného simulačního software, např. Comsol Multiphysics. Cílem je nalézt závislost mezi citlivostí snímače, rozměry cívky snímače a rozměry magnetu, vliv výrobních tolerancí na výslednou citlivost.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

ĎAĎO, S., KREIDL, M. - Sensory a měřicí obvody. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996. ISBN 80-01-01500-9.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 20.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem optimálních parametrů relativního snímače polohy, pracujícího na elektrodynamickém principu. Snímač je založen na indukci napětí do cívky umístěné v proměnném magnetickém poli. Práce je rozdělena na část úvodní, teoretickou a praktickou. V úvodní části jsou uvedeny základní vztahy mezi snímači výchylky, rychlosti a zrychlení. Teoretická část obsahuje fyzikální pojmy a souvislosti nutné k výpočtům a tvorbě modelu permanentního magnetu v programu COMSOL Multiphysics. Dále je uveden patentový průzkum elektrodynamických snímačů. Praktická část popisuje samotnou tvorbu modelu permanentního magnetu a následný výpočet indukovaného napětí do cívky v programu Matlab. Následuje popis provedených měření v laboratoři a srovnání jejich výsledků se simulací, při kterém byly zjištěny některé neshody, způsobené pravděpodobně chybně provedeným výpočtem indukovaného napětí. Na závěr jsou uvedena obecná doporučení pro návrh snímače vyplývající ze simulací a měření.

Klíčová slova

Relativní snímač polohy, elektrodynamický princip, indukce napětí, permanentní magnet, simulace, měření, COMSOL Multiphysics, Matlab.

Abstract

This thesis deals with design of optimal parameters of a relative displacement sensor, working on the electrodynamic principle. The sensor is based on the voltage induction to the coil placed in changing magnetic field. Thesis is divided into three parts: introductory, theoretical and practical. The introductory part provides basic relationships between displacement, velocity and acceleration sensors. The theoretical part contains physical concepts and describes relationships necessary for calculations and creating a model of permanent magnet in COMSOL Multiphysics. In thesis further presents patent research of electrodynamic sensors. The practical part describes the creation of the permanent magnet model and the subsequent calculation of the induced voltage in the coil in Matlab. A description of laboratory measurements follows, presenting the final comparison of the simulation and measurement results. There were found some differences, which might have been caused by incorrect calculation of the induced voltage. The final part of the thesis presents general recommendations for the design of sensor, resulting from simulations and measurements.

Keywords

Relative displacement sensor, electrodynamic principle, voltage induction, permanent magnet, simulation, measurement COMSOL Multiphysics, Matlab.

Bibliografická citace:

KOUTNÝ, P. *Relativní snímač polohy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 84 s. Vedoucí diplomové práce byl doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Relativní snímač polohy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **20. května 2013**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji Ing. Martinu Vágnerovi a Ing. Stanislavu Píkulovi za cenné rady a pomoc při laboratorních měřeních. Velké poděkování patří také celé mojí rodině za podporu nejen během zpracovávání této práce, ale i během celého studia.

V Brně dne: **20. května 2013**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	9
1.1	Vibrodiagnostika.....	9
1.2	Mechanické kmitání (vibrace).....	10
1.3	Snímače vibrací.....	10
1.3.1	Snímače výchylky.....	10
1.3.2	Snímače rychlosti.....	10
1.3.3	Snímače zrychlení.....	11
2	Teoretická část.....	12
2.1	Elektrodynamický snímač.....	12
2.2	Základní pojmy.....	13
2.2.1	Magnetická indukce.....	13
2.2.2	Intenzita magnetického pole.....	13
2.2.3	Magnetický indukční tok.....	14
2.2.4	Statická hysterezní smyčka.....	14
2.2.5	Koercivita.....	15
2.2.6	Remanence.....	15
2.2.7	Energetický součin BH_{max}	15
2.2.8	Křivka prvotního magnetování.....	15
2.2.9	Relativní permeabilita.....	16
2.2.10	Neodymový magnet (NdFeB).....	16
2.3	Coriolisův hmotnostní průtokoměr.....	17
2.4	Patentový průzkum.....	19
3	Praktická část.....	22
3.1	Simulace a výpočty.....	22
3.1.1	Model permanentního magnetu.....	22
3.1.2	Výpočet indukovaného napětí.....	32
3.2	Měření.....	44
3.2.1	Snímací cívky.....	44
3.2.2	Permanentní magnety.....	45
3.2.3	Úkol č. 1 - optimální tvar vinutí cívky.....	46
3.2.4	Úkol č. 2 - určování výrobních tolerancí.....	50
3.2.5	Úkol č. 3 – měření magnetických vlastností magnetů.....	52
3.3	Srovnání výsledků simulace a měření.....	56

3.3.1	Srovnání indukovaných napětí	56
3.3.2	Srovnání určování výrobních tolerancí	60
3.3.3	Srovnání magnetické indukce	62
3.4	Shrnutí a obecná doporučení	66
4	Závěr.....	67
	Literatura.....	68
	Seznam obrázků	70
	Seznam tabulek	71
	Seznam grafů.....	72
	Seznam symbolů	74
	Seznam příloh	76
	Přílohy	77

1 ÚVOD

Mechanické kmitání je často nežádoucím prvkem při provozu motorů, turbín a jiných strojů. Jeho přesné měření tak hraje důležitou roli a může zabránit poškození nebo dokonce totálnímu zničení daného zařízení. Na druhou stranu lze v jiných zařízeních kmitání s výhodou využívat, a to např. k měření jiných fyzikálních veličin. K takovým zařízením patří např. hmotnostní průtokoměry, založené na principu působení Coriolisovy síly, které využívají kmitání měřicích trubic.

Tato práce se zabývá návrhem snímače kmitů založeného na elektrodynamickém principu. V současné době jsou pro měření kmitání a vibrací častěji používány piezoelektrické akcelerometry, které sice disponují větším měřicím rozsahem, nicméně jsou to snímače absolutní. Elektrodynamické snímače jsou snímače relativní a jejich rozsah se pohybuje od jednotek hertzů do cca 3,5 kHz [1], což ovšem plně dostačuje požadovanému rozsahu v zadání. Výhodou je také jednoduchost a nízká hmotnost těchto snímačů. Dalším důvodem a motivací pro výzkum a použití elektrodynamických snímačů může být např. jejich využití v již zmiňovaných hmotnostních průtokoměrech, kde se jedná o vůbec nejpoužívanější typ snímačů pro vyhodnocování výchylek měřicích trubic.

Cílem práce tedy je, pomocí počítačových simulací a praktických měření, nalézt optimální parametry elektrodynamického snímače. Jedním, možná omezujícím, požadavkem se jeví použití běžně dostupných výpočetních prostředků, čímž lze prakticky vyloučit možnost vytvářet a používat 3D simulace proměnné v čase. Důvodem tohoto požadavku je zjistit, zda lze výpočty provést i alternativními metodami, a dále to, že ne vždy jsou k dispozici super výkonné počítače, kde nemusíme brát ohledy na výpočetní náročnost simulací.

Celá práce je rozdělena do dvou hlavních částí – teoretické a praktické. Zatímco část teoretická obsahuje základní informace o problematice elektrodynamických snímačů, v části praktické nalezneme postup provádění simulací a výpočtů, měření v laboratoři a vzájemné porovnání výsledků simulací a měření. V závěru úvodní kapitoly jsou uvedeny základní pojmy k problematice mechanického kmitání.

1.1 Vibrodiagnostika

Vibrodiagnostika je podobor, který podobně jako elektrodiagnostika či tribodiagnostika¹ patří do oboru technická diagnostika. Zabývá se určováním stavu daného objektu měřením jeho kmitání (vibrací). Uplatňuje se např. při testování nových výrobků a konstrukcí, kdy se provádí vibrační zkoušky pro posouzení pevnosti a odolnosti daného výrobku nebo konstrukce. [2]

¹ Tribodiagnostika – vědní obor z oblasti tribologie – nauka o mazání, tření a opotřebení při vzájemném styku a pohybu součástí.

1.2 Mechanické kmitání (vibrace)

Mechanické kmitání neboli vibrace, je dynamický jev, kdy hmotný bod nebo tuhé těleso vykonává vratný pohyb kolem rovnovážné (klidové) polohy. Vibrace můžeme popsat pomocí amplitudy a fáze v daném časovém okamžiku.

Dle časových změn lze vibrace rozdělit na periodické, neperiodické a náhodné. Periodické vibrace obsahující jedinou frekvenci nazýváme harmonické a popisujeme je vztahem (1.1), kde y_i je okamžitá hodnota výchylky, y_0 je amplituda kmitů, ω je úhlová rychlost, t_i je okamžitá hodnota času a φ je fáze harmonické veličiny. Pro tyto vibrace je nutné stanovit pouze jednu z určujících veličin (rychlost, zrychlení, výchylka) a ostatní veličiny lze dopočítat. [3]

$$y_i = y_0 \sin(\omega t_i + \varphi) \quad [mm] \quad (1.1)$$

1.3 Snímače vibrací

Snímače vibrací lze rozdělit podle několika hledisek. Jedním ze základních rozdělení je na snímače absolutní, měřící vibrace zpravidla vzhledem k Zemi a snímače relativní, měřící vibrace vzhledem ke vhodně zvolené základně, zpravidla rámu daného stroje. Další možností dělení je podle měřené veličiny na snímače výchylky, rychlosti a zrychlení. [1]

1.3.1 Snímače výchylky

Do této skupiny patří např. snímače pracující na indukčním, indukčnostním, magnetickém, optickém, nebo kapacitním principu, z nichž nejpoužívanější jsou indukčnostní. Tyto snímače využívají princip změny indukčnosti cívky při změně proudové hustoty vířivých proudů. Jejich nevýhodou je citlivost na parazitní vlivy (vnější elektromagnetická pole). Stále častěji se používají i optické snímače, jejichž výhodou je, že jsou bezdotykové. [1]

1.3.2 Snímače rychlosti

Protože je rychlost definovaná jako přírůstek dráhy Δs za časový interval Δt , můžeme ji určit derivací signálu snímačů polohy. K měření kmitavého a přímočarého pohybu se využívají především indukční snímače. Pro měření rychlosti otáčivého pohybu, tedy úhlové rychlosti otáčení ω , se používají otáčkoměry. Podle principu se dělí na mechanické, impulzní, stroboskopické a spojitě indukční, do kterých patří i snímač elektrodynamický.

Elektrodynamické otáčkoměry jsou nejdůležitější skupinou. Dělí se na stejnosměrné – tachodynamy a střídavé – tachoalternátory. Pro jejich jednoduchou konstrukci a

přímou závislost výstupního napětí na otáčkách se často používají pro snímání otáček motorů. [6]

1.3.3 Snímače zrychlení

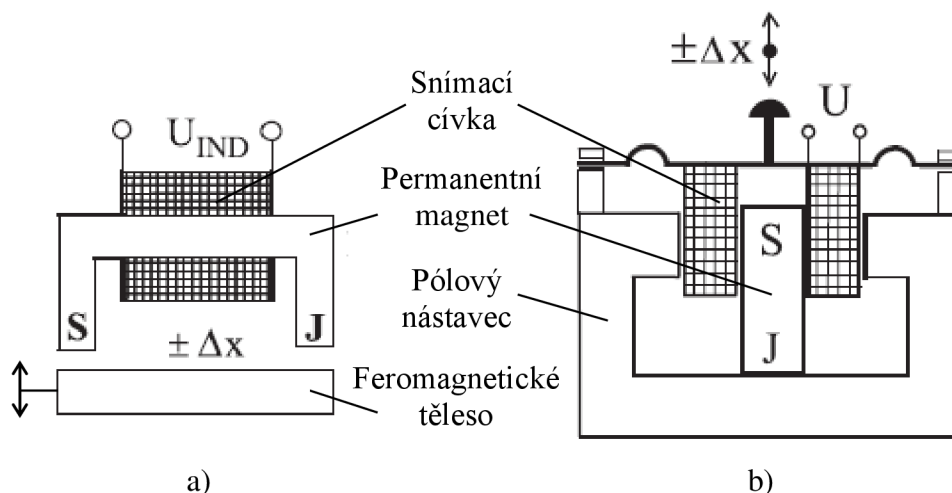
Tuto skupinu tvoří akcelerometry pracující na piezoelektrickém jevu. Zpravidla jsou to absolutní snímače. Akcelerometry se nejčastěji vyskytují ve třech provedeních lišících se uspořádáním piezokrystalů. Jedná se o tzv. Delta Shear[®] se třemi dvojicemi setrvačných hmot a piezokrystalů umístěnými na trojbokém středovém sloupku, Planar Shear se dvěma dvojicemi setrvačných hmot a piezokrystalů na plochém středovém sloupku a snímač s centrálním tlakovým namáháním. [1]

2 TEORETICKÁ ČÁST

Následující kapitola obsahuje teoretické informace o snímači vibrací založeném na elektrodynamickém principu spolu se základními pojmy a vztahy k pochopení jeho fungování. Dále jsou uvedeny základní pojmy z oblasti magnetismu, stručný popis hmotnostního průtokoměru fungujícího na principu Coriolisovy síly a provedený literární a patentový průzkum v oblasti indukčních snímačů.

2.1 Elektrodynamický snímač

Elektrodynamický a elektromagnetický snímač tvoří skupinu indukčních snímačů. Zatímco u elektromagnetického snímače (obrázek 1a) se v nepohyblivé cívce s permanentním magnetem indukuje napětí vlivem změny magnetického toku, která je vyvolána změnou magnetického odporu obvodu, v případě elektrodynamického snímače (obrázek 1b) se pro indukci napětí využívá změny magnetického toku při pohybu cívky (vodiče) v poli permanentního magnetu. [6]



Obrázek 1: Indukční snímače – a) elektromagnetický, b) elektrodynamický [6]

Indukční snímače pracují na principu Faradayova indukčního zákona, vyjádřeného vztahem 2.1, kde indukované napětí je úměrné časové změně magnetického toku.

$$u = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad [V] \quad (2.1)$$

u – indukované napětí v cívce

N – počet závitů cívky

$\Delta \Phi$ – změna magnetického indukčního toku

Δt – změna času

Frekvenční rozsah elektrodynamického snímače se pohybuje cca od 0,1 Hz do 3 kHz, měřicí rozsah kmitavého pohybu je v rozmezí 2 μm až 5 mm. Průběh indukovaného napětí je stejný jako rychlost pohybu cívky, a to s citlivostí typicky $10\text{V}/\text{ms}^{-1}$, v případě speciálních snímačů pro seismická měření až $10\text{kV}/\text{ms}^{-1}$. Linearita a měřicí rozsahy se upravují především používáním různých tvarů pólových nástavců.

Elektrodynamické snímače se vyznačují velkou citlivostí, díky které jsou dnes používány převážně pro seismická měření. Ve většině běžných měření jsou však stále častěji nahrazovány piezoelektrickými akcelerometry. [6], [7]

Indukční snímače bývají někdy mylně zaměňovány za snímače indukčnosti, které jsou založeny na změně indukčnosti cívky a na rozdíl od indukčních patří mezi snímače pasivní, tj. potřebují napájení.

Vzhledem k tomu, že jednou z hlavních motivací této práce je použití elektrodynamických snímačů v hmotnostních průtokoměrech, je tomu přizpůsoben i tvar snímače. Námí používaný snímač se skládá pouze z permanentního magnetu a snímací cívky. Neobsahuje žádný pólový nástavec, neboť snímač musí být co nejlehčí, aby nezatěžoval měřicí trubice průtokoměru a nezpůsobil tím chyby měření.

2.2 Základní pojmy

Tato kapitola vysvětluje některé základní pojmy používané v dalším textu, důležité k porozumění modelovaného magnetického pole a následného výpočtu indukovaného napětí v cívce.

2.2.1 Magnetická indukce

Magnetická indukce B je vektorová veličina, vyjadřující hustotu magnetického pole, indukovaného vnějším magnetickým polem ve feromagnetickém materiálu. Jednotkou magnetické indukce v soustavě SI je 1 T (Tesla). [4]

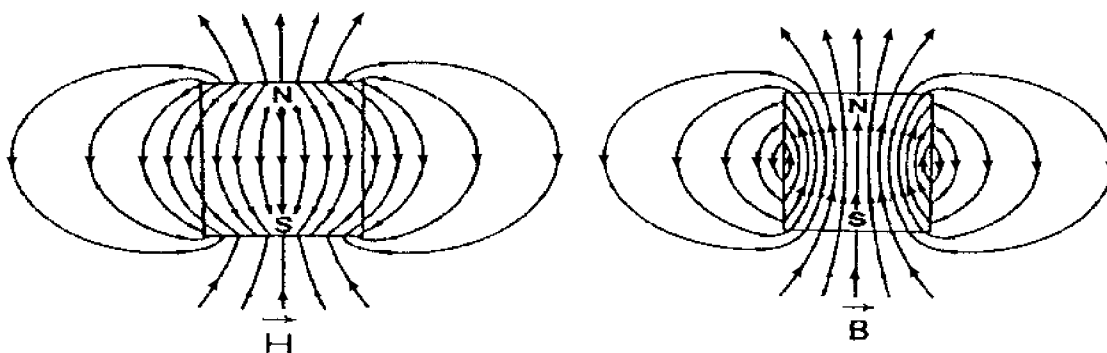
2.2.2 Intenzita magnetického pole

Intenzita magnetického pole H je vektorová veličina reprezentující magnetické pole. Jednotkou v soustavě SI je 1 A/m. [4]

Mezi intenzitou magnetického pole a magnetickou indukcí platí vztah 2.2, kde μ_r je relativní permeabilita a μ_0 je permeabilita vakua.

$$H = \frac{B}{\mu_r \mu_0} \quad [\text{Am}^{-1}] \quad (2.2)$$

Na obrázku č. 2 je zobrazen průběh magnetické indukce B a intenzity pole H permanentního magnetu umístěného ve vzduchu. Magnet je zdrojem magnetického pole a podobně jako u zdroje el. napětí, kde má U a I opačný směr, má uvnitř magnetu B a H také opačný směr. [5]



Obrázek 2: Průběh intenzity magnet. pole \vec{H} a magnetické indukce \vec{B} permanentního magnetu umístěného ve vzduchu [5]

2.2.3 Magnetický indukční tok

Magnetický indukční tok Φ je skalární veličina, jejíž jednotkou je 1 Wb (Weber), a kterou lze definovat podle vztahu 2.3.

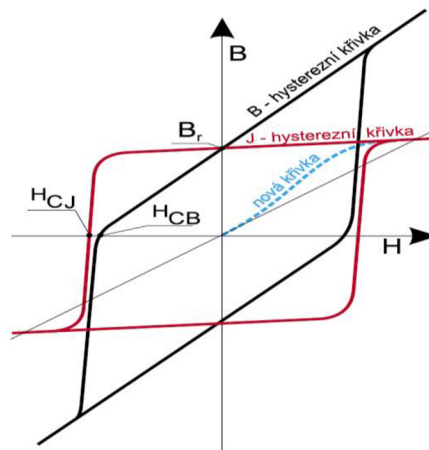
$$\Phi = \iint_S B \, dS = \iint_S B_n \, dS \quad [\text{Wb}] \quad (2.3)$$

kde B_n je složka vektoru B kolmá k ploše S . Je-li magnetické pole homogenní a vektor B kolmý k ploše S , dostaneme vztah 2.4.

$$\Phi = B \cdot S \quad [\text{Wb}] \quad (2.4)$$

2.2.4 Statická hysterezní smyčka

Statická hysterezní smyčka znázorňuje průběh magnetické indukce jako funkci intenzity magnetického pole, tedy $B = f(H)$ resp. $J = f(H)$, kde J je magnetická polarizace. Typický tvar je spolu s křivkou prvotního magnetování (nová křivka) zobrazen na obrázku č. 3. Na hysterezní smyčce se nachází několik významných bodů – koercivita H_{CB} , vnitřní koercivita H_{CJ} a remanence B_r . [5]



Obrázek 3: Hysterezní smyčka [4]

2.2.5 Koercivita

Koercivita neboli koercivní síla je schopnost permanentního magnetu odolávat demagnetizaci externím magnetickým polem. Rozlišujeme dva typy koercivity. První je jednoduše koercivita H_{CB} , která je dána průsečíkem hysterezní smyčky $B = f(H)$ s osou H a vyjadřuje magnetické pole, při němž je celková indukce v magnetu nulová. Druhá je koercivita vnitřní H_{CJ} , dána průsečíkem hysterezní smyčky $J = f(H)$ s osou H a vyjadřující pole, kdy je celková polarizace nulová (vektory polarizace samostatných magnetických domén se vzájemně ruší). [4]

2.2.6 Remanence

Remanence B_r , resp. J_r je dána průsečíkem hysterezní smyčky $B = f(H)$ s osou B , resp. $J = f(H)$ s osou J . Platí $B_r = J_r$. Je to zbytková magnetizace po odstranění magnetizačního pole. [4]

2.2.7 Energetický součin BH_{\max}

Energetický součin je maximum funkce $B \times H = f(B)$ ve II. kvadrantu (demagnetovací část) hysterezní smyčky. Slouží k hodnocení magneticky tvrdých materiálů. [5]

2.2.8 Křivka prvotního magnetování

Tato křivka (zobrazena na obr. č. 3 jako nová křivka) vyjadřuje závislost $B = f(H)$ za předpokladu, že její počátek leží ve stavu dokonalého odsmagnetování ($H = 0, B = 0$) a intenzita pole postupně narůstá bez změny směru nárůstu. [5]

2.2.9 Relativní permeabilita

Permeabilita je schopnost materiálu vést magnetický tok – magnetická vodivost. Je dána poměrem B/H . Relativní permeabilita je pak dána poměrem permeability a permeability vakua. [4], [5]

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H} \quad [-] \quad (2.5)$$

kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$ je permeabilita vakua.

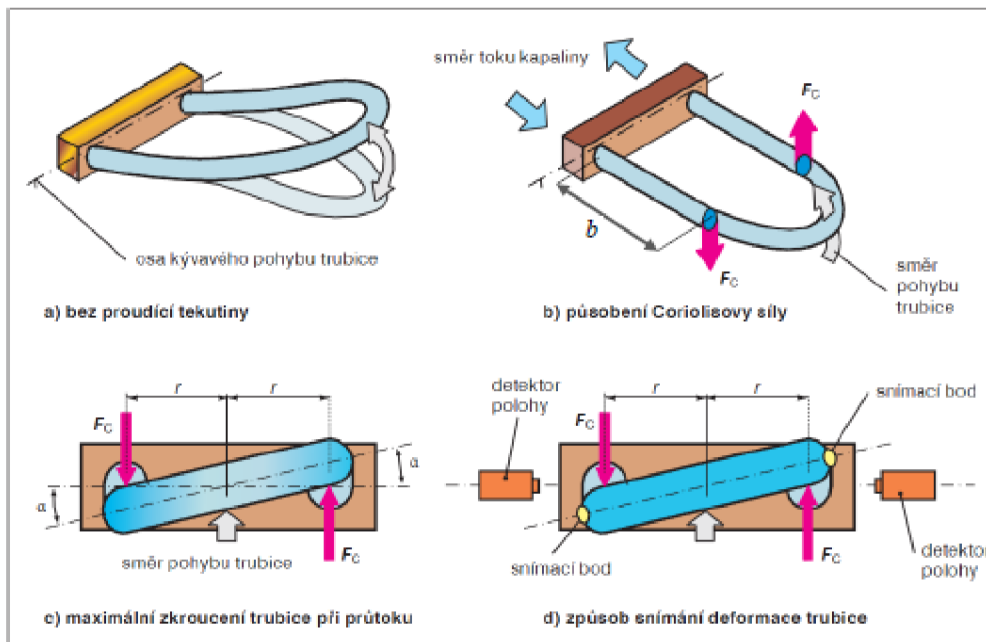
2.2.10 Neodymový magnet (NdFeB)

Neodymové magnety jsou tvořeny směsí neodymu, železa a boru. Byly vyvinuty roku 1993 jako levnější náhrada SmCo magnetů, obsahujících materiály vzácných zemin – samarium a kobalt. Tento typ magnetu je v dnešní době typem s nejlepšími a nejsilnějšími magnetickými vlastnostmi. Jeho nevýhodou je podléhání korozi, proto se povrch upravuje např. poniklováním. Stejně jako u jiných magneticky tvrdých materiálů je i relativní permeabilita neodymového magnetu malá, řádově v jednotkách. [4], [5]

2.3 Coriolisův hmotnostní průtokoměr

Vzhledem k tomu, že jsou dnes elektrodynamické snímače nejčastěji používány v hmotnostních průtokoměrech, a protože zde tyto průtokoměry často zmiňují (zejména v patentovém průzkumu, uvedeném níže), považuji za vhodné uvést alespoň krátkou kapitolu o jejich principu.

Coriolisův hmotnostní průtokoměr pracuje na principu Coriolisovy síly², působící na vibrující trubici, protékanou médiem. Měřicí trubice, nejčastěji ve tvaru písmene U, je rozkmitána na určitou, většinou rezonanční, frekvenci (obr. 4a). Pokud trubici začne proudit médium, začne působit Coriolisova síla ve směrech naznačených na obrázku č. 4b, čímž se začne měřicí trubice kroutit (obr. 4c). Tato deformace je vyhodnocována snímači (obr. 4d), jejichž výstupní signály jsou fázově posunuté a průtok média je pak úměrný jejich fázovému rozdílu. Čím větší je průtok, tím větší je fázový rozdíl. [8]



Obrázek 4: Princip fungování Coriolisova průtokoměru [8]

Průtokoměr se skládá z několika primárních částí, mezi které patří měřicí trubice, budicí člen, snímače kmitů a řídicí jednotka se základními funkcemi, a několika sekundárních částí, kam patří např. teplotní čidlo pro kompenzaci vlivu teplotních změn, sekundární ochranné pouzdro nebo pokročilé funkce zpracování signálu.

Pro měřicí trubici neexistuje přesně definovaný tvar a každý výrobce preferuje svůj. Nejčastější jsou však trubice přímé, nebo zahnuté do tvaru písmen U, V nebo Ω . Dále se v dnešní době téměř výhradně používá paralelní dvojice měřicích trubic, která je

² Coriolisova síla je pojmenována podle francouzského inženýra jménem Gaspard Gustave de Coriolis (1792 – 1843), který v roce 1835 jako první pozoroval, že tělesa pohybující se po Zemi ve směru od rovníku k jednomu z pólů, se nepohybují přímo, ale vlivem setrvačné síly jsou vychylována do strany. Tento jev je dobře pozorovatelný v meteorologii, balistice nebo opotřebení kolejnic. [8]

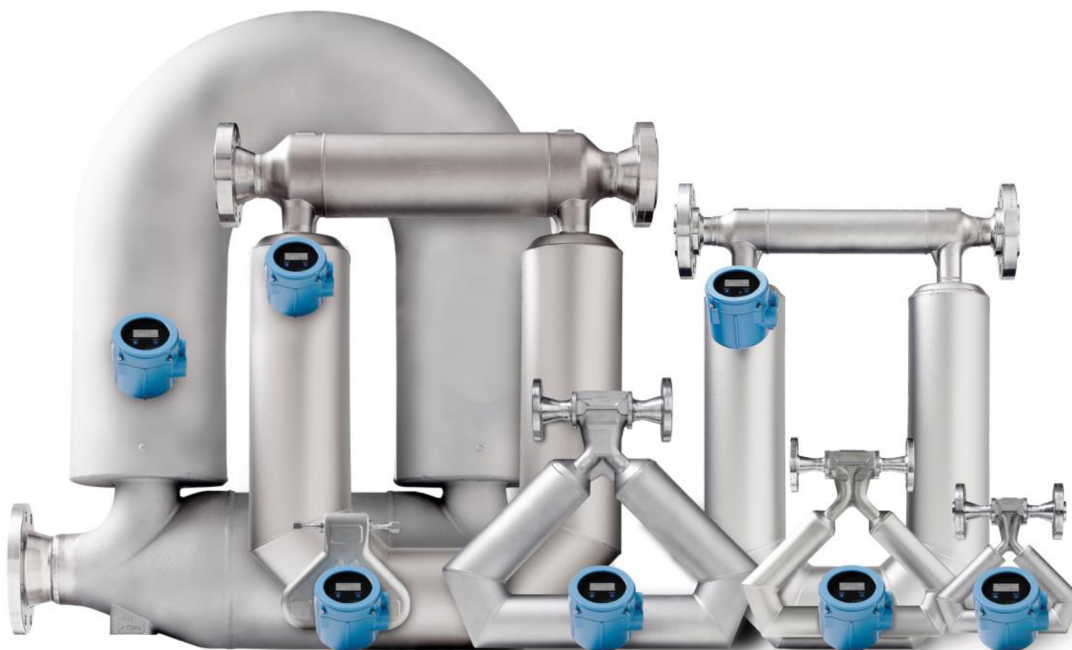
odolnější vůči vnějším rušivým vibracím. Trubice jsou vyráběny z odolných materiálů a slitin, aby odolaly agresivním látkám a mechanickému namáhání, způsobenému kroucením.

Jako budicí člen se nejčastěji používá cívka a magnet. Jedná se prakticky o indukční snímač zapojený opačně. Cívka je buzena střídavým proudem a tím střídavě přitahuje a odpuzuje magnet. Takto lze snadno řídit jak frekvenci, tak amplitudu kmitů.

Ke snímání se v přímých měřicích trubiciích používají nejčastěji optické snímače, v zahnutých pak právě snímače indukční. V průtokoměrech se dvěma měřicími trubiciemi je k jedné trubici připevněn magnet a k druhé cívka. S kmitáním trubice se magnet střídavě zasunuje a vysunuje z cívky, čímž se v cívce indukuje napětí. V souvislosti s touto prací jsem provedl malý průzkum u výrobců Coriolisových průtokoměrů s cílem zjistit, zda jsou indukční snímače skutečně nejpoužívanější. Od celkem třinácti kontaktovaných výrobců jsem obdržel sedm odpovědí. Šest z nich bylo ve prospěch indukčních a jedna ve prospěch optických snímačů.

Řídicí jednotka slouží k udržování správné budicí frekvence a vyhodnocování signálů ze snímačů kmitů, případně teplotního čidla. Mezi pokročilejší funkce patří nejrůznější statistické funkce a také vlastní diagnostika průtokoměru, případně auto-kalibrace. Jednotka může být v integrovaném, nebo dálkově připojitelném provedení.

Coriolisovy průtokoměry jsou velmi přesné, nicméně jistou nevýhodou je vyšší pořizovací cena. Jsou vhodné pro kapaliny, plyny i jejich směsi. Používají se všude tam, kde je kladen velký důraz na přesné měření, např. v petrochemii, potravinářství i farmakologii. Na obrázku č. 5 jsou zobrazeny Coriolisovy průtokoměry od společnosti Emerson. [8]



Obrázek 5: Průtokoměry společnosti Emerson (fy Emerson)

2.4 Patentový průzkum

Průzkum ukazuje některé patenty obsahující indukční snímače vibrací. Vzhledem k tomu, že tyto snímače jsou nejpoužívanější v hmotnostních průtokoměrech, týkají se prakticky všechny uváděné patenty právě těchto průtokoměrů.

V patentech jsou většinou uváděny pouze obecné údaje a popisy daných snímačů. Nejsou uváděna žádná konkrétní čísla týkající se rozměrů permanentních magnetů a snímacích cívek nebo jejich vzájemné polohy. Tyto informace jsou s největší pravděpodobností chráněny jako firemní tajemství jednotlivých výrobců.

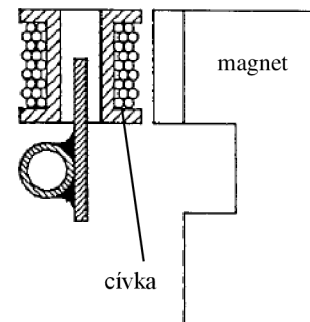
U každého patentu je uvedeno jeho číslo, datum vydání, jméno vlastníka a krátký popis. Patenty jsou řazeny dle data vydání.

1) US 4777833

18. 10. 1988

Micro Motion, Inc.

Patentovaný snímač je tvořen snímací cívkou, pásem z feromagnetického materiálu, vnějším permanentním magnetem ve tvaru písmene U a je určen pro Coriolisův hmotnostní průtokoměr. Cívka je umístěna v magnetickém poli tohoto magnetu. Feromagnetický pás vyrobený např. z oceli je připevněný k měřicí trubici průtokoměru. Jedná se o elektromagnetický snímač. Kmitáním měřicí trubice, a tím i ocelového pásu, se mění odpor magnetického obvodu, tím i magnetický indukční tok a v cívce se indukuje napětí úměrné rychlosti kmitání. [13]



Obrázek 6: Indukční snímač dle patentu US 4777833 [13]

2) US 5115683 (A)³

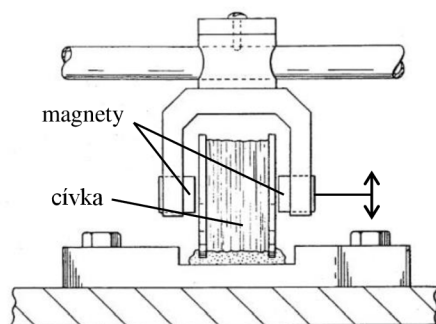
26. 5. 1992

K-Flow Division Kane Steel Co., Inc.

Navrhovaný indukční snímač je součástí Coriolisova hmotnostního průtokoměru určeného pro malé průtoky (cca do 0,5 kg/min). Snímač se skládá ze dvou magnetů připevněných pomocí ramene ve tvaru U k měřicí trubici a z cívky připevněné, např. pomocí epoxidu, k základně, případně k druhé měřicí trubici (záleží na provedení průtokoměru). Nosník magnetu je vyroben z lehké slitiny a v závislosti na velikosti průtokoměru se jeho hmotnost, včetně magnetu, pohybuje v rozmezí 0,4 g až 2 g. Měřicí trubice průtokoměru je tak jen minimálně zatížena.

Zajímavostí tohoto provedení je neobvyklý vzájemný pohyb snímací cívky a permanentních magnetů. Zatímco obvykle je magnet zasouván a vysouván z cívky, zde se magnety pohybují vertikálně mimo cívku (naznačeno na obrázku č. 7). [14]

³ Písmeno (případně písmeno s číslem) uváděné v závorce za číslem patentu označuje typ patentové listiny. Význam písmem se stát od státu liší. Například v patentech z USA znamená písmeno A patenty udělené před rokem 2001, A1 patentové přihlášky po roce 2000, B1 udělený patent publikovaný bez A1 a B2 udělený patent publikovaný s A1. [9]



Obrázek 7: Indukční snímač dle patentu US 5115683 (A) [14]

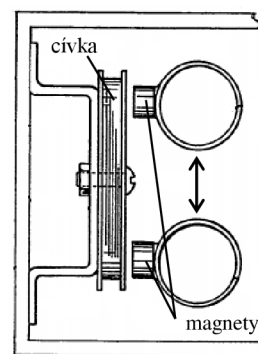
3) US 5349872

27. 9. 1994

Micro Motion, Inc.

Jedná se opět o snímač určený pro hmotnostní průtokoměr. Od většiny ostatních snímačů se opět odlišuje vzájemným pohybem permanentního magnetu a snímací cívky. Magnety se zde nezasunují do cívky, ale kmitají proti sobě při okraji cívky, jak je naznačeno na obrázku č. 8. Zajímavostí je i použití kombinace dvou magnetů a jedné cívky.

V patentu jsou uvedeny i jisté nevýhody tohoto provedení, mezi které patří obtížné udržení konstantní mezery mezi magnety a cívkou, a to vlivem vnějších, nežádoucích vibrací, nebo vlivem teplotních změn způsobených provozními podmínkami. Určitou další nevýhodou je nutnost velmi přesného umístění držáku cívky opět pro dodržení mezery mezi cívkou a magnety. [15]



Obrázek 8: Indukční snímač dle patentu US 5349872 [15]

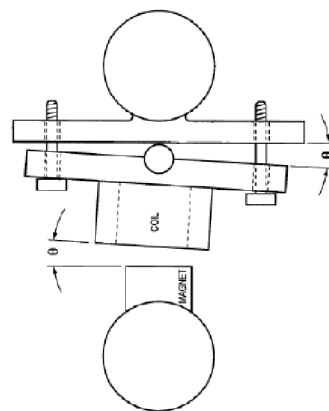
4) US 6997033 (B2)

14. 2. 2006

Emerson Electric Co.

Obsahem patentu je vylepšené provedení jednoduchého indukčního snímače. Zatímco k jedné měřicí trubici je připevněn pouze permanentní magnet, k druhé je připevněn speciální nástavec se snímací cívkou. Pomocí nástavce je možné korigovat odchylku v náklonu cívky. Požadavkem je, aby úhel θ (obrázek č. 9) mezi hranou cívky a hranou magnetu byl co možná nejmenší.

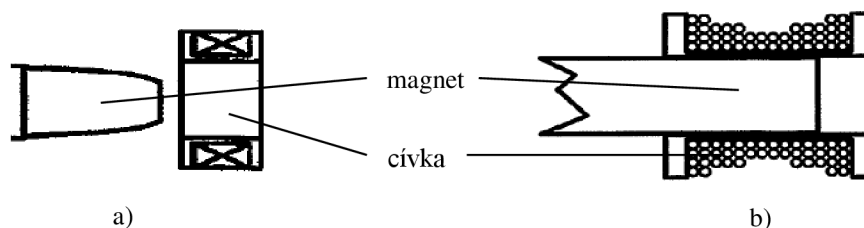
Na obrázku č. 9 je uvedeno jedno z možných provedení nástavce, uváděných v patentu. Vylepšení by mělo zvýšit přesnost měření, zejména pak posun nuly a nepřesnosti při nulovém průtoku média průtokoměrem. Dle mého osobního názoru by však jistou nevýhodou mohla být hmotnost nástavce. [16]



Obrázek 9: Indukční snímač dle patentu US 699703 (B2) [16]

Tento patent obsahuje velké množství úprav elektrodynamického snímače. Pro příklad zde uvádím dva z nejzajímavějších. Prvním návrhem je použití kónického tvaru permanentního magnetu, který se zasouvá do cívky (obr. 10a). Tím se má dosáhnout lepší linearitě a zvýšení citlivosti. Vinutí cívky má po celé délce stejný průřez.

Druhým návrhem je nerovnoměrný průřez vinutí cívky (obr. 10b). Vinutí je navinuto tak, že při krajích cívky je více vrstev závitů než uprostřed. Toto provedení má zvyšovat linearitu a zjednodušovat tak vyhodnocovací logiku výpočetní jednotky např. hmotnostního průtokoměru, pro který by mohl být tento snímač použitelný. [17]



Obrázek 10: Indukční snímač dle patentu US 7528597 (B2) [17]

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Následující kapitola obsahuje popis provedených simulací a měření. Je rozdělena do čtyř hlavních podkapitol, kterými jsou „Simulace a výpočty“, „Měření“, „Srovnání výsledků simulace a měření“ a „Shrnutí a obecná doporučení“.

3.1 Simulace a výpočty

V kapitole je popsán postup, který byl použit k získání indukovaného napětí v cívce pomocí výpočtů. Postup se skládal z vytvoření modelu permanentního magnetu v simulačním programu a následné aplikace vhodného matematického aparátu pro výpočet indukovaného napětí.

K simulaci a výpočtům byla použita běžně dostupná výpočetní technika, konkrétně notebook Asus M51Va, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Tabulka 1: Parametry notebooku použitého k simulaci a výpočtům

Název	M51Va-AS043E
Výrobce	Asus
Procesor (výrobce / model / frekvence)	Intel / P8600 / 2,4 GHz
Paměť RAM (typ / velikost / frekvence)	DDR2 / 4096 MB / 800 MHz
Harddisk (výrobce / velikost / rozhraní)	Seagate / 320 GB / Serial ATA
Grafická karta (výrobce / model / paměť)	ATI / Radeon HD 3650 / 512 MB
Operační systém (verze / typ)	Windows 7 Professional SP1 / 64 – bitů

3.1.1 Model permanentního magnetu

Při zadávání parametrů magnetů do simulačního programu jsem vycházel z rozměrů a magnetických vlastností skutečných magnetů, které byly později použity k měření v laboratoři. Jedná se o dva válcové, neodymové magnety od společnosti Magsy s.r.o. První s pracovním označením „široký“ o rozměrech 8,5 x 5,0 mm a druhý s označením „úzký“ o rozměrech 6,0 x 7,5 mm. Rozměry jsou uvedeny v pořadí průměr x výška. Podrobnější údaje o magnetech jsou uvedeny níže, v kapitole Měření (kap. 3.2), v tabulce č. 4.

Pro tvorbu modelu permanentního magnetu byl zvolen simulační program COMSOL Multiphysics uvedený v zadání jako možný použitelný software. Byla použita poslední, nejaktuálnější, verze programu s označením 4.3a, vydaná k 1. 10. 2012. Program COMSOL Multiphysics (dále jen program) je simulační software s širokými oblastmi použití, pracující s metodou konečných prvků (MKP).

S jeho pomocí lze modelovat a řešit nejrůznější fyzikální úlohy, popsané parciálními diferenciálními rovnicemi, jako je např. prostup tepla, akustické vlnění, elektromagnetismus, chemické reakce, proudění a mnohé další. K dalším výhodám patří možnost importovat geometrické modely z CAD systémů, propojení s programem MS Excel a především propojení s programem Matlab. [10]

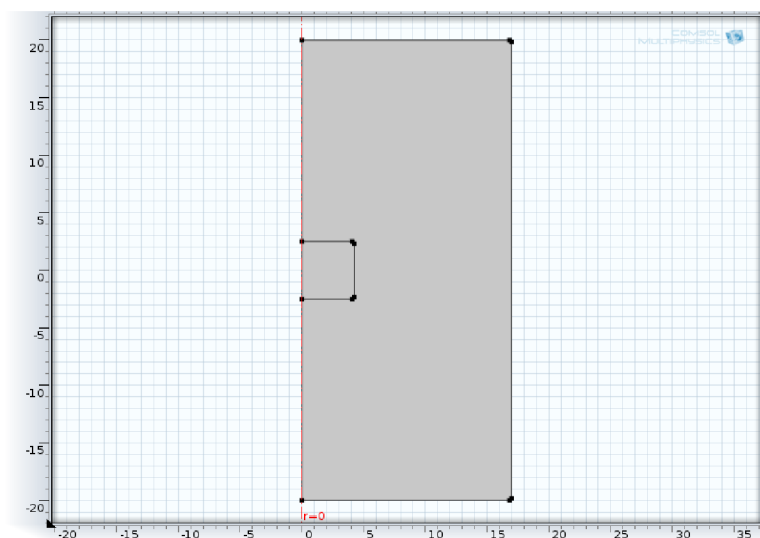
Tvorba modelu v programu se skládá z několika částí. Nejprve je nutné vytvořit geometrii modelu, tedy v našem případě zadat rozměry magnetu, dále zvolit materiál, ze kterého je magnet vyroben, určit kde a jaké působí fyzikální zákony, zvolit parametry výpočetní sítě a nakonec spustit samotný výpočet.

Protože postup tvorby modelu se u obou magnetů shoduje, jsou následující kapitoly psány pouze pro první magnet s označením „široký“.

3.1.1.1 Geometrie modelu

Geometrie modelu je základem pro celou simulaci. Program nabízí tvorbu geometrie v prostorech od rozměru 0D až po rozměr 3D. Pro náš případ jsem zvolil 2D prostor, protože modelování ve 3D by nebylo na použitém notebooku realizovatelné a nebyla by tak splněna podmínka ze zadání, že simulace musí být proveditelná s běžně dostupnými výpočetními prostředky. Vybraný 2D prostor je navíc osově souměrný, protože se předpokládá, že modelovaný magnet a magnetické pole kolem něj jsou také osově souměrné. Tím se ještě o polovinu sníží velikost počítané oblasti, což nezanedbatelně přispívá ke snížení výpočetních nároků.

Geometrie magnetu je zobrazena na obrázku č. 11. Jsou vidět dva obdélníky (dvě domény), z nichž menší představuje magnet a větší jeho okolí, tedy vzduch. Červeně je zobrazena osa symetrie. Rozměry magnetu jsou shodné s rozměry skutečného magnetu – díky symetrii je zobrazen pouze poloměr magnetu. Rozměry okolí jsou k rozměrům magnetu v poměru 2:1 pro šířku a 8:1 pro výšku, k zajištění dostatečně velké oblasti pro další výpočty. Měřítka obou os, zobrazených na obrázku č. 11, je v milimetrech.



Obrázek 11: Geometrie modelu

Obě domény zobrazené na obrázku č. 11 jsou ještě upraveny zaoblením rohů. Ostré rohy by při výpočtu mohly vykazovat velkou chybu. Poloměr zaoblení $r = 5/30$ je ve srovnání s rozměry magnetu téměř zanedbatelný a neměl by tak mít vliv na výsledné hodnoty simulace.

3.1.1.2 Materiál modelu

Dalším parametrem nutným k simulaci je určení parametrů materiálů jednotlivých geometrických oblastí – v našem případě permanentního magnetu a okolí (vzduchu). Program obsahuje rozsáhlou knihovnu materiálů, ze kterých si lze vybírat. V případě, že požadovaný materiál v knihovně chybí, lze jej přidat nadefinováním jeho parametrů.

V našem případě bylo nutné vytvořit materiál magnetu. Jediným parametrem, který program vyžadoval, byla relativní permeabilita μ_r . Tu jsem vypočítal dosazením hodnot remanence $B_r = 1320 - 1380 \text{ mT}$ a vnitřní koercivity $H_{CJ} \geq 876 \text{ kA/m}$, udávaných výrobcem, do vztahu 2.5. Výrobce neudává konkrétní hodnotu remanence, ale její rozsah, který je však tak malý, že dosazením jeho horní či dolní hranice do simulace se výsledek nijak pozorovatelně nezměnil. Pro výpočty jsem tedy používal horní hranici rozsahu remanence a výpočtem dle vztahu 2.5 jsem získal hodnotu relativní permeability $\mu_r = 1,2536$, kterou jsem považoval za správnou, neboť jak je uvedeno v teoretickém úvodu, hodnota permeability permanentních magnetů se pohybuje v řádu jednotek. Tuto hodnotu jsem zapsal do příslušné kolonky v programu.

Pro okolí magnetu jsem z knihovny programu vybral materiál *air* (vzduch) a doplnil jeho permeabilitu, jejíž hodnota je $\mu_r = 1$.

3.1.1.3 Fyzikální zákony

V této části tvorby modelu se zadávají fyzikální zákony, které požadujeme namodelovat. Jednotlivé zákony jsou umístěny v modulech, rozdělených podle různých oblastí fyziky. V našem případě využijeme modul *Magnetic Fields, No Currents* (dále jen modul), tedy magnetická pole bez proudů.

Opět je třeba zadat fyzikální vlastnosti zvlášť pro magnet a zvlášť pro jeho okolí. Musíme určit vlastnosti magnetického pole. V modulu k položce *Magnetic Flux Conservation 1* přiřadíme doménu okolí magnetu. V záložce *Magnetic Field* je již předdefinovaný vztah pro výpočet magnetické indukce B

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad [T] \quad (3.1)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua, μ_r je relativní permeabilita a H je intenzita magnetického pole. V položce *Relative permeability* vybereme *From material*, což znamená, že program bude využívat námi zadanou hodnotu relativní permeability daného materiálu, kterou jsme nadefinovali v předchozím kroku.

Pro zadání vlastností magnetického pole magnetu musíme přidat ještě jednu položku, a sice *Magnetic Flux Conservation 2*. Zde je nutné zadat velikost a směr magnetizace. Z nabídky vybereme položku *Magnetization* a program zobrazí

předdefinovaný vztah 3.2 a tabulku pro zadání velikosti a směru magnetizace M . Do řádku v tabulce, reprezentujícího magnetizaci v ose z (vertikální osa), dosadíme hodnotu vnitřní koercivity magnetu $H_{CJ} \geq 876 \text{ kA/m}$.

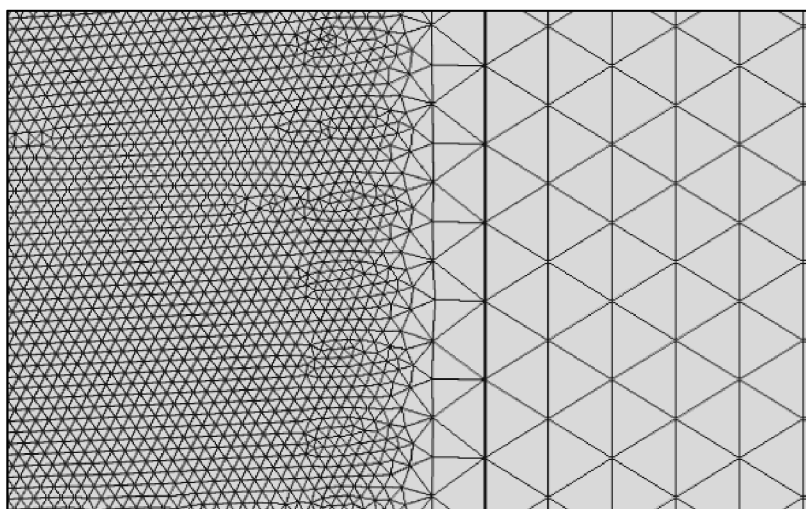
$$B = \mu_0(H + M) [T] \quad (3.2)$$

Nakonec musíme zadat okrajovou podmínku, jinak bude výsledek simulace velmi nepřesný. To provedeme v položce *Zero Magnetic Scalar Potencial 1*, ke které přiřadíme jeden okrajový bod ze simulace, přičemž nezáleží, zda se jedná o bod na okraji magnetu, nebo jeho okolí. Tím jsme dokončili zadávání fyzikálních zákonů a můžeme přejít k tvorbě výpočetní sítě.

3.1.1.4 Výpočetní síť

Tvorba výpočetní sítě modelu je poslední operací před vlastním výpočtem. Výpočetní síť (*mesh*) určuje body, ve kterých je prováděn výpočet metodou konečných prvků (MKP). Program nabízí více druhů sítí, pro 2D prostor je to konkrétně síť složená z trojúhelníkových, nebo čtyřúhelníkových elementů. Pro naši simulaci jsem zvolil síť trojúhelníkovou.

Velikost elementů sítě lze nastavit podle potřeby uživatele. Protože se předpokládá, že v magnetu a zejména při jeho povrchu bude magnetické pole obsahovat výrazné změny, jsou elementy sítě pokrývající oblast magnetu a jeho blízké okolí do maximální velikosti $0,015 \text{ mm}$. Blízkým okolím se rozumí zvolená oblast do vzdálenosti 1 mm od povrchu magnetu. Zbylé okolí magnetu je pokryto sítí s maximální velikostí elementů do $0,08 \text{ mm}$, neboť zde již změny magnetického pole zřejmě nebudou tak výrazné a navíc tím bude simulace méně výpočetně i časově náročná. Na obrázku č. 12 je zobrazen detail výpočetní sítě na hranici blízkého okolí (vlevo) a okolí (vpravo) magnetu. Rozdíl mezi velikostí elementů obou zobrazených oblastí je dobře zřetelný.



Obrázek 12: Výpočetní síť jednotlivých simulovaných oblastí

3.1.1.5 Výpočet modelu

K výpočtu modelu složí položka *Study*, kde je možné zvolit, zda chceme řešit úlohy stacionární, nebo časově proměnné, případně s konstantními nebo proměnnými parametry.

Původní představa počítala s použitím stacionární simulace s proměnnými parametry. Měla se skládat z magnetu umístěného ve vzduchu a pomyslné plošky reprezentující průřez vinutím cívky. Tato ploška se měla s parametrickým krokem posunovat podél magnetu ve vertikálním směru. Plošným integrálem měla být určena velikost magnetického indukčního toku Φ odpovídající dané plošce. Nicméně se ukázalo, že tato úvaha je zcela nesprávná, neboť magnetický indukční tok se počítá z oblasti ohraničené závity cívky a nikoliv z průřezu vinutí, který je k této oblasti kolmý. Navíc byla parametrická simulace časově náročná – doba výpočtu se pohybovala v řádu několika hodin a program byl nestabilní z důvodu malé velikosti paměti RAM.

Nový, již použitý model je tvořen pouze magnetem umístěným ve vzduchu a neobsahuje žádnou posunující se plošku. Je použit stacionární řešič s konstantními parametry, což výrazně urychlilo dobu výpočtu z několika hodin na jednotky, maximálně desítky minut.

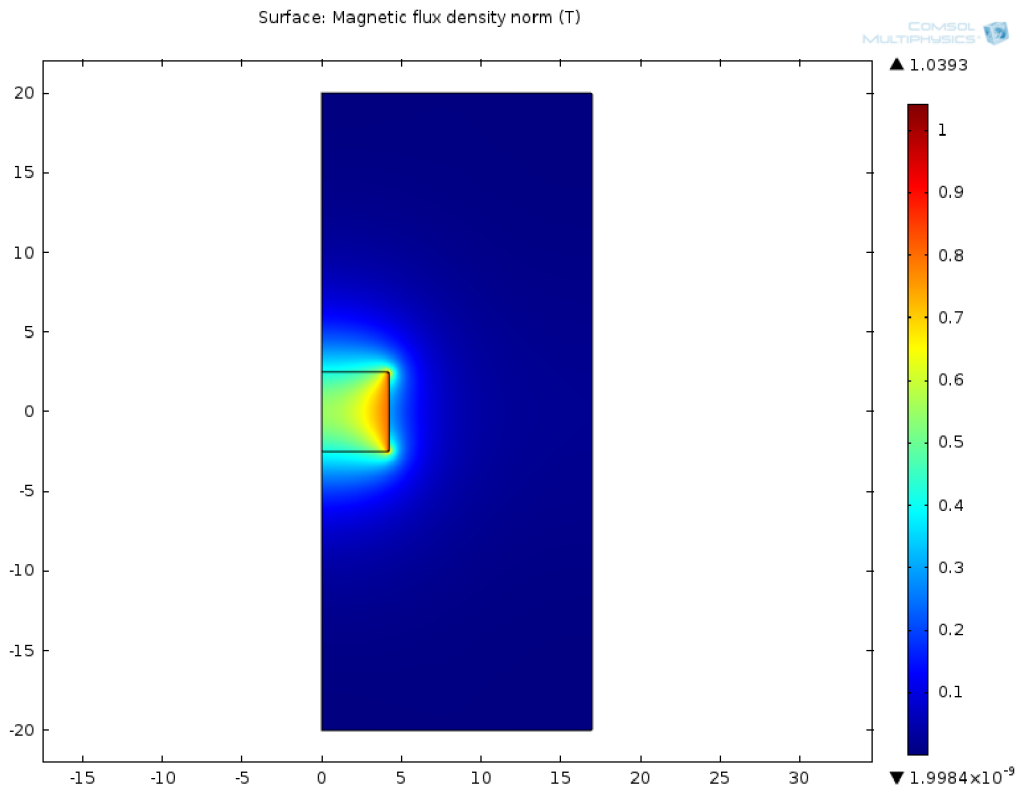
V nastavení řešiče lze zvolit hodnotu relativní tolerance výpočtu. Jedná se o toleranci pro ukončení iteračního řešiče a kontrolu chyb. V našem případě byla relativní tolerance nastavena na hodnotu 0,001. Dále je možné zvolit linearitu řešiče. Ta byla ponechána na automatickou.

Požadovaným výsledkem simulace je pouze stacionární magnetické pole permanentního magnetu. Simulace cívky a kmitavého pohybu je následně provedena v programu Matlab.

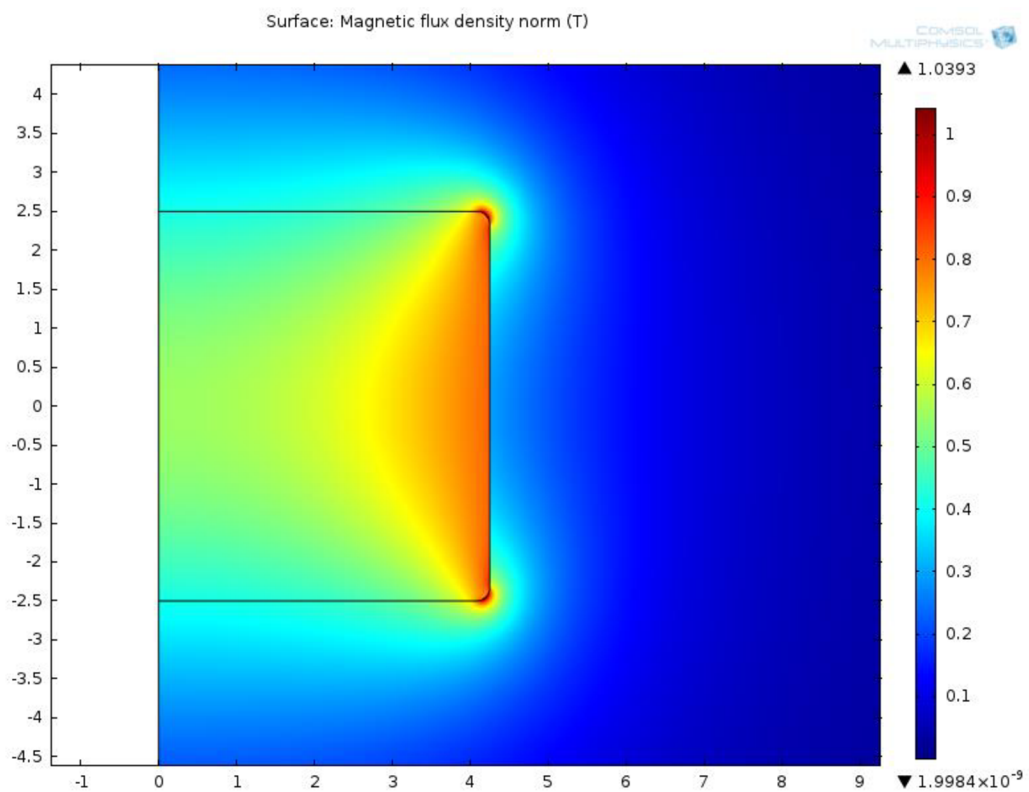
3.1.1.6 Výsledek

K zobrazení vypočítaného výsledku slouží záložka *Results*, kde lze výsledek prezentovat mnoha způsoby. Například námi simulované magnetické pole můžeme zobrazit pomocí magnetické indukce, nebo intenzity magnetického pole. Můžeme také zobrazit pouze jednotlivé složky těchto veličin. Požadované výsledky lze zobrazovat pomocí barevných map, izoploch, izočar, proudnic, šipek atd. Dále je možné provádět různé výpočty jako integrace, derivace apod., vytvářet animace úloh závislých na čase a k dispozici je samozřejmě i export dat v nejrůznějších podobách, např. textových souborech, nebo souborech programu MS Excel.

Pro zobrazení magnetického pole využijeme barevnou mapu (obrázek č. 13). Pole je zde reprezentováno výslednou hodnotou magnetické indukce. Z obrázku je vidět, že nejsilnější je magnetické pole při vertikální hraně magnetu, zejména pak v jeho rozích. Detailní pohled na tuto oblast je na obrázku č. 14.

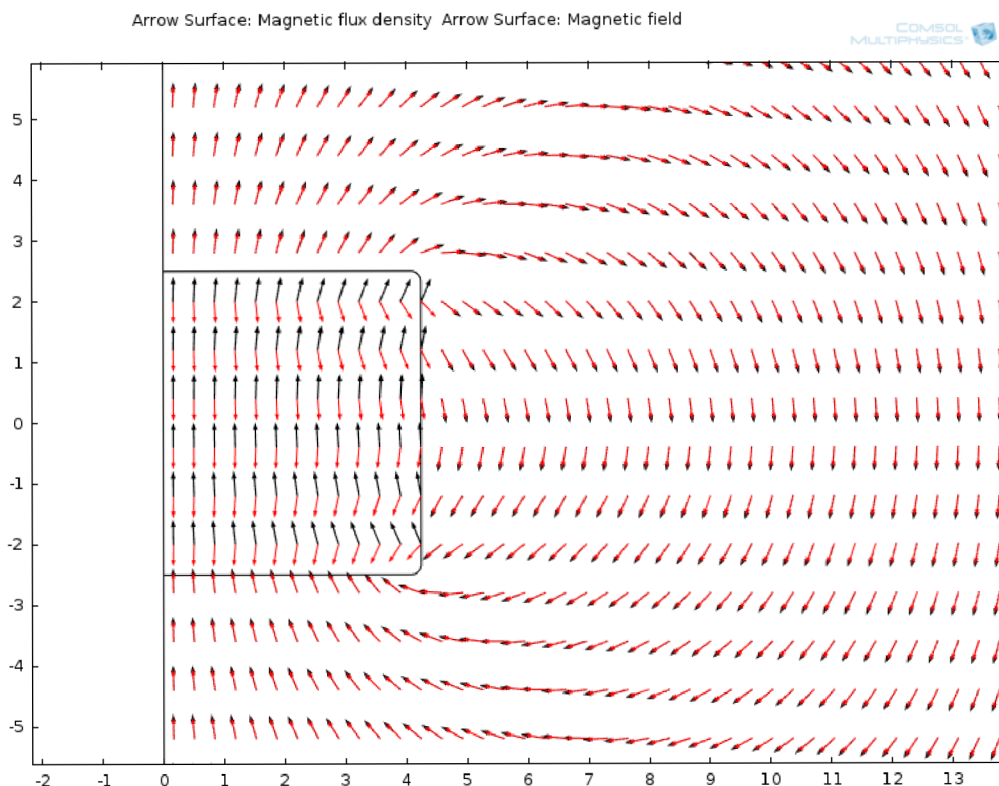


Obrázek 13: Simulace – magnetická indukce B - výsledná hodnota



Obrázek 14: Simulace – magnetická indukce B – výsledná hodnota (detail)

Na obrázku č. 15 je zobrazeno magnetické pole pomocí šipek. Černé šipky představují magnetickou indukci, červené šipky znázorňují intenzitu magnetického pole. Je vidět, že uvnitř magnetu mají tyto dvě veličiny opačný směr, což souhlasí s teorií (kap. 2.2.2) a lze tedy usuzovat, že simulace je vytvořena správně.

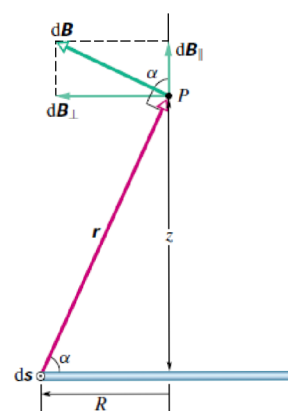


Obrázek 15: Simulace – magnetická indukce B a intenzita magnetického pole H

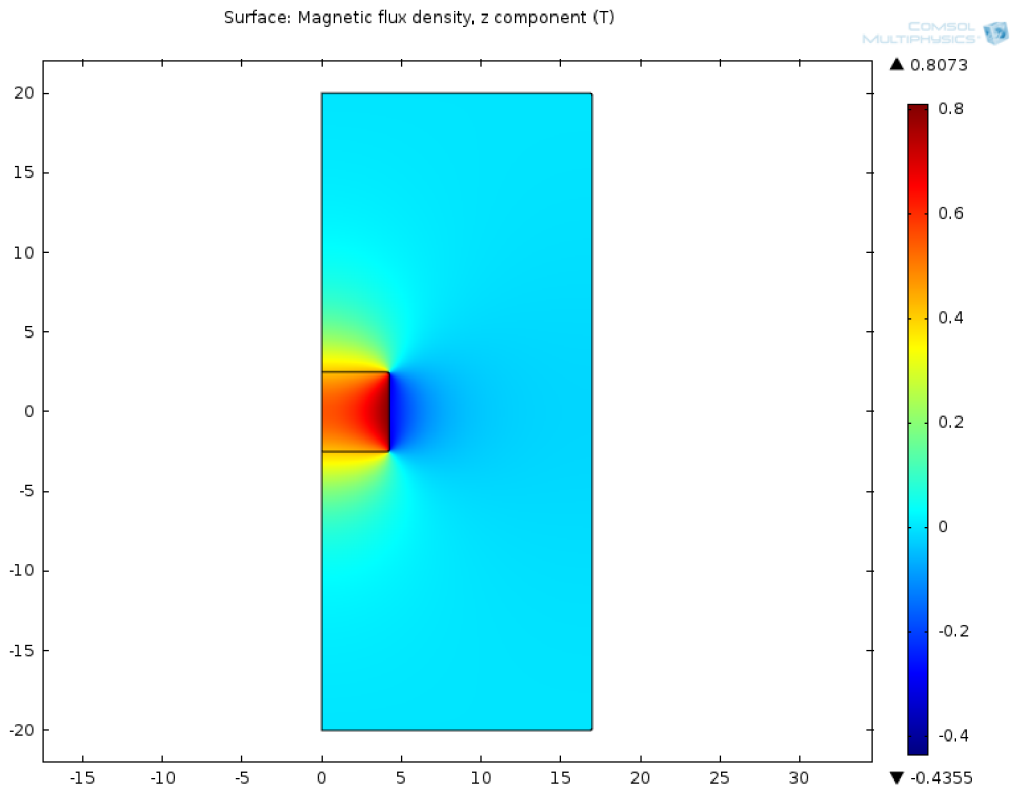
Výsledný vektor magnetické indukce B můžeme rozložit na složku B_r působící v horizontální ose a složku B_z působící v ose vertikální. Na obrázku č. 16 je zobrazen boční pohled na kruhový závit o poloměru R a středovou osou z . Ze symetrie vyplývá, že vektorový součet všech složek B_r v oblasti ohraničené závitem je roven nule. Uplatňují se pouze složky B_z , kolmé k rovině závitu. Výsledný magnetický tok Φ plochou závitu S pak lze vypočítat podle vztahu 3.3. [11]

$$\Phi = \iint_S B_z dS \quad [Wb] \quad (3.3)$$

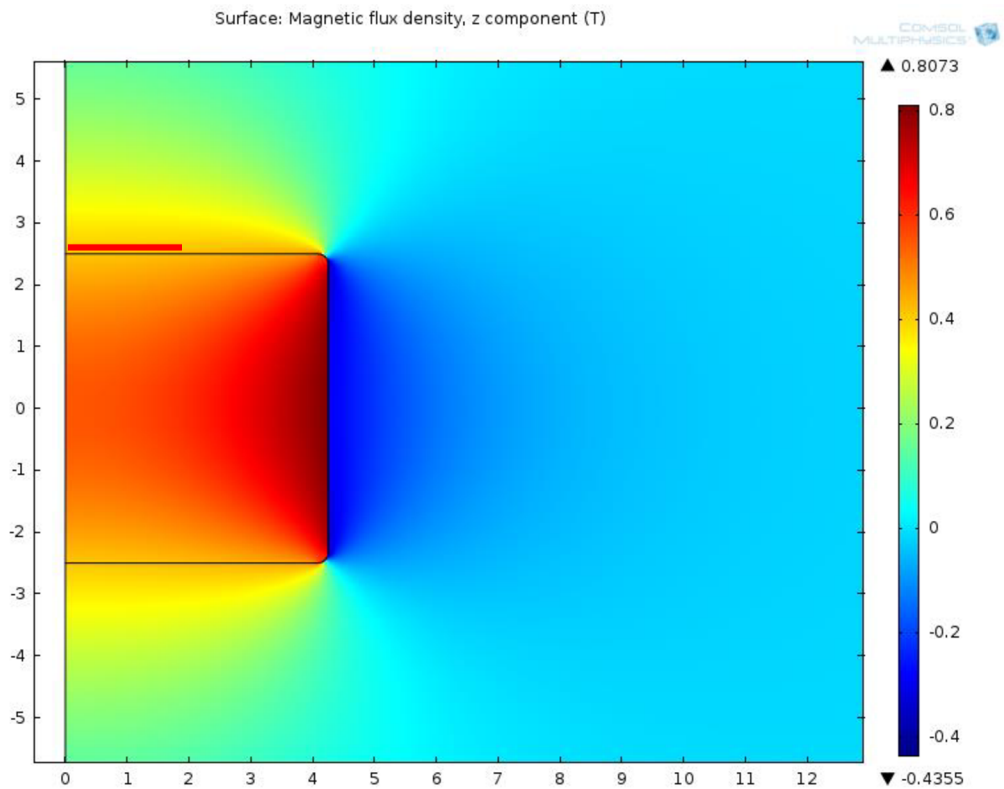
K dalším výpočtům tedy bude uvažována pouze vertikální složka magnetické indukce. Opět pomocí barevné mapy si lze tuto složku zobrazit (obrázek č. 17). Detailní pohled na magnet a jeho blízké okolí je na obrázku č. 18.



Obrázek 16: Složky magnetické indukce B



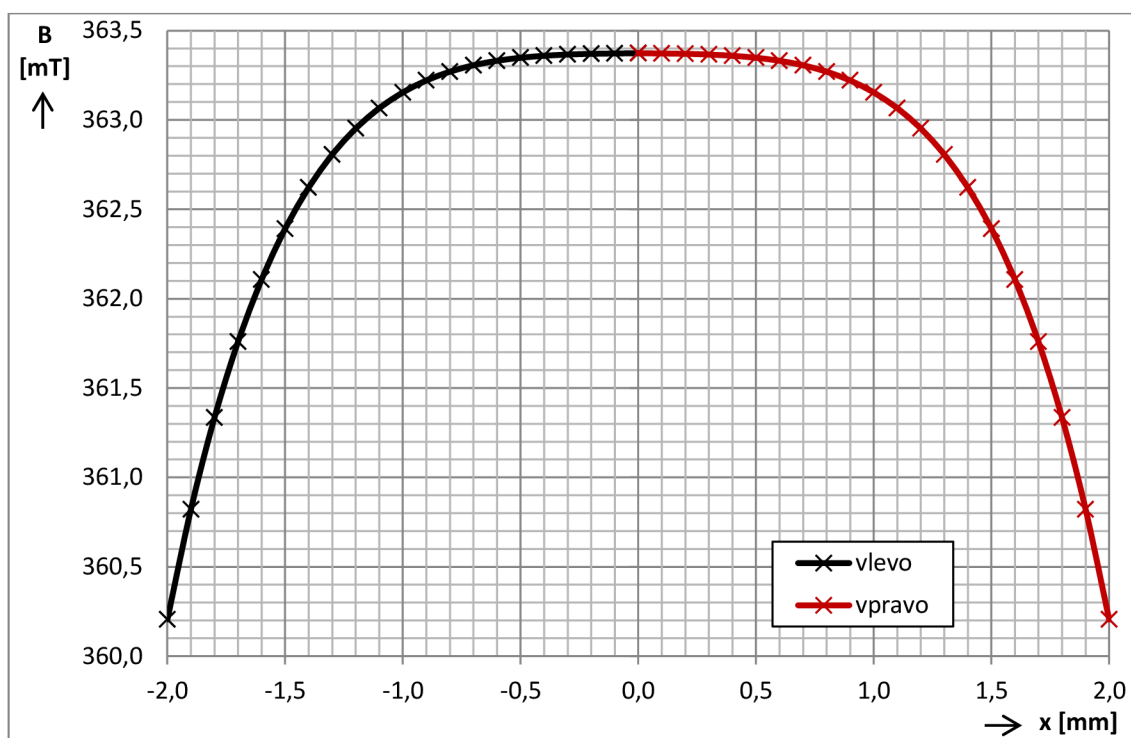
Obrázek 17: Simulace – magnetická indukce B – vertikální složka



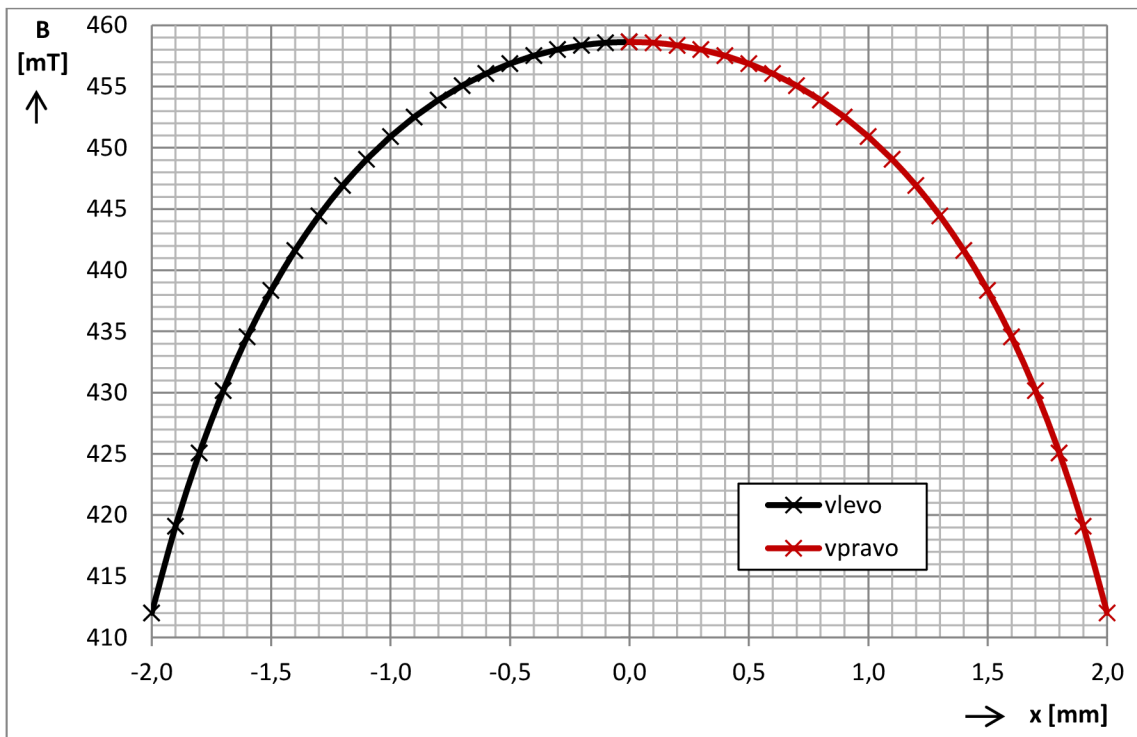
Obrázek 18: Simulace – magnetická indukce B – vertikální složka (detail)

Pro pozdější srovnání s měřením jsem vytvořil graf se závislostí vertikální složky magnetické indukce na vzdálenosti od vertikální osy magnetu. V záložce *Results* a podzáložce *Data Sets* jsem zvolil položku *Cut Line 2D*, která slouží k určení úsečky, ze které se má zobrazovat výsledek. Pomocí souřadnic jsem určil požadovanou úsečku ve výšce $0,5\text{ mm}$ nad magnetem o délce 20 mm . Úsečka je pro ilustraci vyznačena červeně na obrázku č. 18. Kliknutím pravým tlačítkem myši na položku *Results* jsem přidal skupinu pro tisk grafů - *1D Plot Group*. Opětovné kliknutí pravým tlačítkem myši na tuto položku slouží pro přidání položky *Line Graph*. V ní jsem určil zdroj dat, tedy nadefinovanou úsečku a veličinu, kterou jsem požadoval zobrazit, tedy vertikální složku magnetické indukce. Výsledný průběh pro široký magnet je zobrazen v grafu č. 1, pro úzký magnet v grafu č. 2. I když lze grafy exportovat jako obrázky přímo z programu, byly hodnoty pro lepší možnost zobrazení nejprve převedeny do programu MS Excel a až poté zobrazeny v grafech. Z grafů je vidět, že velikost magnetické indukce směrem od vertikální osy magnetů klesá. Zatímco u širokého magnetu je pokles jen asi o $0,003\text{ T}$, v případě úzkého magnetu je tento pokles cca $0,015\text{ T}$. V průběhu pro široký magnet si lze všimnout výrazně širší oblasti s téměř konstantní hodnotou magnetické indukce ve srovnání s průběhem pro úzký magnet. To je způsobeno pravděpodobně právě větším průměrem magnetu, kdy od vertikální osy magnetu do určité vzdálenosti je magnetické pole homogenní.

Graf 1: Závislost vertikální složky magnetické indukce na vzdálenosti od vertikální osy širokého magnetu.



Graf 2: Závislost vertikální složky magnetické indukce na vzdálenosti od vertikální osy úzkého magnetu.



Hodnoty vertikální složky magnetické indukce, tvořící barevnou mapu na obrázcích č. 17 a č. 18, byly vyexportovány z programu k dalšímu zpracování. Z nabízených možností jsem zvolil export do textového souboru a z nabídky exportovaných bodů jsem vybral položku *Grid*, tedy pravoúhlou mřížku, aby byla vzdálenost mezi souřadnicovými body ekvidistantní. Rozsah exportovaných bodů v horizontální ose r byl 0 mm až $+15\text{ mm}$, s krokem $0,001\text{ mm}$. Ve vertikální ose z byl rozsah -20 mm až $+20\text{ mm}$ a krok $0,01\text{ mm}$. Menší krok v horizontální ose byl zvolen proto, aby byla lépe zachycena výrazná změna vertikální složky magnetické indukce, která je vidět na obrázku č. 18, při pravé hraně magnetu. Dalším důvodem bylo snížení výpočetních a časových nároků exportu.

Při exportu se přesto objevil problém s nedostatečnou výpočetní kapacitou používaného notebooku. Z výše uvedených exportovaných rozsahů vyplývá, že k exportu bylo určeno cca 60 milionů hodnot, což nebyl notebook schopný najednou zvládnout. Export dat tak musel být rozdělen na čtyři části podle osy z , kdy se postupně exportovaly hodnoty v rozsazích -20 mm až -10 mm , -10 mm až 0 mm , 0 mm a $+10\text{ mm}$ a $+10\text{ mm}$ až $+20\text{ mm}$. Export každé části trval téměř 10 minut a celý export tak dohromady trval paradoxně déle než samotný výpočet simulace.

Výstupem ze simulace v programu COMSOL Multiphysics tak byly čtyři textové soubory, pro každý model magnetu, obsahující hodnoty vertikální složky magnetické indukce, každý o velikosti cca $0,97\text{ GB}$.

3.1.2 Výpočet indukovaného napětí

K výpočtu indukovaného napětí jsem použil program Matlab. Jedná se o integrované prostředí pro numerické výpočty, vizualizaci a programování. Mezi přednosti programu patří rychlé výpočetní jádro, podpora paralelních výpočtů, objektové programování, velké množství knihoven a modulů atd. K výpočtům byla použita verze R2012b. [12]

Získání hodnot indukovaného napětí se skládalo z několika na sebe navazujících kroků, které lze v základu rozdělit na předzpracování, hlavní výpočet a zobrazení výsledků. Tyto kroky jsou složeny ze samostatných funkcí, aby byl zdrojový kód algoritmu přehlednější pro čtení a případné hledání chyb. Samozřejmostí jsou komentáře doplňující zdrojový kód, případně vysvětlující jednotlivé funkce.

Následující kapitoly obsahují kromě popisu jednotlivých funkcí také vztahy a odvození, které byly použity k výpočtu indukovaného napětí. V dalším textu se vyskytují názvy jednotlivých funkcí, jejichž seznam, včetně vstupních a výstupních parametrů je uveden v příloze B.

3.1.2.1 Předzpracování

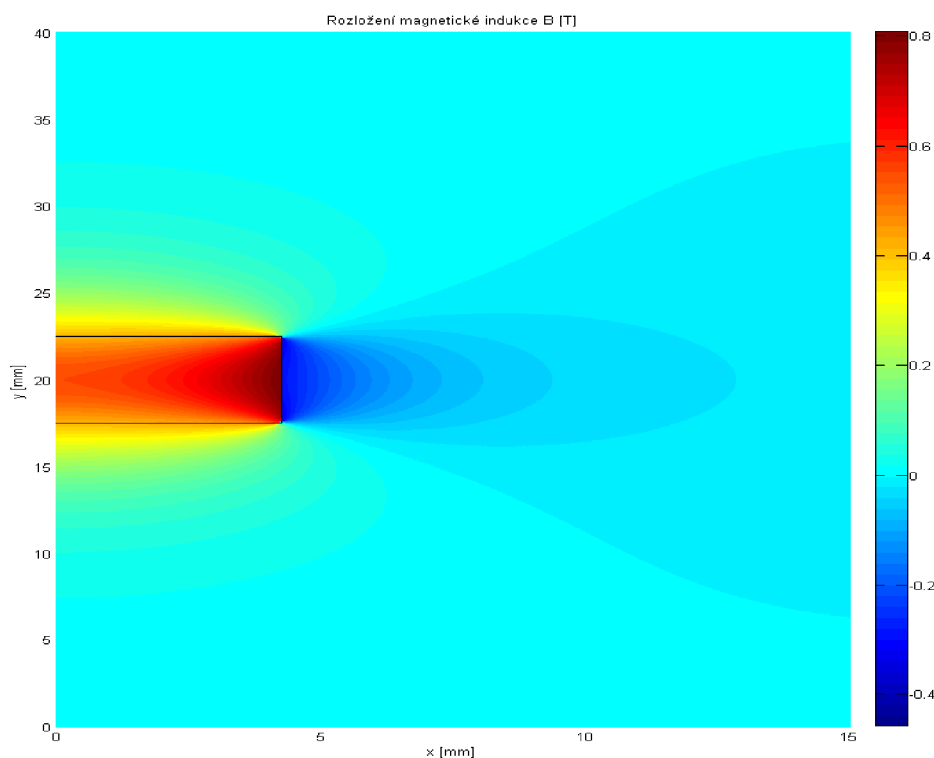
Prvním úkolem, ještě před samotnou implementací algoritmu pro výpočet indukovaného napětí, bylo zpracovat textové soubory z programu COMSOL Multiphysics obsahující hodnoty magnetické indukce a body polohy. K tomuto účelu slouží funkce `predzprac`, která dále využívá dvě podfunkce, a sice `nacti` a `sluc`.

Vstupním parametrem do funkce `nacti` je jméno textového souboru. Ten je načten a rozdělen do tří výstupních proměnných, kterými jsou `p_x` a `p_y`, obsahující vektory bodů udávajících polohu v osách x a y , a proměnná `B`, obsahující matici hodnot magnetické indukce. Všechny tři výstupní proměnné jsou uloženy s příslušným pořadovým číslem do formátu `mat`, což je datový formát programu Matlab. Takto jsou postupně načteny, rozděleny a uloženy všechny čtyři textové soubory.

K jejich sloučení slouží funkce `sluc`. Jejím vstupním parametrem je vektor obsahující požadované názvy sloučených souborů. Po sloučení daných souborů vzniknou, a jsou uloženy, tři výsledné soubory, a to pro osu x , osu y a hodnoty indukce. Jejich velikost je v případě prvních dvou v řádu stovek kilobajtů, v případě souboru s hodnotami indukce cca 440 MB, což je velmi výrazné zlepšení oproti původním čtyřem textovým souborům, jejichž velikost byla dohromady cca 3,9 GB. Tato komprese měla výrazný vliv na čas potřebný k dalším výpočtům.

Funkci `predzprac` je nutné spustit pouze jedenkrát pro každý nový model magnetu vytvořený v programu COMSOL Multiphysics.

Po předzpracování jsou k dispozici body hodnot magnetické indukce a jejich souřadnice x , y . Tyto body lze opět zobrazit pomocí barevné mapy (obrázek č. 19). Zobrazení nám slouží prakticky pouze pro kontrolu, že převod z programu COMSOL Multiphysics do programu Matlab proběhl korektně, neboť zobrazená barevná mapa se musí shodovat s barevnou mapou z programu COMSOL Multiphysics (obrázek č. 18).



Obrázek 19: Magnetická indukce B – vertikální složka - Matlab

3.1.2.2 Hlavní výpočet

Cílem výpočtu bylo nasimulovat vzájemný kmitavý pohyb cívky a magnetu, při kterém se v cívce indukují napětí. Algoritmus výpočtu byl rozdělen do dvou sad funkcí, a to i přesto, že jsou některé funkce v obou sadách totožné. Důvodem je lepší přehlednost. Zatímco první sada slouží k výpočtu indukovaného napětí v případě, že vertikální osa magnetu je souosá s vertikální osou cívky, druhá sada se využívá v případě, že tyto osy souosé nejsou. Přehled funkcí tvořící obě sady je uveden v tabulce č. 2.

V následujících odstavcích je popsáno, k čemu je která funkce určena, případně je doplněn matematický vztah nebo jiné vysvětlení, jak funkce pracuje.

Tabulka 2: Seznam funkcí pro výpočet indukovaného napětí

Funkce - sada 1	Funkce - sada 2
integruj_01	integruj_02
rozdel_01	rozdel_02
civka_01	civka_02
zmena_01	zmena_02
maxim_01	maxim_02

První neznámou, kterou je nutné spočítat, je magnetický indukční tok Φ procházející plochou S_1 (obrázek č. 20) určenou závitem cívky, který je dle vztahu 3.4 roven integrálu magnetické indukce v této ploše.

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad [Wb] \quad (3.4)$$

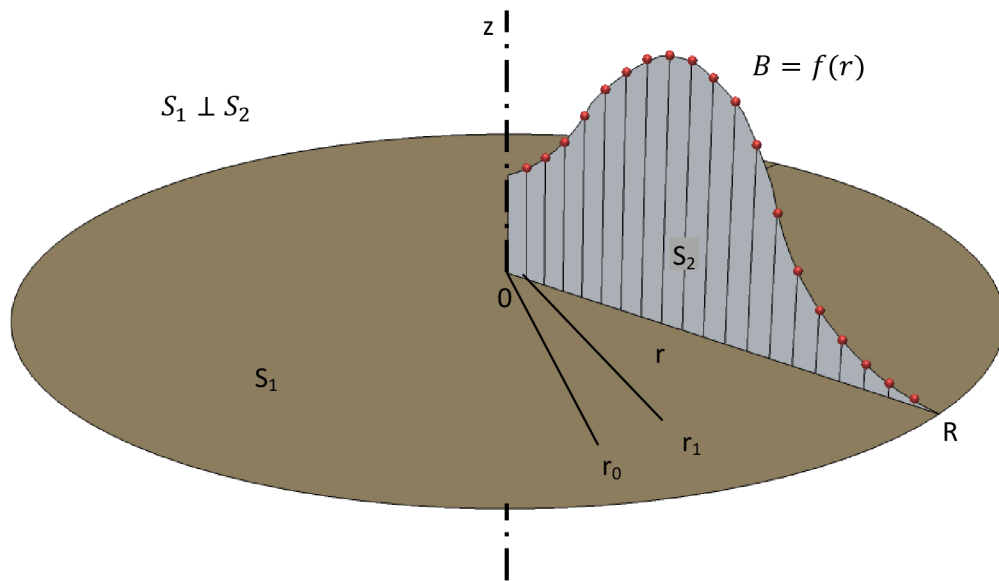
K výpočtu magnetického indukčního toku slouží funkce `integruj_01`, v případě vzájemného horizontálního posunu cívky a magnetu pak funkce `integruj_02`. Vzhledem k tomu, že simulace v programu COMSOL Multiphysics byla vytvořena jako symetrická a pouze ve 2D prostoru, jsou k dispozici hodnoty magnetické indukce B v bodech rozložených na poloměru daného závitu (naznačeny červeně na obrázku č. 20). Na obrázku je dále naznačen průběh magnetické indukce (dále jen průběh) nad poloměrem závitu r , který má však ve skutečnosti odlišný tvar. Zde zobrazený tvar slouží pouze k lepšímu vysvětlení.

V případě spojitého průběhu by bylo nutné nejprve spočítat integrál zobrazené plochy S_2 . Tím bychom získali magnetický indukční tok procházející poloměrem závitu r , tedy nekonečně tenkou úsečkou. Pro výpočet toku plochou S_1 se pak využije symetrie a základního vztahu pro výpočet obvodu kruhu $O = 2\pi r$. Kombinací těchto dvou výpočtů získáme vztah 3.5.

$$\Phi = \int_0^R 2\pi B(r)r \, dr \quad [Wb] \quad (3.5)$$

Protože jsou ale hodnoty magnetické indukce známy v bodech, čili průběh je vzorkován diskrétně, je nutné integrál ve vztahu 3.5 nahradit vhodnou numerickou integrační metodou. Pro co největší přesnost jsem zvolil metodu lichoběžníkovou. Po úpravě se získá vztah 3.6, kde i je číslo daného vzorku, n je celkový počet vzorků, $B(r_i)$ je hodnota magnetické indukce v daném vzorku a r_i je vzdálenost daného vzorku od středu závitu.

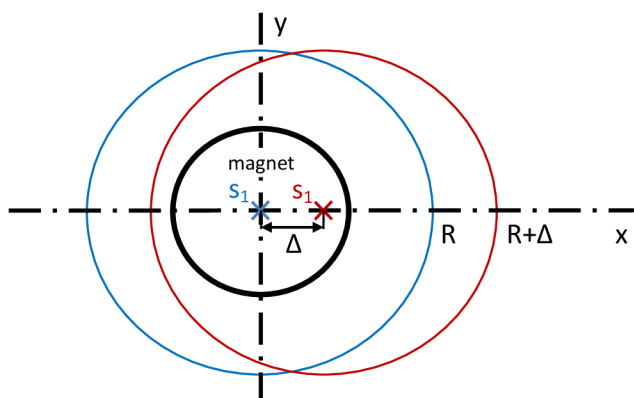
$$\Phi = \sum_{i=1}^n \pi \cdot (B(r_i) \cdot r_i + B(r_{i+1}) \cdot r_{i+1}) \cdot (r_{i+1} - r_i) \quad [Wb] \quad (3.6)$$



Obrázek 20: Výpočet magnetického indukčního toku Φ

Výpočet podle vztahu 3.6 funguje na základě úvahy, že vzorkované body leží tak těsně u sebe, že tvoří spojitý průběh. Pomocí lichoběžníkové metody spočítáme hodnotu plochy pod průběhem magnetické indukce např. mezi body r_0 a r_1 . Tuto hodnotu pak podle vzorce pro obvod kruhu „obtočíme“ kolem osy z . Takto postupujeme od středu závitů až k jeho okraji. Jednotlivé získané hodnoty magnetického indukčního toku sčítáme. Jakmile výpočet dospěje do bodu, kde leží začátek vinutí cívky, jsou všechny další součty ukládány zvlášť do zásobníku. Tak získáme hodnoty toků v jednotlivých závitcích cívky, navinutých na sobě ve vrstvách v horizontálním směru. Po dosažení bodu R , značícího konec vinutí cívky, je z hodnot v zásobníku vypočítána střední hodnota. Tím získáme celkový tok plochou S_1 .

Pro výpočet magnetického indukčního toku při vzájemném horizontálním posunu magnetu a cívky je výpočet poněkud složitější než v předchozím případě. Posun zobrazuje obrázek č. 21, na kterém je pohled ze shora na závit souosý s magnetem (vyznačen modře) a závit vyosený (vyznačen červeně). Mezera mezi magnetem a závitky je záměrně zvětšena pro lepší přehlednost. Ve skutečnosti je její velikost, v závislosti na šířce magnetu, od desetin po jednotky milimetrů.



Obrázek 21: Zobrazení vyosení závitů

Po vyosení kruhového závitu o velikost Δ v ose x je jeho rovnice

$$(x - \Delta)^2 + y^2 = R^2 \quad (3.7)$$

Po převedení x a y do polárních souřadnic, kde $x = r \cdot \cos \phi$ a $y = r \cdot \sin \phi$, a kde $r \in [0, \infty)$; $\phi \in [-\pi, \pi]$ a dosazení do vztahu 3.7 získáme vztah 3.8. Pro kruhový závit pak platí nerovnice 3.9.

$$r^2 - 2\Delta r \cos \phi + \Delta^2 = R^2 \quad (3.8)$$

$$r^2 - 2\Delta r \cos \phi + \Delta^2 \leq R^2 \quad (3.9)$$

Pokud řešíme nerovnici 3.9 s tím, že jako neznámou uvažujeme ϕ a ostatní proměnné jsou parametry, získáme tři možná řešení, a to pro $\Delta < R$, $\Delta > R$ a $\Delta = R$.

V prvním případě, tedy když $\Delta < R$, bude platit a pro $r \in [R - \Delta, R + \Delta]$

$$r \in [0, R - \Delta]; \phi \in [-\pi, \pi]$$

$$r \in [R - \Delta, R + \Delta]; \phi \in \left[-\cos^{-1}\left(\frac{\Delta^2 - R^2 - r^2}{2\Delta r}\right); \cos^{-1}\left(\frac{\Delta^2 - R^2 - r^2}{2\Delta r}\right) \right] \quad (3.10)$$

Magnetický indukční tok v polárních souřadnicích vypočítáme dle vztahu 3.11.

$$\Phi = \int_S B(r, \phi) \cdot r \, d\phi dr \quad [Wb] \quad (3.11)$$

Protože magnetická indukce B je rotačně symetrická kolem středové osy závitu, platí $B(r, \phi) = B(r)$. To znamená, že nezávisí na úhlu a můžeme tak přes úhel ϕ integrovat. Integrál pouze musíme rozdělit na dvě části, viz vztah 3.12.

$$\Phi = \int_0^{R-\Delta} 2\pi B(r) \cdot r \, dr + \int_{R-\Delta}^{R+\Delta} 2 \cos^{-1}\left(\frac{\Delta^2 - R^2 + r^2}{2\Delta r}\right) B(r) \cdot r \, dr \quad [Wb] \quad (3.12)$$

Pro druhý případ, kdy $\Delta > R$ vypočítáme magnetický indukční tok dle vztahu 3.13, pro hraniční případ, kdy $\Delta = R$ pak dle vztahu 3.14.

$$\Phi = \int_{R-\Delta}^{R+\Delta} 2 \cos^{-1} \left(\frac{\Delta^2 - R^2 + r^2}{2\Delta r} \right) \cdot B(r) \cdot r \, dr \quad [Wb] \quad (3.13)$$

$$\Phi = \int_0^{2R} 2 \cos^{-1} \left(\frac{r}{2R} \right) \cdot B(r) \cdot r \, dr \quad [Wb] \quad (3.14)$$

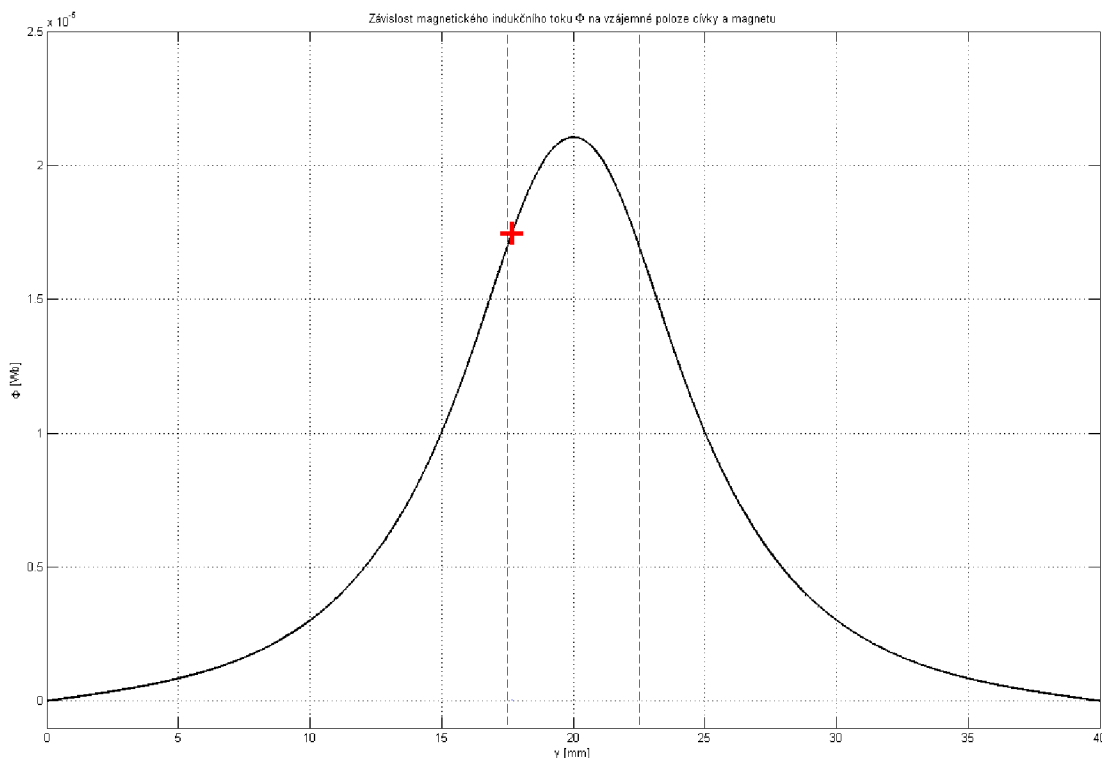
Protože vzájemný posun cívky a magnetu je velmi malý, nikdy nemůže nastat druhý ani třetí případ. Proto ve výpočtu počítáme pouze s prvním případem, který upravíme pomocí lichoběžníkové metody pro diskrétní výpočet a získáme vztah 3.15.

$$\begin{aligned} \Phi = \sum_{i=1}^{n-m} \pi \cdot (B(r_i) \cdot r_i + B(r_{i+1}) \cdot r_{i+1}) \cdot (r_{i+1} - r_i) \\ + \sum_{n-m}^{n+m} 2 \cos^{-1} \left(\frac{\Delta^2 - R^2 + r^2}{2\Delta r} \right) \cdot (B(r_i) \cdot r_i + B(r_{i+1}) \cdot r_{i+1}) \\ \cdot (r_{i+1} - r_i) \quad [Wb] \end{aligned} \quad (3.15)$$

Ve funkci `integruj_01`, případně `integruj_02` je spočítán magnetický indukční tok z jednotlivých řádků matice indukce, a to pomocí vztahů 3.6, případně 3.15. Kontrola vztahu 3.15 byla ověřena jeho použitím pro výpočet bez vzájemného posunu cívky a magnetu, kdy se výsledek musí shodovat s výsledkem vztahu 3.6.

Graf č. 3 zobrazuje průběh spočítaného magnetického indukčního toku funkcí `integruj_01` podél širokého magnetu. V grafu je modře vyznačen vrchní a spodní okraj magnetu. Oproti obrázku č. 19 je graf natočen o 90° doleva, takže osa, podle které je magnet symetrický, je nyní horizontální. Je vidět, že největší hodnota magnetického indukčního toku je ve středu magnetu a rovnoměrně klesá na obě strany. Červeně je vyznačeno místo, kde je funkce nejstrmější, tedy místo, s největší změnou magnetického indukčního toku.

Graf 3: Závislost magnetického indukčního toku na vzájemné poloze cívky a magnetu



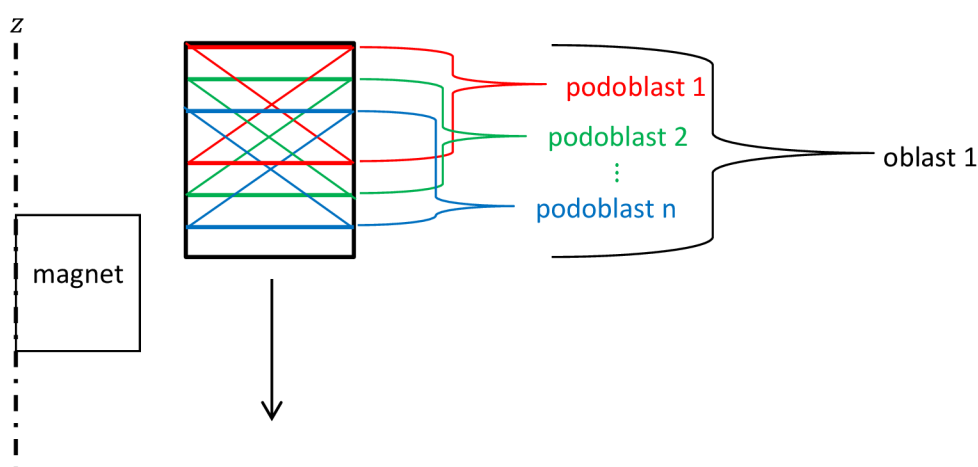
To, že celá úvaha výpočtu magnetického indukčního toku, a že vztah 3.6 je správně odvozen, jsem se pokusil ověřit následovně. V programu COMSOL Multiphysics jsem vytvořil 3D model širokého magnetu. Pomocí funkce pro plošnou integraci (obsažené v programu) jsem vypočítal magnetický indukční tok z vertikální složky magnetické indukce na horní a spodní straně magnetu a v jeho horizontálním řezu středem. V programu Matlab jsem z matice s hodnotami magnetické indukce také vypočítal magnetický indukční tok na horní a spodní straně magnetu a v jeho horizontálním řezu středem, ale tentokrát dle vztahu 3.6. Výsledky z obou výpočtů jsou uvedeny v tabulce č. 3. Téměř čtyřicetiprocentní odchylka může být způsobena buď tím, že vzorkování dat při exportu z programu COMSOL Multiphysics nebylo dostatečné a tím pádem jsou nepřesné i výsledky z programu Matlab, nebo jsou nepřesné výsledky z programu COMSOL Multiphysics, neboť při výpočtu 3D modelu magnetu nemohla být, vzhledem k výpočetním nárokům, použita tak jemná výpočetní síť, jako v původním 2D modelu.

Tabulka 3: Vypočítaný magnetický indukční tok z programů COMSOL Multiphysics a Matlab

	COMSOL Multiphysics Φ [Wb]	Matlab Φ [Wb]	Odchylka [%]
Horní hrana	2,0358e-5	2,4331e-5	39,7
Střed	3,4845e-5	3,8491e-5	36,5
Spodní strana	2,0373e-5	2,4331e-5	39,6

Dalším krokem výpočtu je získání indexů krajních bodů oblastí z vektoru souřadnic na vertikální ose (osa z na obrázku č. 19), ve kterých se má počítat indukované napětí. Výška oblasti je rovna součtu výšky cívky a dvojnásobku amplitudy kmitů. Získá se tak oblast, ve které se cívka periodicky pohybuje nahoru a dolů při kmitání. Ta se následně posunuje podél osy y se zvoleným krokem, který byl v našem případě $0,1\text{ mm}$. K těmto výpočtům je určena funkce `rozdel_01`, respektive `rozdel_02`, které jsou zcela totožné. Jejich vstupními parametry jsou vektor souřadnicových bodů na ose y , výška cívky, velikost kroku posunu a amplituda kmitání. Výstupem jsou indexy hraničních bodů posunujících se oblastí. Ty se využívají v další funkci.

Funkce `civka_01`, případně `civka_02` slouží k výpočtu změny magnetického indukčního toku $\Delta\Phi$ a časové změny Δt . Pomocí indexů z předchozí funkce jsou postupně vyjímány výše definované oblasti z vektoru s hodnotami magnetického indukčního toku. Každá oblast je rozdělena na ještě menší podoblasti, jejichž výška odpovídá výšce kmitající cívky. Poté je spočítána střední hodnota magnetického toku v těchto podoblastech. Pro lepší objasnění slouží obrázek č. 22, kde je černě zobrazena jedna oblast a barevně odlišeny její podoblasti. Šipka naznačuje směr posunu. Totéž dělení na podoblasti a výpočet středních hodnot je provedeno i pro hodnoty z vektoru souřadnic na vertikální ose. Zobrazení magnetu slouží pouze k lepší orientaci v obrázku. Poměr jeho velikosti vzhledem k velikosti cívky neodpovídá skutečnosti.



Obrázek 22: Výpočet magnetického indukčního toku v jednotlivých cívkách

Jakmile jsou spočítány střední hodnoty všech podoblastí v jedné oblasti, je ihned aplikována funkce `zmena_01`, případně `zmena_02`, aby se předešlo ukládání velkého množství mezivýsledků do paměti, což by prodloužilo dobu výpočtu a zvýšilo výpočetní nároky.

Funkce `zmena_01` / `zmena_02` je podfunkcí funkce `civka_01` / `civka_02` a obsahuje algoritmus pro výpočet změny magnetického indukčního toku $\Delta\Phi$ a časové změny Δt . Zatímco změnu magnetického indukčního toku lze vypočítat snadno rozdílem dvou sousedních hodnot magnetického indukčního toku, hodnoty času pro

časovou změnu je nutné vypočítat z bodů polohy. Využije se k tomu vztah 3.16, který popisuje harmonické kmitání.

$$y_i = y_0 \sin \omega t_i \quad [mm] \quad (3.16)$$

kde y_i je aktuální hodnota polohy, y_0 je amplituda kmitů, ω je úhlová rychlost a t_i je čas při aktuální hodnotě polohy, který se má určit. Po jeho vyjádření se dostane vztah 3.17.

$$t_i = \frac{\sin^{-1}\left(\frac{y_i}{y_0}\right)}{\omega} \quad [s] \quad (3.17)$$

Po vypočítání hodnot času jsou vypočteny rozdíly mezi sousedními hodnotami, čímž se získá změna času Δt , která je spolu se změnou magnetického indukčního toku $\Delta \Phi$ výstupním parametrem z funkce zmena_01 / zmena_02.

V závěru funkce civka_01 / civka_02 je vypočítáno indukované napětí dle indukčního zákona (vztah 3.18), kde N je počet závitů cívky.

$$u = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad [V] \quad (3.18)$$

Výsledkem je vektor s hodnotami napětí pro každou oblast, ve které cívka kmitá. Pomocí funkce maxim_01 / maxim_02 je v těchto vektorech nalezena maximální hodnota napětí U_{max} . Ta se nachází uprostřed kmitu, tedy tam, kde má kmit nejvyšší rychlost. Jedná se o stejný případ jako např. u pohybu kyvadla. K hodnotě U_{max} je přiřazena hodnota odpovídající polohy. Když je výpočet hodnoty napětí U_{max} a polohy proveden ve všech posunujících se oblastech, je získána závislost indukovaného napětí na vzájemné poloze cívky a magnetu.

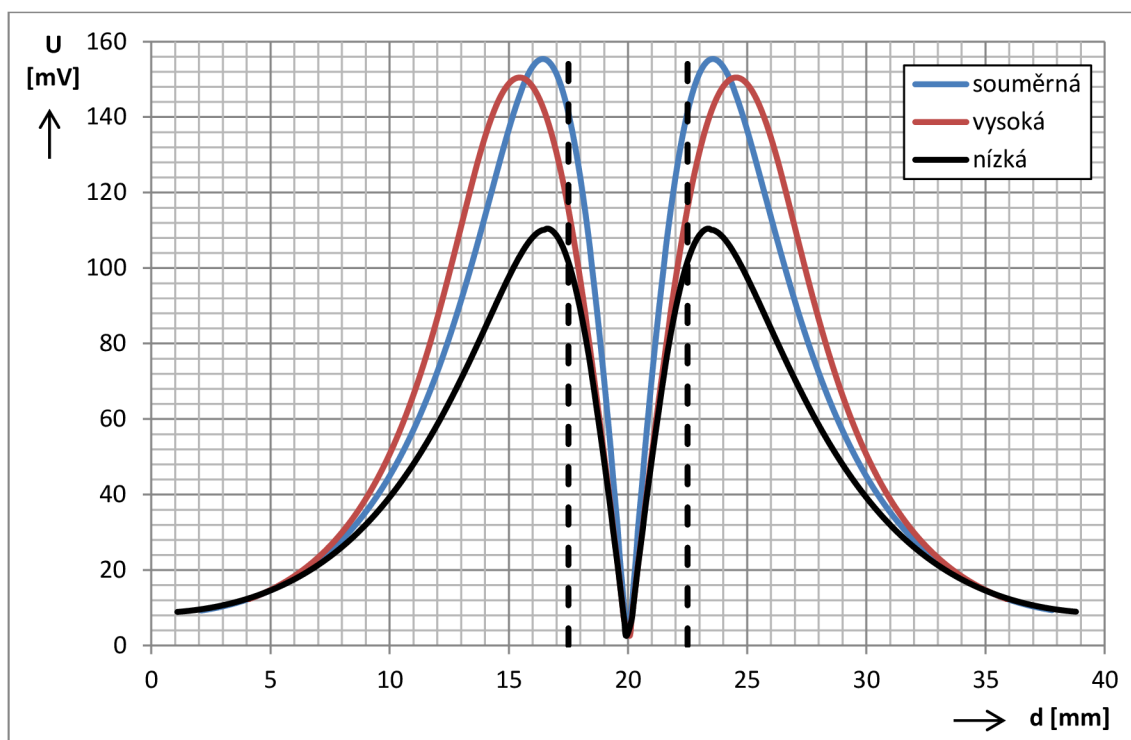
3.1.2.3 Výsledky výpočtů

Přestože je možné v programu Matlab zobrazovat nejrůznější druhy grafů, byly vypočítané hodnoty převedeny, pomocí naprogramované funkce uloz, do programu MS Excel a až zde byly vytvořeny odpovídající grafy a příslušné tabulky s hodnotami.

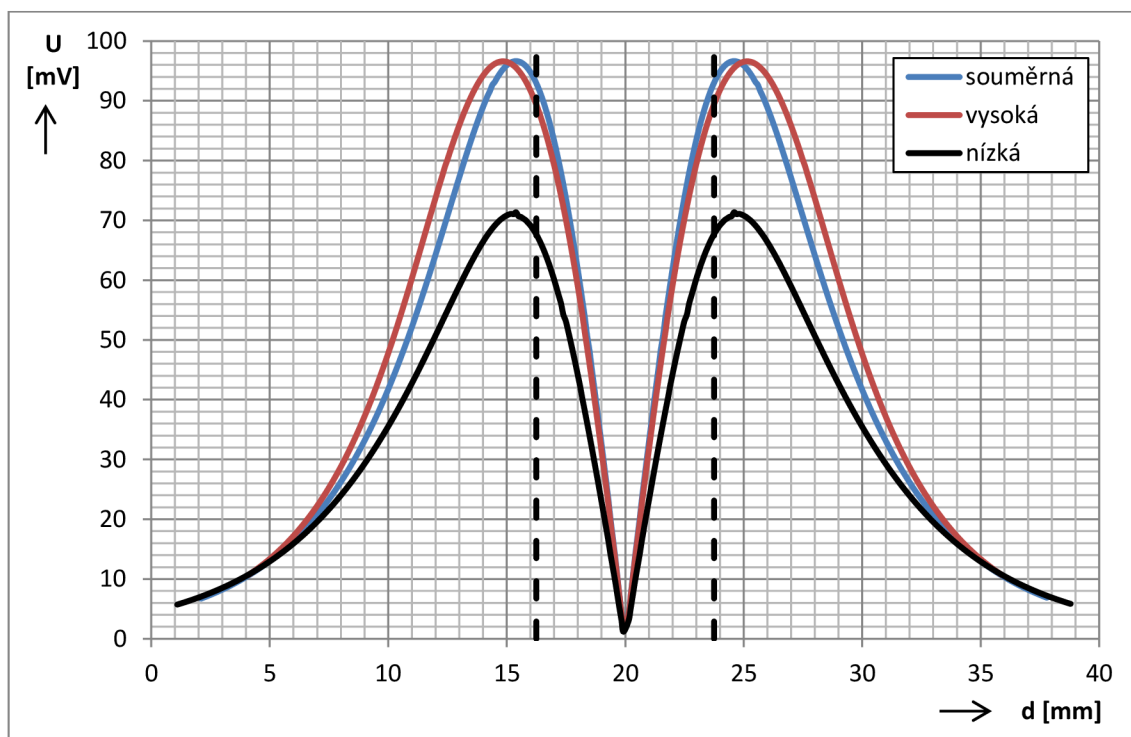
Pro každý magnet bylo vypočítáno indukované napětí při třech různých cívkách. První cívka, s označením „souměrná“, s rozměry vinutí $4 \times 4 \text{ mm}$, druhá cívka, s označením „vysoká“, s rozměry vinutí $2 \times 8 \text{ mm}$ a třetí cívka, s označením „nízká“, s rozměry vinutí $8 \times 2 \text{ mm}$. Rozměry jsou uváděny v pořadí šířka x výška. Všechny tři cívky tak měly stejnou plochu vinutí. Parametry cívek zadávaných do programu odpovídají parametrům skutečných cívek, které byly vyrobeny a používány při laboratorním experimentu. Jejich podrobnější popis je uveden níže, v praktické části. V závislosti na výšce cívky trval celkový výpočet indukovaného napětí cca 1 až 2 minuty.

Graf č. 4 zobrazuje závislost indukovaného napětí do cívky pro široký magnet a všechny tři cívky. V grafu č. 5 je tatáž závislost, ale tentokrát pro magnet úzký.

Graf 4: Závislosti indukovaných napětí v cívkách na vzájemné poloze cívek a širokého magnetu



Graf 5: Závislosti indukovaných napětí v cívkách na vzájemné poloze cívek a úzkého magnetu

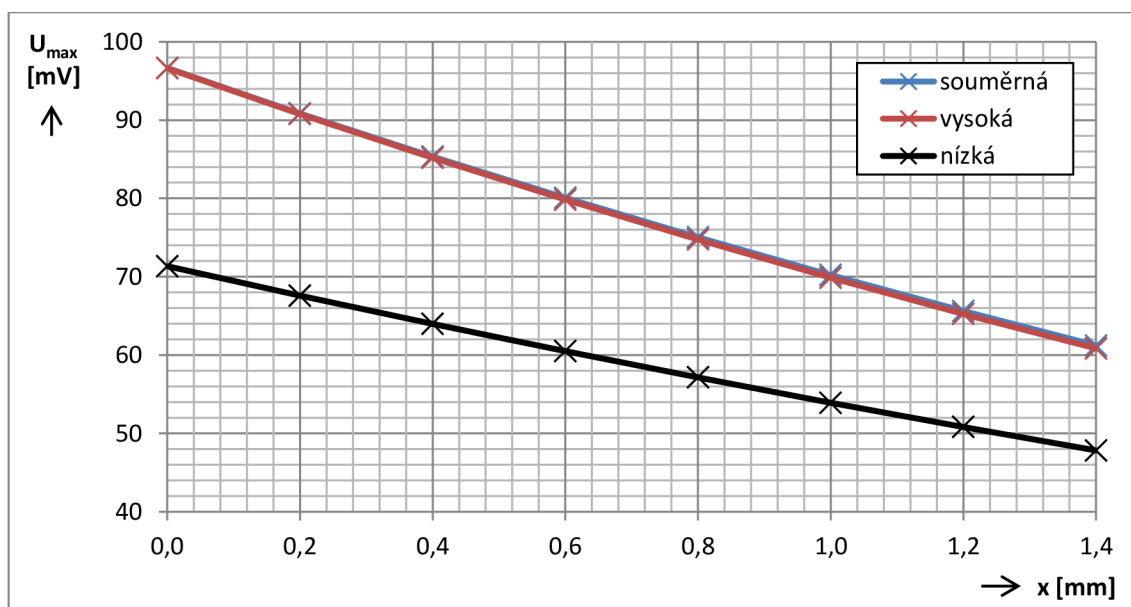


Z grafů č. 4 a 5 je vidět, že větší napětí se do cívek indukuje při použití širokého magnetu, což nakonec není nic překvapivého, neboť použitím širokého magnetu vznikne uvnitř cívky mnohem menší vzduchová mezera, než při použití magnetu úzkého. Dále lze vyčíst, že jako nejvýhodnější se jeví použití souměrné cívky, jelikož v ní indukované napětí má, při použití obou magnetů, nejvyšší amplitudu. Nicméně vhodné je i použití cívky vysoké, neboť její maximální amplituda je jen o něco málo menší, řádově o jednotky milivoltů, než u cívky souměrné. Naopak nevhodné je použití cívky nízké, jejíž maximální amplituda je téměř o 50 % nižší než u zbývajících dvou cívek.

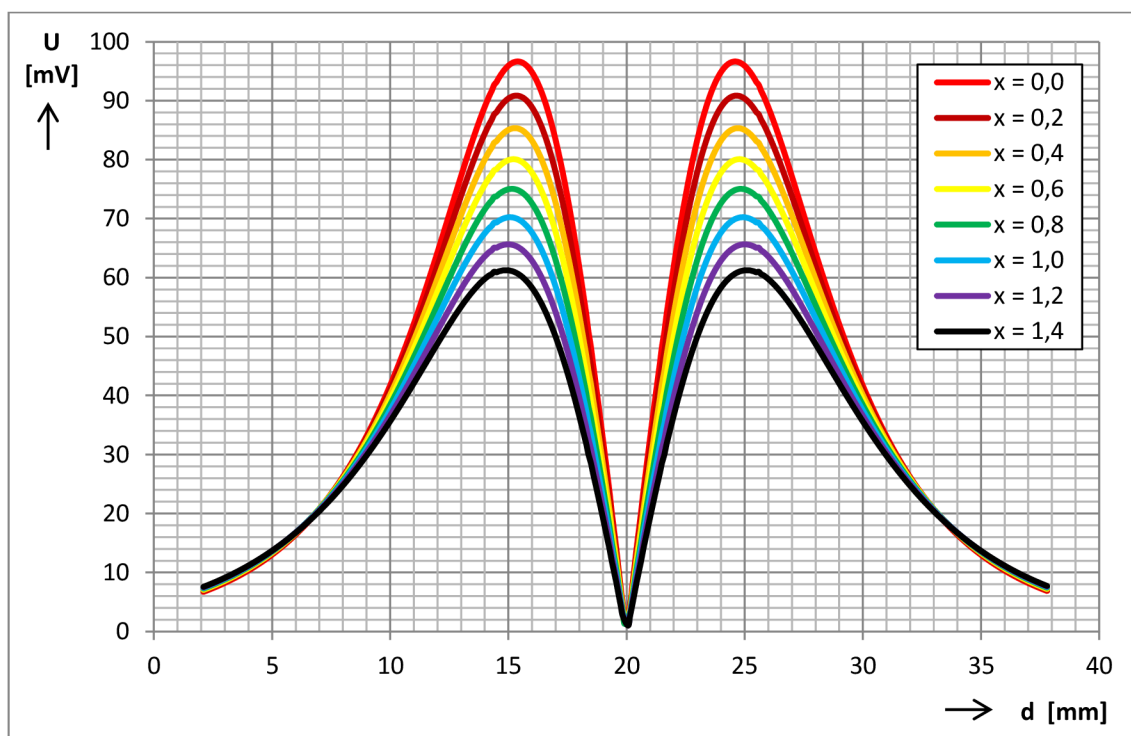
Stejně jako v grafu č. 3 je i v grafech č. 4 a 5 vyznačena horní a spodní (severní a jižní) hrana magnetu. Hrany jsou vyznačeny černými, čárkovanými čarami. Je vidět, že maximální hodnoty napětí se v cívkách indukují při obou hranách magnetu, zatímco když se střed vinutí cívky nachází na úrovni středu magnetu, je hodnota indukovaného napětí nejnižší. Důvodem je, jak ukazuje graf č. 3, že při hranách magnetu je změna magnetického indukčního toku největší, zatímco v jeho středu je velikost změny velmi malá. Zajímavostí je, že čím je cívka vyšší, tím dále od hran magnetu leží místo s maximální hodnotou indukovaného napětí.

Grafy č. 4 a 5 zobrazují závislosti indukovaných napětí na vzájemné poloze cívek a magnetů v případě, že magnety a cívky jsou souosé. Výpočet tak simuluje magnet, který je zasouván přesně do středu cívky a jeho horizontální posun je nulový. V grafu č. 6 jsou zobrazeny závislosti maximálních hodnot indukovaných napětí na velikosti vzájemného horizontálního posunu cívek a úzkého magnetu. Z nich lze vyčíst, že s rostoucím posunem velikost maximálního indukovaného napětí v cívce téměř lineárně klesá. Pro ilustraci je uveden graf č. 7 s průběhy indukovaných napětí pro různé velikosti horizontálního posunu pro souměrnou cívku a úzký magnet.

Graf 6: Závislosti maximálních napětí indukovaných v cívkách na velikosti horizontálního posunu



Graf 7: Průběhy indukovaných napětí v souměrné cívce pro různé hodnoty horizontálního posunu

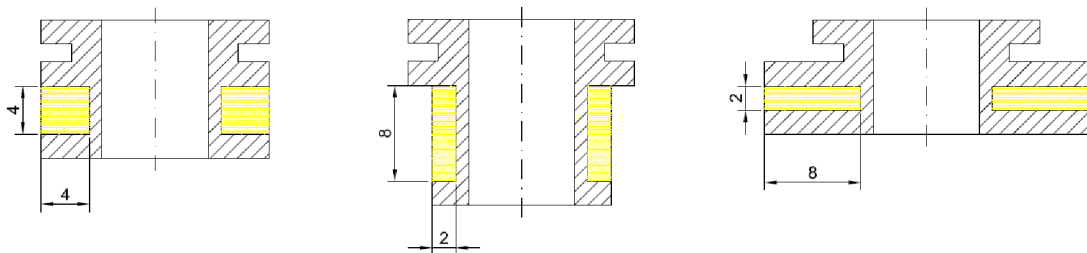


3.2 Měření

Měření v laboratoři bylo rozděleno do několika samostatných úkolů, a to hledání optimálního tvaru vinutí cívky, určování výrobních tolerancí a měření magnetických vlastností daných magnetů.

3.2.1 Snímací cívky

Pro měření byly vyrobeny tři cívky, jejichž vinutí mělo shodnou velikost plochy, ale jiné poměry stran. Cívky byly pro lepší orientaci označeny slovními názvy, a to „souměrná“, „vysoká“ a „nízká“. Souměrná cívka s rozměry vinutí $4 \times 4 \text{ mm}$, vysoká s rozměry vinutí $2 \times 8 \text{ mm}$ a nízká s rozměry vinutí $8 \times 2 \text{ mm}$. Rozměry jsou uvedeny v pořadí šířka \times výška. Zjednodušený náčrt všech cívek spolu s rozměry vinutí (vyznačeno žlutě) je zobrazen na obrázku č. 23, skutečné provedení pak na obrázku č. 24. Vinutí všech cívek je tvořeno měděným drátem o průměru $0,16 \text{ mm}$. Aby nedošlo k případnému poškození, bylo vinutí oblepeno lepicí páskou.



Obrázek 23: Schématický náčrt cívek (zleva: souměrná, vysoká, nízká)



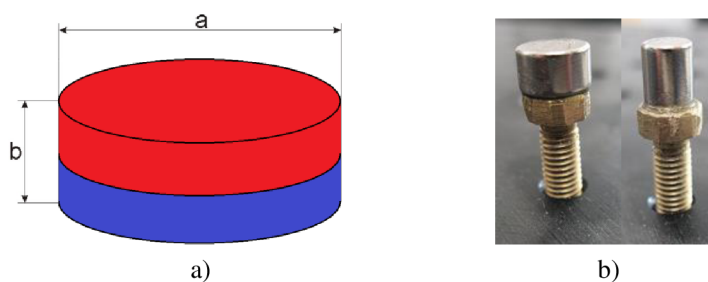
Obrázek 24: Skutečné provedení cívek (zleva: souměrná, vysoká, nízká)

3.2.2 Permanentní magnety

K měření v laboratoři byly dále používány dva permanentní magnety ve tvaru válce. Jeden s označením „široký“ o rozměrech $8,5 \times 5,0 \text{ mm}$ a druhý s označením „úzký“ o rozměrech $6,0 \times 7,5 \text{ mm}$. Rozměry jsou uvedené v pořadí průměr \times výška. Magnetické a geometrické vlastnosti obou používaných magnetů jsou uvedeny v tabulce č. 4, způsob magnetování je zobrazen na obrázku č. 25a, kde červeně je označen severní pól magnetu a modře pól jižní. Magnety byly pomocí dvousložkového epoxidového lepidla připevněny na mosazné šrouby (obrázek č. 25b).

Tabulka 4: Geometrické a magnetické vlastnosti používaných magnetů (fy Magsy, s.r.o)

magnet	široký	úzký
Průměr (a) [mm]	8,5	6,0
Výška (b) [mm]	5,0	7,5
Hmotnost [g]	2,12	1,59
Povrchová úprava	Nikl	Nikl
Materiál	NdFeB	NdFeB
Remanence B_r [mT]	1320 – 1380	1170 – 1210
Koercivita H_{CB} [kA/m]	879 – 969	876 – 969
Vnitřní koercivita H_{CI} [kA/m]	≥ 876	≥ 955
Max. energetický součin BH_{max} [kJ/m ³]	334 – 358	263 – 286
Odrhová síla [N]	25,6	13,0
Teplotní odolnost [°C]	80	80



Obrázek 25: a) způsob magnetování, b) magnety připevněné na mosazných šroubech

3.2.3 Úkol č. 1 - optimální tvar vinutí cívky

3.2.3.1 Zadání úkolu

Cílem úkolu bylo zjistit, jaký je optimální tvar vinutí cívky, tedy při jakém tvaru vinutí bude mít indukované napětí největší amplitudu. Z teoretických závěrů lze předpokládat, že lepší výsledky by měly podávat cívky s větší výškou a menší šířkou vinutí, protože v blízkosti magnetu jsou hodnoty magnetické indukce nejvyšší.

3.2.3.2 Seznam použitých přístrojů

Tabulka 5: Seznam přístrojů k úkolu č. 1

přístroj	typ	sériové číslo
Digitální osciloskop	Hameg HMO 1024	013973105
Digitální multimetr (V)	Agilent 34410A	MY47001058
Digitální multimetr (A)	Agilent 34401A	MY44002642
Funkční generátor	Agilent 33220A	MY44024413
Výkonový zesilovač	Tira Type BAA 120	B120E02A04K219
Mikroposuv (2x)	Standa 8MT167-100C28	-
Kontroler pro mikroposuvy	8SMC1-USBhF-B2	-
Vibrační stolek	Brüel&Kjaer 4809	2633166
Optický vibrometr	Polytec PDV-100	0173415
Posuvné měřítko	Mitako	-

3.2.3.3 Postup měření

K měření byla použita měřicí aparatura, jejíž schématický náčrt je na obrázku č. 26. Aparatura je tvořena dvěma elektrickými mikroposuvy pro vertikální a horizontální posun, vibračním stolem, optickým vibrometrem, digitálním osciloskopem, funkčním generátorem a dvěma multimetry.

Na generátoru jsem zvolil výstupní signál o frekvenci $f = 150 \text{ Hz}$ a amplitudě $U_{pp} = 400 \text{ mV}$. Signál je přiveden na vstup výkonového zesilovače. Nastavení zesílení jsem provedl na základě měření s optickým vibrometrem dle požadované výchylky kmitů, a to dle následujícího postupu.

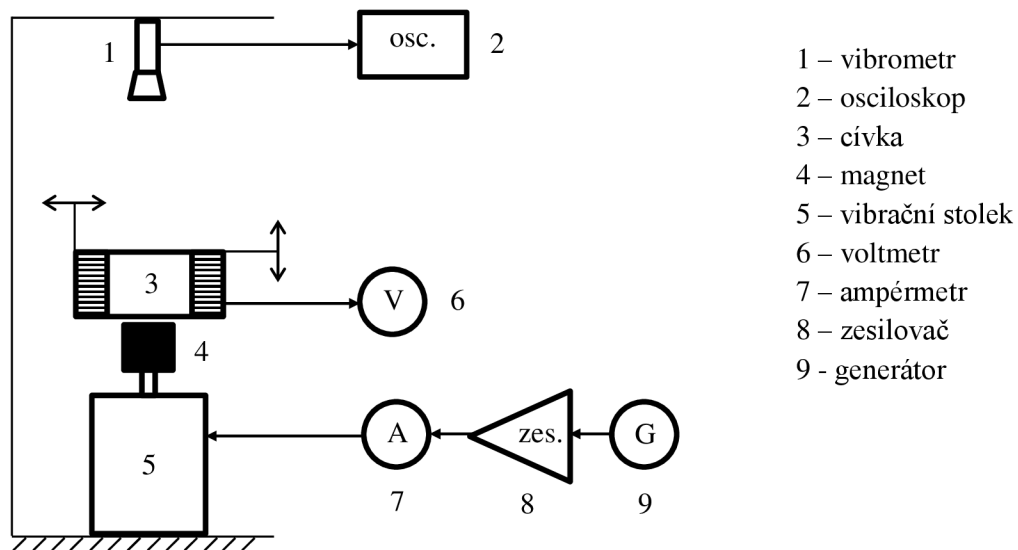
Signál ze zesilovače jsem nejprve zesílil na zvolenou hodnotu $I = 0,5 \text{ A}$ a přivedl ho do vibračního stolu, ve kterém je upevněn magnet. Z vibrometru umístěného nad vibračním stolem jsem získal napěťový signál odpovídající rychlosti kmitání magnetu. Pomocí osciloskopu jsem odečetl jeho velikost $U_{pp} = 1,5 \text{ V}$. Protože byl vibrometr nastaven na rozsah 500 mm/s je nutné, dle údajů výrobce, použít korekční faktor $k = 125 \text{ (mm/s)/V}$. Pro impedanční přizpůsobení je nutné tento faktor vydělit dvěma.

Vynásobíme-li napětí U_{pp} , odečtené z osciloskopu, upraveným korekčním faktorem k , získáme rychlost kmitání v . Jejím vydělením úhlovou rychlostí ω získáme výchylku vibračního stolku y . Výsledný vztah tedy je

$$y = \frac{U_{pp} \cdot k}{\omega} = \frac{U_{pp} \cdot k}{2\pi f} \text{ [mm]} \quad (3.19)$$

kde f je frekvence signálu z funkčního generátoru. Po dosažení jsem získal hodnotu výchylky $y = 0,995 \text{ mm}$, která je však cca o polovinu menší, než námi požadovaná výchylka. Vyjádřením U_{pp} ze vztahu 3.19 získáme vztah 3.20, ze kterého po dosažení požadované výchylky $y = 0,2 \text{ mm}$ a dalších neznámých získáme výstupní napětí vibrometru, které bylo určeno na hodnotu $U_{pp} = 3,016 \text{ V}$.

$$U_{pp} = \frac{y \cdot 2\pi f}{k} \text{ [V]} \quad (3.20)$$



Obrázek 26: Schematický náčrt měřicí aparatury pro úkol č. 1

Následně jsem zvyšoval zesílení na zesilovači, dokud výstupní signál vibrometru nebyl roven vypočítané hodnotě napětí. Konečná hodnota výstupního proudu ze zesilovače byla $I = 0,978 \text{ A}$. Po tomto nastavení jsem již mohl přejít k samotnému měření indukovaného napětí.

K nosníku s mikroposuvy, kde jeden sloužil k vertikálnímu a druhý k horizontálnímu posunu, jsem pomocí vyrobeného držáku připevnil cívku. Pod ní jsem umístil široký magnet, upevněný ve vibračním stolku, tak, aby osa magnetu byla shodná s osou cívky a bylo tak možné magnet do cívky zasunovat. Nastavování souososti

magnetu a cívky bylo až překvapivě obtížné a vyžadovalo hodně času a trpělivosti. Ke kontrole a nastavování souososti jsem používal posuvné měřítko.

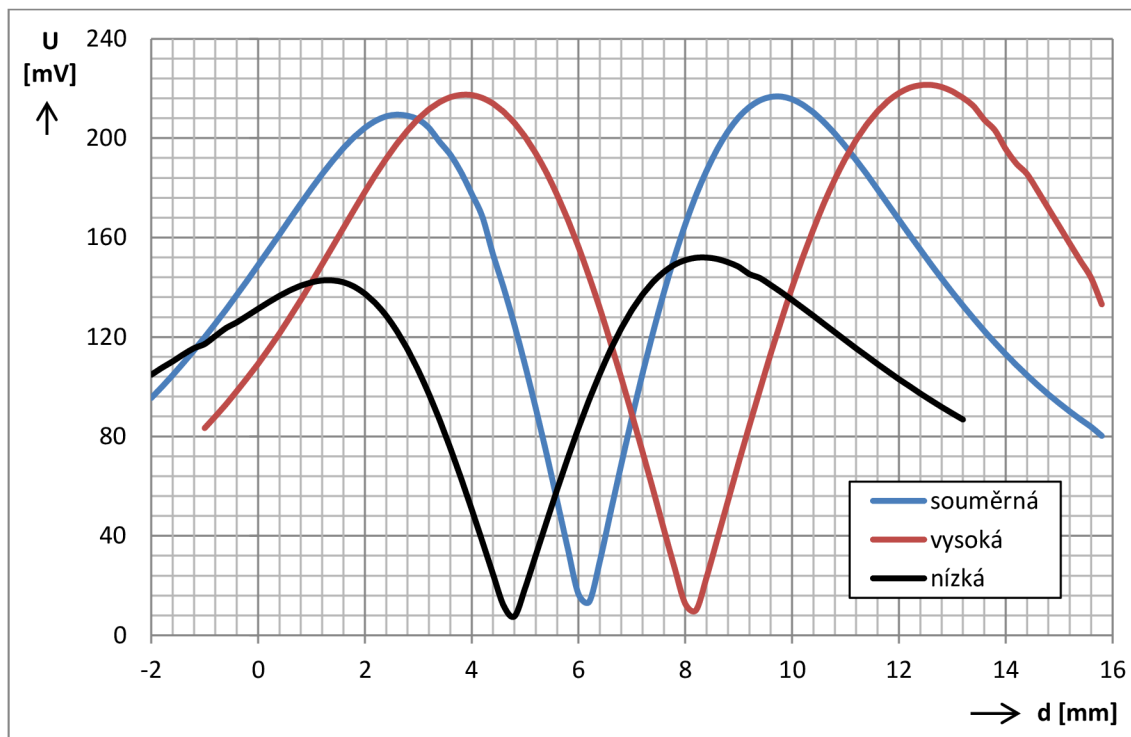
Po nastavení souososti jsem zvolil počáteční (nulovou) polohu měření, která odpovídala vzájemné poloze cívky a magnetu, kdy horní hrana magnetu byla zároveň se spodním okrajem plastového těla cívky. Spuštěním generátoru začal magnet vibrovat v požadované výchylce a do cívky se začalo indukovat napětí, které jsem odečítal pomocí multimetru. Protože se hodnota napětí neustále nepatrně měnila, nastavil jsem na multimetru průměrování z posledních deseti vzorků vstupního signálu. Pomocí kontroléru a dodávaného softwaru k mikroposuvům jsem ovládal vertikální posuv, na kterém byla připevněna cívka. Po kroku 200 μm jsem posunoval cívku dolů – magnet se zasunoval do cívky a následně nahoru – magnet se od cívky vzdaloval. V každém kroku jsem odečítal indukované napětí v cívce. Totéž měření jsem opakoval pro další dvě cívky a následně opět se všemi cívkami, ale tentokrát za použití úzkého magnetu.

3.2.3.4 Výsledky

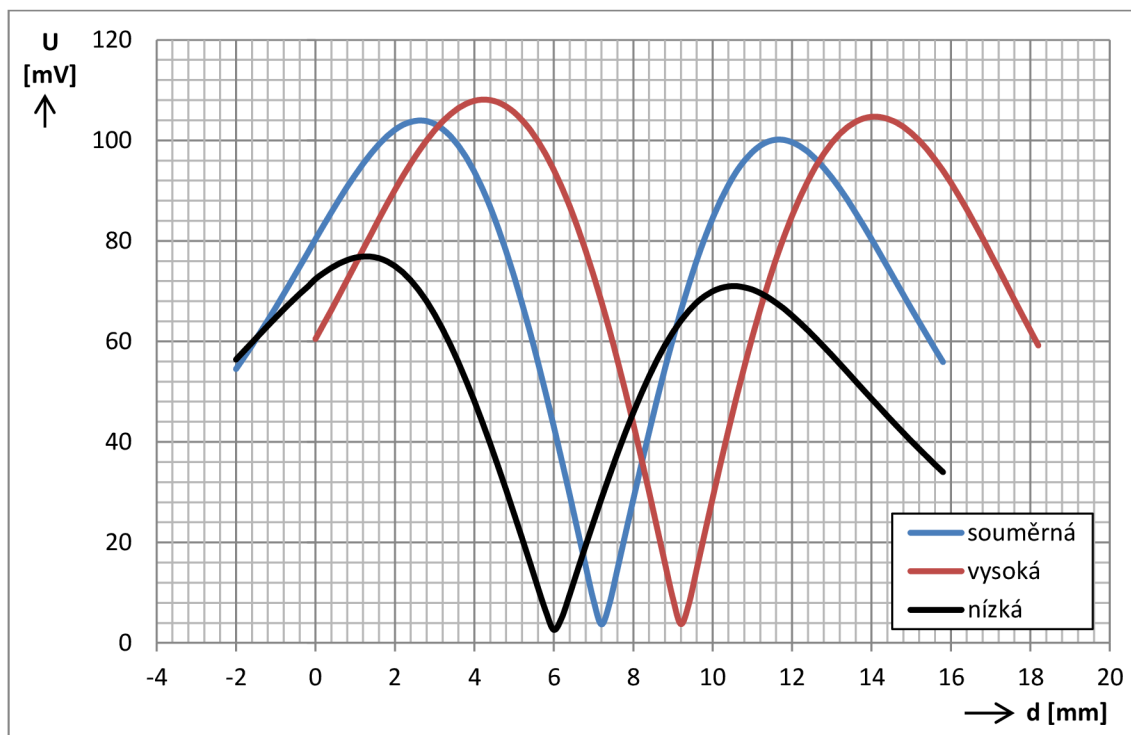
Vzhledem k množství naměřené hodnoty uvedeny v tabulce č. 9 v příloze A. Naměřené závislosti jsou uvedeny v grafech níže. Graf č. 8 zobrazuje závislosti indukovaných napětí do cívek na vzájemných polohách cívek a širokého magnetu, graf č. 9 zobrazuje tytéž závislosti, ale tentokrát pro úzký magnet. Z grafů je vidět, že největší napětí se indukují za použití širokého magnetu spolu s vysokou cívkou, nicméně tentýž magnet v kombinaci se souměrnou cívkou podává výsledek jen cca o 10 mV nižší. Široký magnet v kombinaci s nízkou cívkou vykazuje výsledky nižší přibližně o 70 mV oproti dvěma zbývajícím cívkám. V případě použití úzkého magnetu je poměr ve velikosti indukovaného napětí mezi průběhy jednotlivých cívek velmi podobný jako u širokého magnetu. Hodnoty jsou však v porovnání s širokým magnetem nižší cca o 50 %.

Z grafů č. 8 a 9 je dále vidět, že jednotlivé průběhy mají vždy dvě maxima a jedno minimum. Vzhledem k tomu, že počáteční poloha měření byla nastavována zvlášť pro každou cívku a magnet, jde o polohu relativní, a proto nejsou průběhy navzájem vycentrovány.

Graf 8: Závislosti indukovaných napětí v cívkách na vzájemné poloze cívek a širokého magnetu



Graf 9: Závislosti indukovaných napětí v cívkách na vzájemné poloze cívek a úzkého magnetu



3.2.4 Úkol č. 2 - určování výrobních tolerancí

3.2.4.1 Zadání

Úkolem bylo zjistit, jaké jsou povolené tolerance při výrobě snímací cívky a jaký vliv má na velikost indukovaného napětí v cívce vzájemné vyosení cívky a magnetu. Měření jsem provedl s použitím pouze dvou cívek, kterými byly cívky souměrná a vysoká. Zvolil jsem je, protože v předchozím úkolu se v nich indukovalo největší napětí. Dále jsem k měření použil jediný magnet, protože pouze úzký magnet umožňoval vzájemné vyosení cívky a magnetu.

3.2.4.2 Seznam použitých přístrojů

Tabulka 6: Seznam přístrojů k úkolu č. 2

přístroj	typ	sériové číslo
Digitální osciloskop	Hameg HMO 1024	013973105
Digitální multimetr (V)	Agilent 34410A	MY47001058
Digitální multimetr (A)	Agilent 34401A	MY44002642
Funkční generátor	Agilent 33220A	MY44024413
Výkonový zesilovač	Tira Type BAA 120	B120E02A04K219
Mikroposuv (2x)	Standa 8MT167-100C28	-
Kontroler pro mikroposuvy	8SMC1-USBhF-B2	-
Vibrační stolek	Brüel&Kjaer 4809	2633166
Optický vibrometr	Polytec PDV-100	0173415
Posuvné měřítko	Mitako	-

3.2.4.3 Postup měření

K měření byla použita stejná měřicí aparatura jako v úkolu č. 1. K posuvům jsem opět upevnil cívku a nastavil ji souose s magnetem, umístěným pod ní, ve vibračním stolku. Místo nulové polohy jsem tentokrát zvolil takovou vzájemnou polohu, kdy se v předchozím úkolu v cívce indukovalo největší napětí. Tato poloha zůstala neměnná po celou dobu měření. Výstupní signál z generátoru a zesílení na zesilovači jsem nastavil stejně jako v úkolu č. 1.

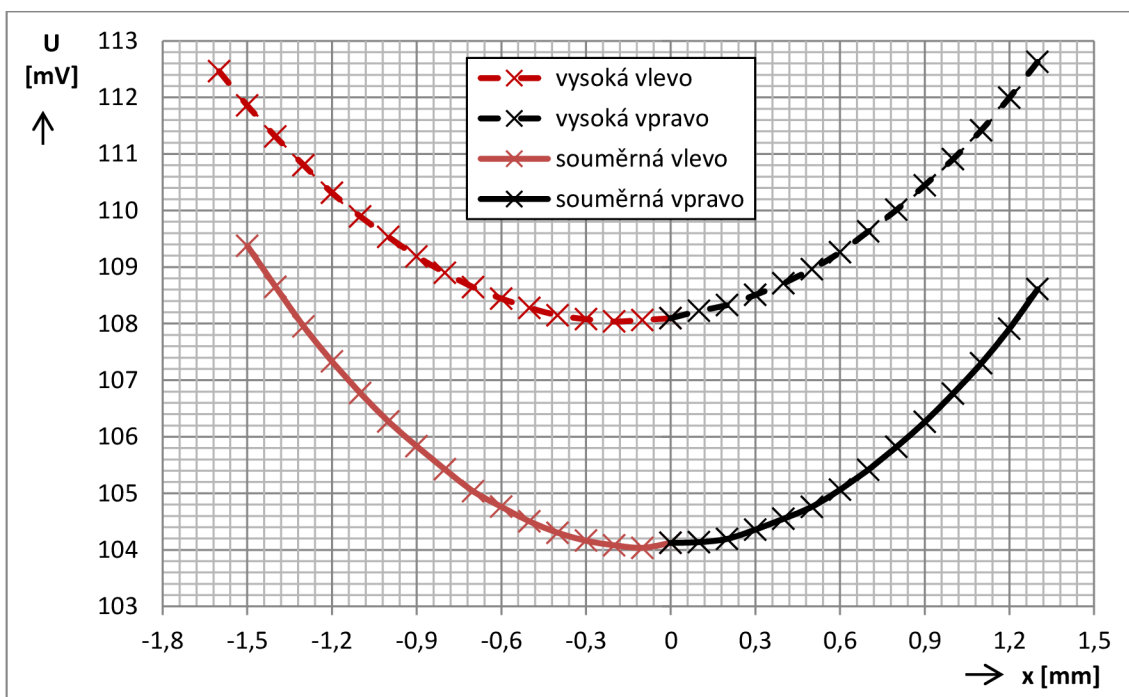
Pomocí horizontálního posuvu jsem po kroku $0,1\text{ mm}$ vychyloval cívku nejprve vlevo od počáteční polohy a následně vpravo, vždy dokud se magnet téměř nedotýkal těla cívky. V každém kroku jsem z digitálního multimetru odečítal hodnotu indukovaného napětí v cívce. Odečítaná hodnota byla opět průměrem z posledních 10 vzorků vstupního signálu do multimetru.

3.2.4.4 Výsledky

Naměřené hodnoty jsou vzhledem k množství opět uvedeny v příloze A, v tabulce č. 10. V grafu č. 10 jsou zobrazeny závislosti indukovaných napětí v cívkách na velikosti vzájemného horizontálního posunu souměrné a vysoké cívky vzhledem k úzkému magnetu. Je vidět, že s rostoucím posunem roste i velikost indukovaného napětí. Při velikosti posunu $x = 1,2 \text{ mm}$ je hodnota indukovaného napětí shodně u obou cívek cca o 3 mV větší v porovnání s hodnotou při nulovém posunu. To že průběhy nejsou symetrické podle nulové polohy $x = 0 \text{ mm}$ je způsobeno nepřesností při nastavování této polohy.

Z grafu č. 10 je patrné, že pokud cívka nebude umístěna přesně v ose magnetu, bude se v ní indukovat dokonce větší napětí, než kdyby byla přesnost dodržena. Nedodržení souososti se tak vlastně neprojeví negativně, ale naopak se jako výhodnější jeví realizovat vyosení magnetu úmyslně. I přes tyto závěry je nicméně nejlepším řešením použití takového magnetu, jehož průměr je téměř roven průměru vzduchové mezery cívky. Tím bude dosaženo maximální hodnoty indukovaného napětí. Určitá vzduchová mezera však musí být přítomna vždy, aby nedošlo ke kontaktu cívky a magnetu.

Graf 10: Závislost indukovaného napětí na velikosti posuvu pro souměrnou a vysokou cívku



3.2.5 Úkol č. 3 – měření magnetických vlastností magnetů

3.2.5.1 Zadání

Zadáním úkolu bylo změřit magnetické vlastnosti magnetů, konkrétně změřit velikost magnetické indukce pomocí gaussmetru (magnetometru). Toto měření se v praxi provádí za účelem kontroly kvality magnetu, kdy mohou být odhaleny mikroskopické trhliny a bubliny, které vznikly při výrobě magnetu. V závislosti na nich se pak může magnetická indukce při povrchu magnetu významně měnit.

3.2.5.2 Seznam použitých přístrojů

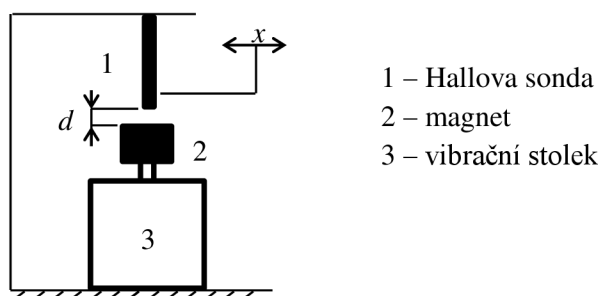
Tabulka 7: Seznam přístrojů k úkolu č. 3

přístroj	Typ	sériové číslo
Mikroposuv (2x)	Standa 8MT167-100C28	-
Kontroler pro mikroposuvy	8SMC1-USBhF-B2	-
Vibrační stolek	Brüel&Kjaer 4809	2633166
Hallová sonda	Gauss/Tesla metr 5070	9927439
Posuvné měřítko	Mitako	-

3.2.5.3 Postup měření

Sada pro měření se skládala z gaussmetru, dvou Hallových sond a vyhodnocovací jednotky s displejem. Jedna sonda byla určena pro měření magnetické indukce ve vertikálním a druhá pro měření v horizontálním směru. Vzhledem k tomu, že k indukci napětí do cívky je nutná složka magnetické indukce kolmá na rovinu vinutí, měřil jsem pouze magnetickou indukci působící ve vertikálním směru.

Měření jsem prováděl s částečně obměněnou aparaturou z úkolů č. 1 a 2. Její schématický náčrt je na obrázku č. 27. Do mikroposuvu jsem místo cívky uchytil Hallovu sondu (dále jen sonda) souose s magnetem upevněným ve vibračním stolku. V tomto měření sloužil vibrační stolek pouze jako nosič magnetu. Velikost mezery d mezi sondou a povrchem magnetu jsem pomocí posuvného měřítka nastavil na $0,5\text{ mm}$.



Obrázek 27: Schématický náčrt měřicí aparatury pro úkol č. 3.

Měření jsem prováděl posunováním sondy v horizontálním směru s krokem $0,1\text{ mm}$ až do vzdálenosti 2 mm od nulové, souosé, polohy. V každém kroku jsem z displeje gaussmetru odečítal hodnotu magnetické indukce. Sondu jsem vychyloval nejprve vlevo a následně vpravo. Celé měření jsem uskutečnil pro magnet široký i úzký.

3.2.5.4 Výsledky

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 8. Aby bylo možné lepší zobrazení naměřených závislostí v grafech, jsou hodnoty polohy pro posun vlevo uváděny se záporným znaménkem.

Tabulka 8: Naměřené hodnoty vertikální složky magnetické indukce B pro úzký a široký magnet.

úzký magnet				široký magnet			
vlevo		vpravo		vlevo		vpravo	
výchylka [mm]	indukce [mT]	výchylka [mm]	indukce [mT]	výchylka [mm]	indukce [mT]	výchylka [mm]	indukce [mT]
0,0	-343	0,0	-343	0,0	336	0,0	336
-0,1	-342	0,1	-343	-0,1	336	0,1	336
-0,2	-342	0,2	-343	-0,2	336	0,2	336
-0,3	-340	0,3	-343	-0,3	336	0,3	336
-0,4	-339	0,4	-343	-0,4	335	0,4	336
-0,5	-336	0,5	-342	-0,5	335	0,5	336
-0,6	-335	0,6	-340	-0,6	333	0,6	335
-0,7	-332	0,7	-339	-0,7	332	0,7	335
-0,8	-328	0,8	-338	-0,8	332	0,8	333
-0,9	-324	0,9	-336	-0,9	331	0,9	333
-1,0	-320	1,0	-334	-1,0	329	1,0	333
-1,1	-316	1,1	-332	-1,1	328	1,1	332
-1,2	-311	1,2	-330	-1,2	325	1,2	331
-1,3	-312	1,3	-325	-1,3	324	1,3	329
-1,4	-301	1,4	-323	-1,4	321	1,4	328
-1,5	-294	1,5	-319	-1,5	318	1,5	327
-1,6	-285	1,6	-315	-1,6	316	1,6	325
-1,7	-275	1,7	-309	-1,7	313	1,7	324
-1,8	-265	1,8	-304	-1,8	310	1,8	322
-1,9	-253	1,9	-299	-1,9	306	1,9	320
-2,0	-241	2,0	-296	-2,0	302	2,0	318

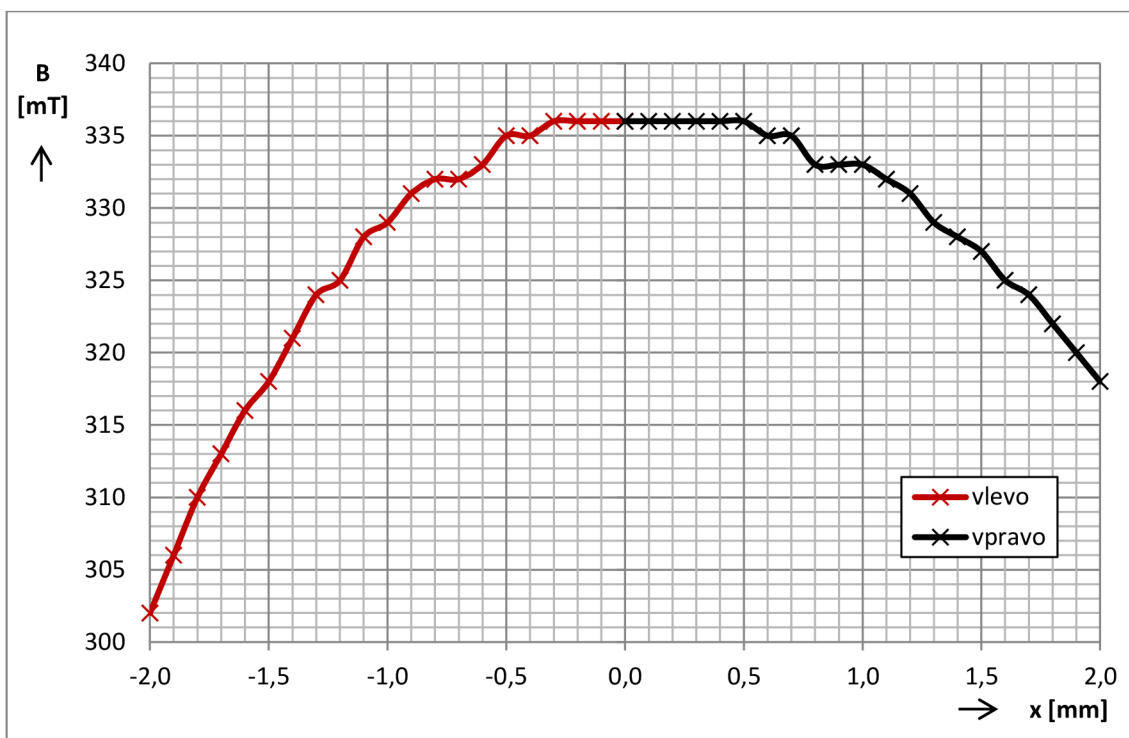
V grafech č. 11 a 12 jsou zobrazeny závislosti měřené magnetické indukce na horizontálním posunu sondy od nulové polohy pro úzký a široký magnet. Je vidět, že obě křivky mají parabolický tvar a jsou si velmi podobné, nicméně zatímco křivka pro široký magnet (graf č. 11) připomíná parabolu konkávní, křivka pro úzký magnet (graf č. 12) připomíná parabolu konvexní. Tento rozdíl je způsoben tím, že magnety jsou k mosazným šroubům přilepeny opačně. Z obrázku č. 2 v kapitole 2.2.2 je patrné, že kladný směr magnetické indukce je vždy od jižního pólu magnetu k severnímu. Z toho lze usoudit, že úzký magnet je ke šroubu přilepen severním pólem a široký magnet pólem jižním. Při měřeném povrchu mají tedy magnety opačný směr magnetické indukce.

U obou magnetů byla naměřena maximální hodnota indukce při nulové, souosé poloze. S rostoucí odchylkou hodnota indukce klesá. Větší pokles, přibližně 100 mT , byl naměřen u úzkého magnetu, ve srovnání s použitím širokého magnetu, kdy byl pokles jen cca 34 mT . V průběhu pro široký magnet je dále vidět výrazná oblast, v okolí nulové polohy, kde se velikost magnetické indukce nemění. To je způsobeno pravděpodobně právě větším průměrem magnetu, kdy od vertikální osy magnetu do určité vzdálenosti je magnetické pole homogenní.

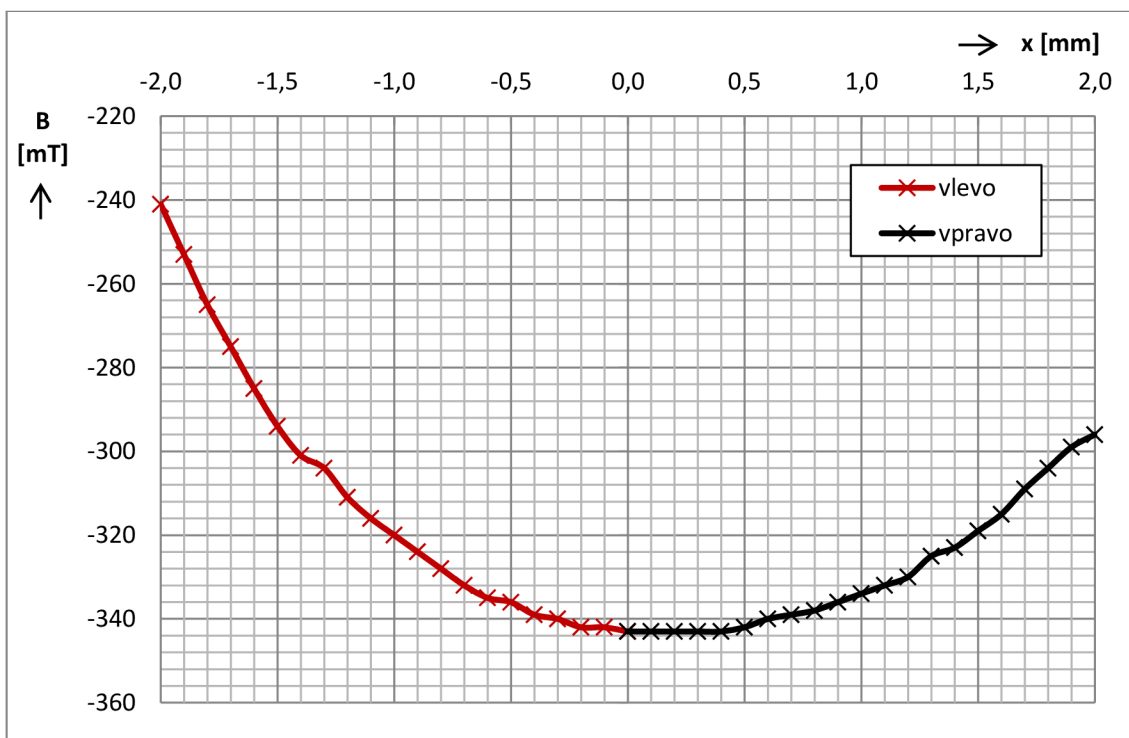
Křivky obou magnetů nejsou naprosto souměrné podle osy y . To může být následkem ne zcela přesně nastavenou souosostí mezi sondou a konkrétním magnetem. Souosost jsem nastavoval pomocí posuvného měřítka.

Naměřené hodnoty magnetické indukce mohou být dále zkresleny vlivem vlastní velikosti sondy. Průměr sondy, udávaný výrobcem, je $d_s = 4,8 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, Průměr samotné snímací plochy o velikosti $S_p = 0,4 \text{ mm}^2$ je $d_p = 0,3568 \text{ mm}$. Hodnoty magnetické indukce měřené pomocí sondy jsou průměrem všech hodnot vstupujících do plochy sondy S_p . Pokud by byl průměr magnetu mnohonásobně větší než průměr sondy, mohli bychom průměr sondy zanedbat. V našem případě je ale průměr sondy menší jen přibližně o $3,6 \text{ mm}$ ve srovnání se širokým magnetem, v případě úzkého magnetu dokonce pouze o přibližně $1,1 \text{ mm}$. Proto musíme určitou nepřesnost uvažovat.

Graf 11: Závislost magnetické indukce B na vzájemném horizontálním posunu Hallovy sondy a širokého magnetu



Graf 12: Závislost magnetické indukce B na vzájemném horizontálním posunu Hallovy sondy a úzkého magnetu



3.3 Srovnání výsledků simulace a měření

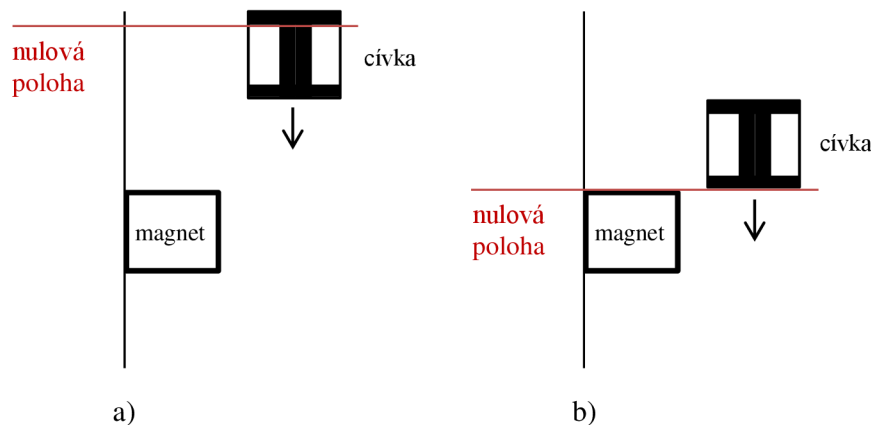
Následující kapitola obsahuje srovnání výsledků simulace a měření. Je rozdělena na tři podkapitoly na základě úkolů prováděných v praktické části této práce.

3.3.1 Srovnání indukovaných napětí

Aby mohly být vypočítané a naměřené závislosti indukovaného napětí v cívkách navzájem lépe porovnány, bylo nutné sesouhlasit počáteční (nulové) vzájemné polohy cívek a magnetů při měření a simulaci. Úprava spočívala v přepočítání souřadnicových bodů ze simulace. Rozdílné počáteční polohy simulace a měření jsou zobrazeny na obrázku č. 28.

Další potřebnou úpravou byl přepočet napětí. Zatímco výstupem simulace byla maximální hodnota napětí U_{max} , výstupem měření byla efektivní hodnota napětí U_{ef} . Zvolil jsem přepočet měřené hodnoty dle vztahu 3.21.

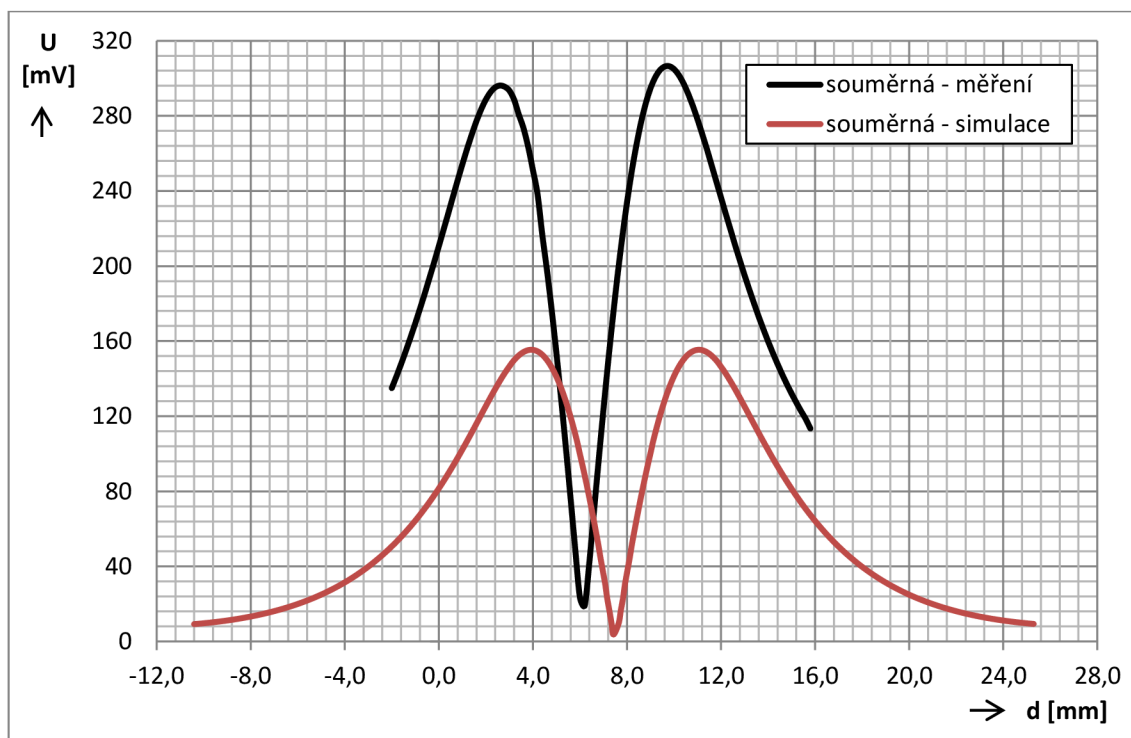
$$U_{max} = U_{ef} \cdot \sqrt{2} \quad [V] \quad (3.21)$$



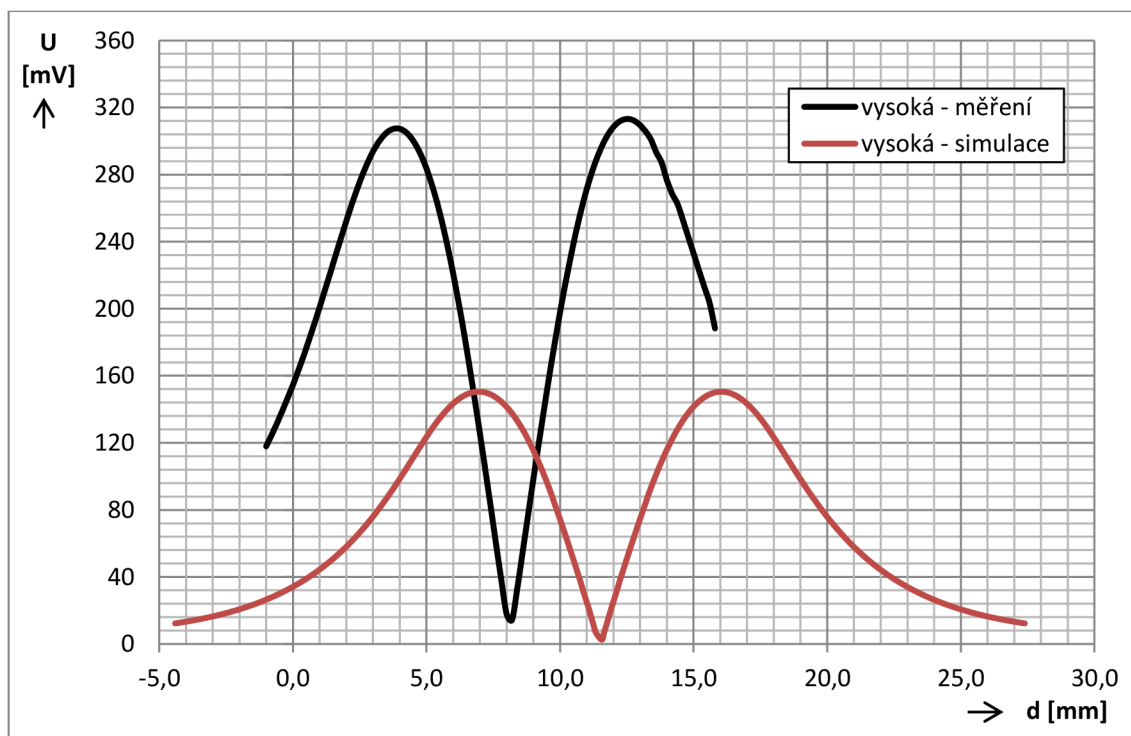
Obrázek 28: Vzájemná počáteční poloha cívky a magnetu – a) simulace, b) měření

V grafech č. 13, 14 a 15 je postupně zobrazeno srovnání vypočítaného a naměřeného indukovaného napětí pro cívky souměrnou, vysokou a nízkou při použití širokého magnetu. V grafech č. 16, 17 a 18 jsou zobrazeny tytéž závislosti, tentokrát při použití úzkého magnetu.

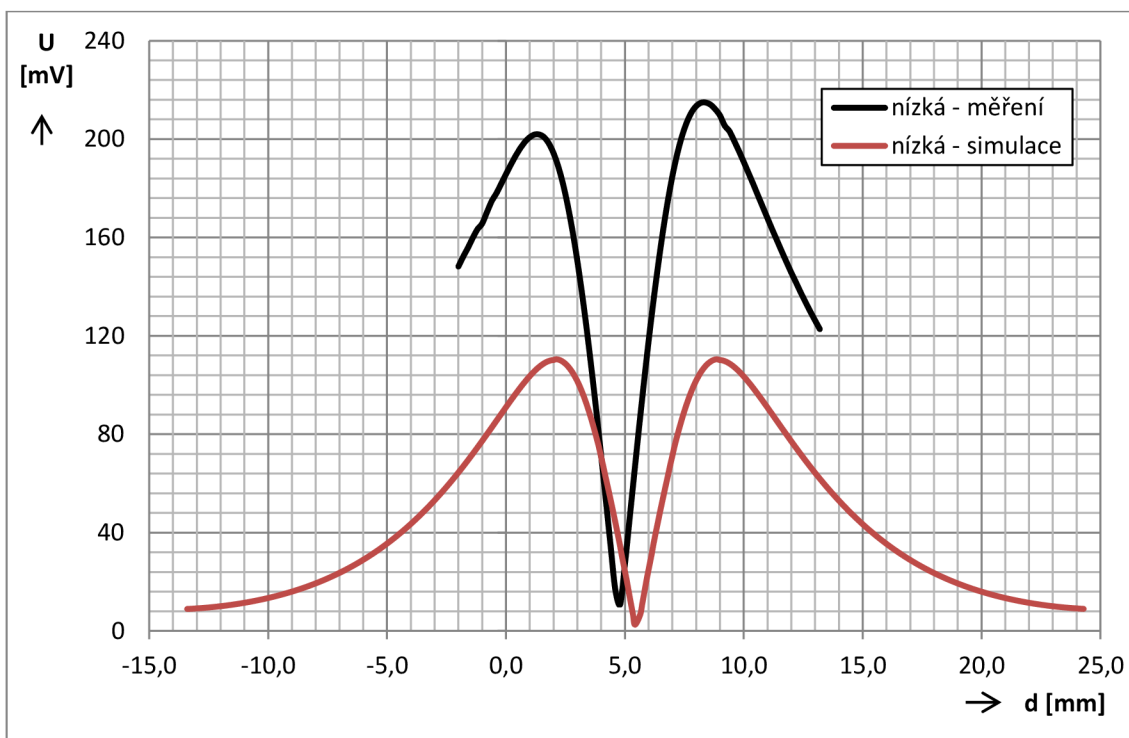
Graf 13: Závislost naměřeného a vypočítaného napětí indukovaného v souměrné cívce při použití širokého magnetu



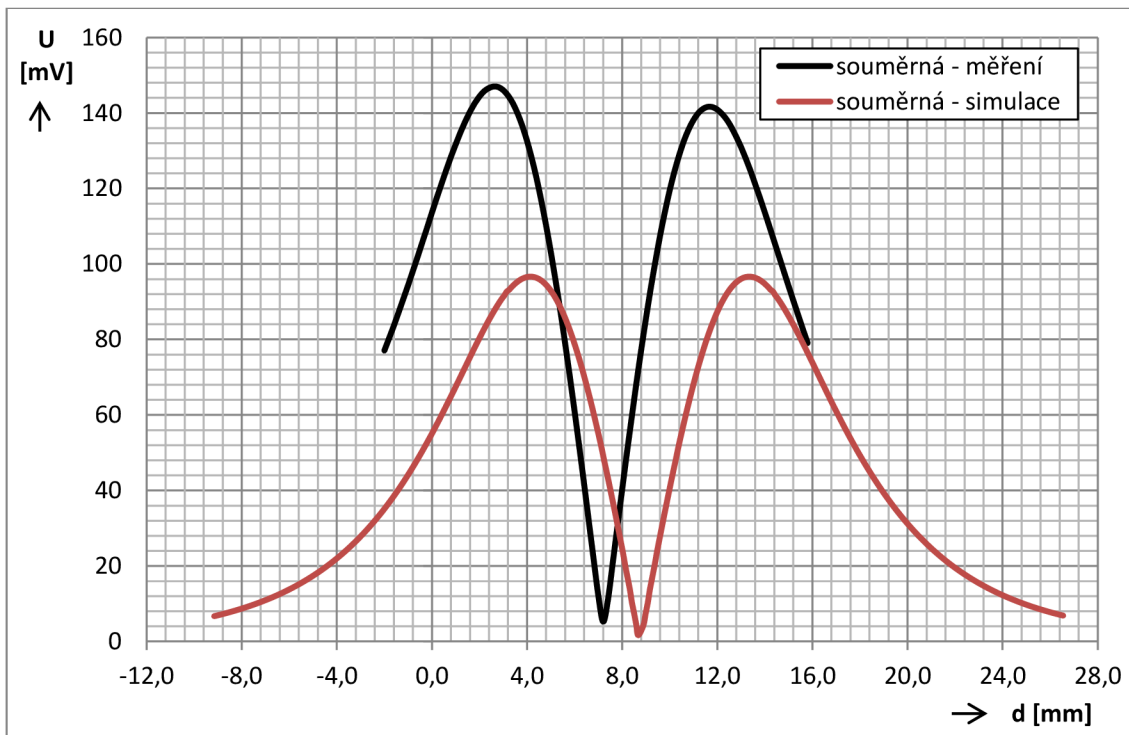
Graf 14: Závislost naměřeného a vypočítaného napětí indukovaného ve vysoké cívce při použití širokého magnetu



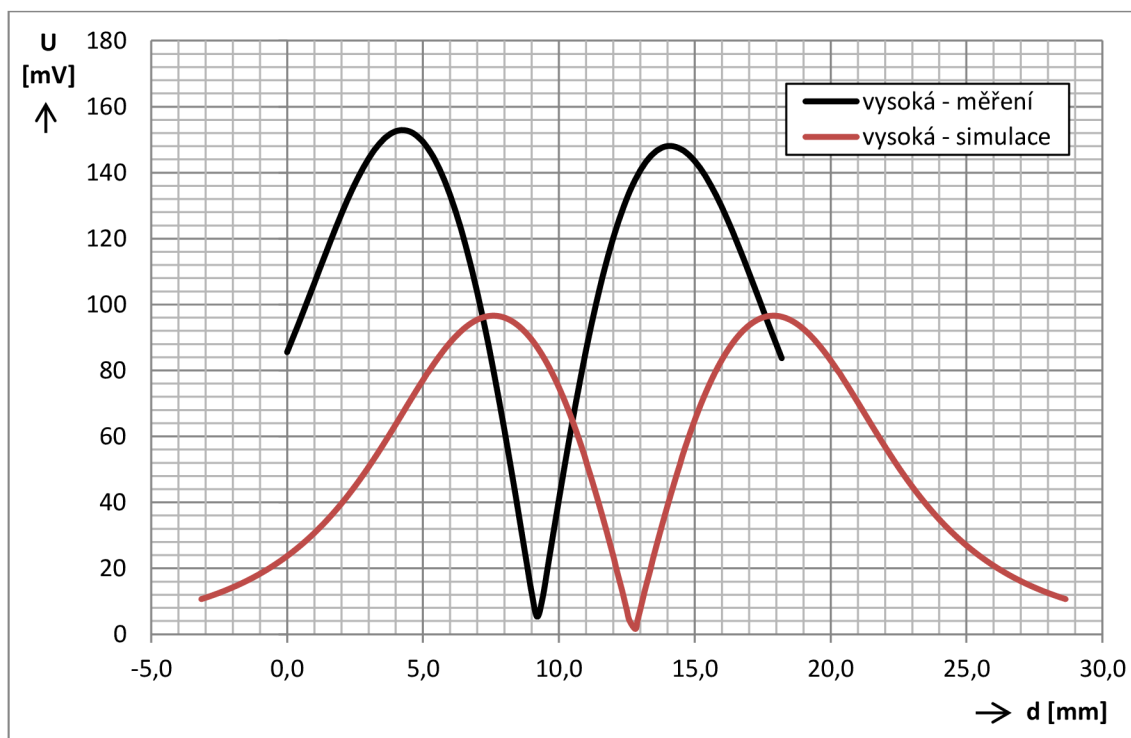
Graf 15: Závislost naměřeného a vypočítaného napětí indukovaného v nízké cívce při použití širokého magnetu



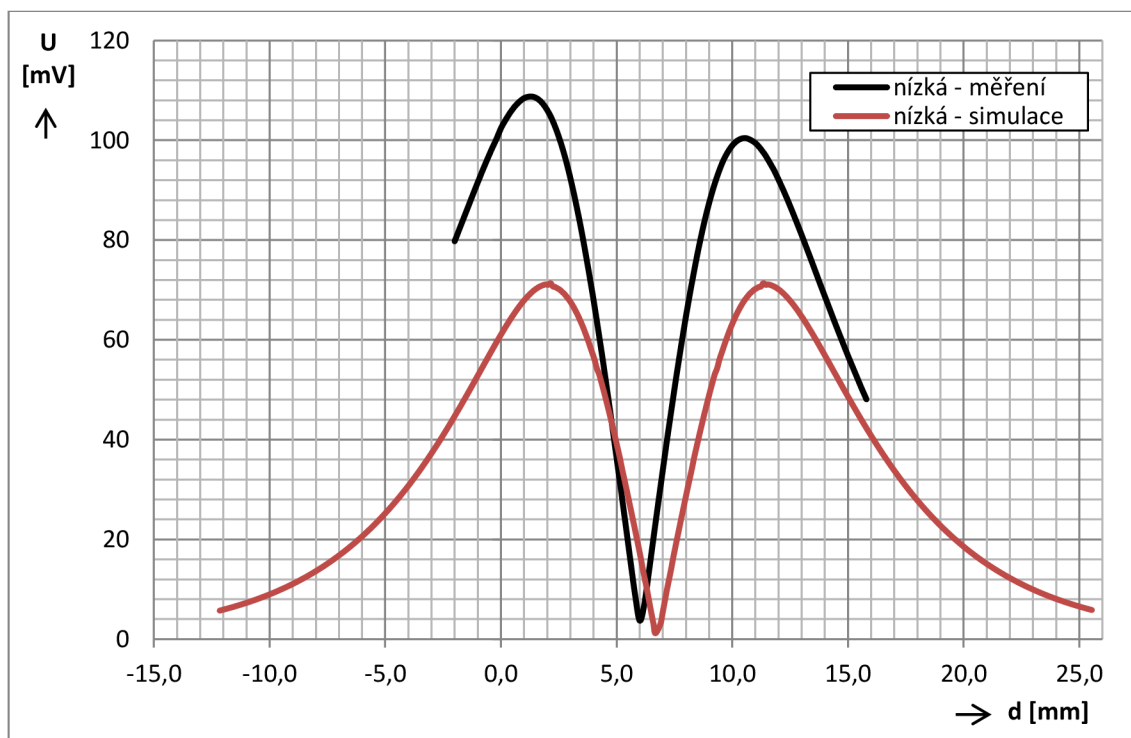
Graf 16: Závislost naměřeného a vypočítaného napětí indukovaného v souměrné cívce při použití úzkého magnetu



Graf 17: Závislost naměřeného a vypočítaného napětí indukovaného ve vysoké cívce při použití úzkého magnetu



Graf 18: Závislost naměřeného a vypočítaného napětí indukovaného v nízké cívce při použití úzkého magnetu



Z grafů č. 13, 14 a 15 (široký magnet) je vidět, že měřené hodnoty jsou přibližně dvakrát vyšší než hodnoty vypočítané. Mezi průběhy pro úzký magnet (grafy č. 16, 17 a 18) je tento rozdíl cca 70 %. Otázkou zůstává, zda mají použité magnety přesně takové magnetické vlastnosti, jaké udává výrobce, a které byly použity při simulaci. Pokud by tomu tak nebylo, mohla mezi měřením a simulací vzniknout určitá nepřesnost. Nicméně je nepravděpodobné, že rozdíl mezi skutečnými a udávanými parametry magnetů byl takový, aby způsobil tak velké rozdíly v jednotlivých průbězích. Jako pravděpodobnější se tedy jeví skutečnost, že model magnetu není zcela korektní. K jistě, zřejmě však ne výrazné, nepřesnosti by mohlo přispívat i zanedbání povrchové úpravy magnetu (poniklování) v simulaci.

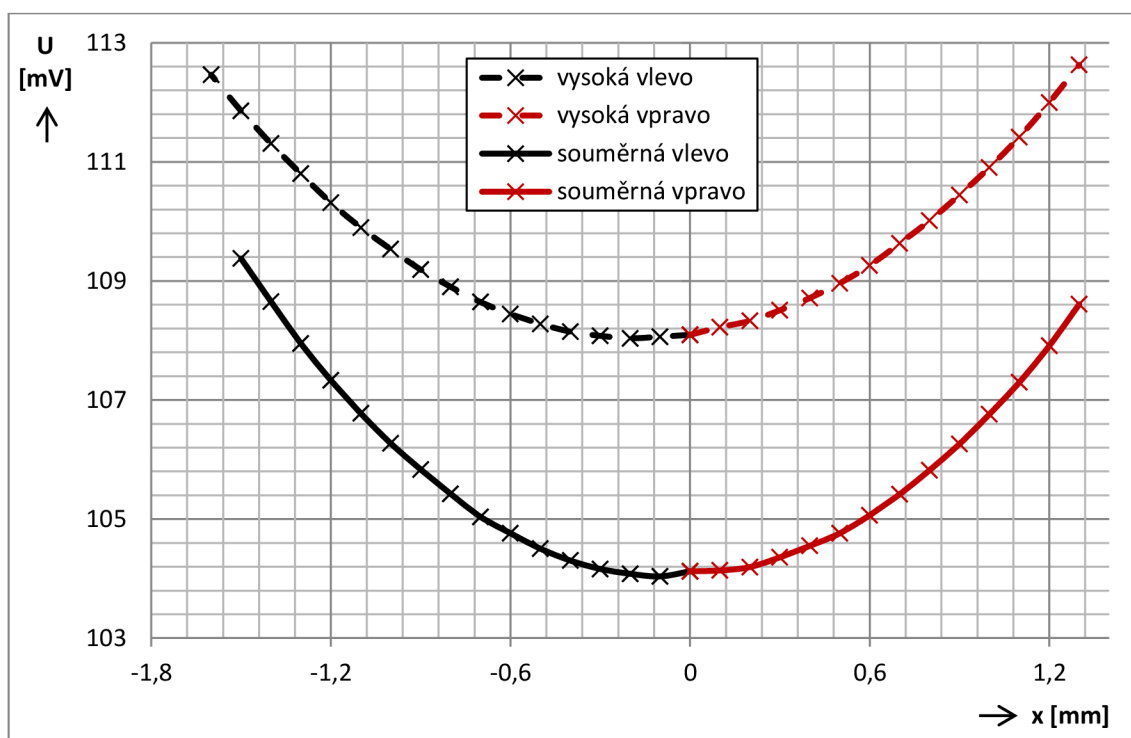
Dále je z grafů vidět, že poloha nejnižší hodnoty indukovaného napětí pro měření a simulaci není zcela shodná. To může být částečně způsobeno ne zcela dokonale nastavenou nulovou polohou při měření. Z větší části na to však bude mít vliv způsob výpočtu. Z grafů je vidět, že se rozdíl mezi polohou nejnižší hodnoty indukovaného napětí pro měření a simulaci zvětšuje s rostoucí výškou cívky. To může souviset s tím, že ve výpočtech určíme střední hodnotu magnetického indukčního toku ve výšce cívky. Znamenalo by to, že čím je cívka nižší, tím je výpočet přesnější a naopak.

3.3.2 Srovnání určování výrobních tolerancí

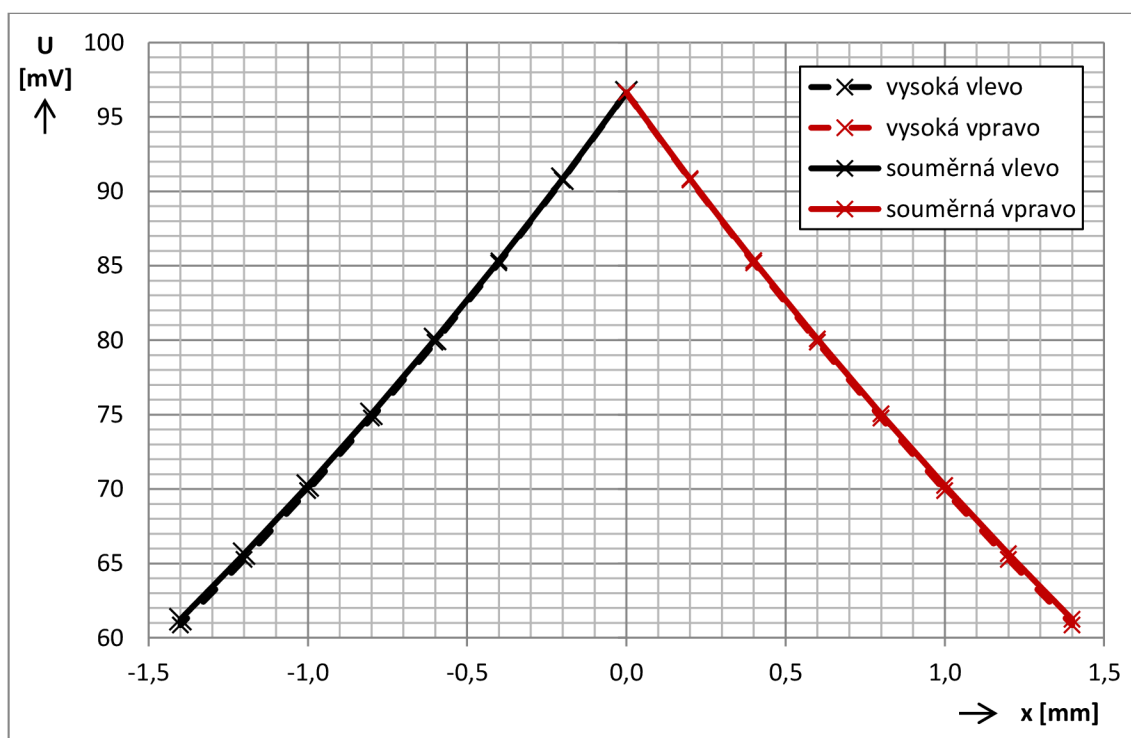
Pro srovnání výsledků určování výrobních tolerancí simulace a měření slouží grafy č. 19 a 20. Z těch je vidět, že výsledky měření a výsledky simulace se zcela rozcházejí. Zatímco při měření indukované napětí s rostoucím posunem exponenciálně roste, při simulaci toto napětí s rostoucím posunem téměř lineárně klesá.

Pro lepší porozumění velikosti indukovaného napětí v závislosti na horizontálním posunu si cívku pomyslně rozdělíme podle osy y na stranu A a stranu B . Důležité je ještě říci, že blíže k magnetu je hodnota intenzity magnetického pole vyšší a směrem od něj klesá. Pokud dojde k vyosení magnetu, tj. jeho přiblížení ke straně A a oddálení od strany B , bude intenzita magnetického pole procházejícího stranou A vyšší, zatímco intenzita magnetického pole procházejícího stranou B bude nižší. Vzhledem k tomu, že pokles intenzity magnetického pole směrem od magnetu není lineární, bude intenzita celkového magnetického pole v cívce vyšší a tím se bude v cívce indukovat vyšší napětí. Hodnota indukovaného napětí by se tak měla zvyšovat spolu s rostoucím posunem magnetu. To znamená, že za správný lze považovat výsledek měření. Naopak chybným se jeví výsledek simulace a výpočtů. Za nejpravděpodobnější zdroj chyby pak považují vztah 3.15 pro výpočet indukovaného napětí při horizontálním posunu, při jehož odvozování mohlo dojít k omylu.

Graf 19: Závislost indukovaného napětí na velikosti horizontálního posuvu pro souměrnou a vysokou cívku - měření



Graf 20: Závislost indukovaného napětí na velikosti horizontálního posuvu pro souměrnou a vysokou cívku - simulace



3.3.3 Srovnání magnetické indukce

Pro srovnání měřené magnetické indukce při povrchu magnetu a indukce získané ze simulace slouží graf č. 21 pro široký magnet a č. 22 pro úzký magnet. Průběh měřené hodnoty je v grafech zobrazen vždy spojitou čarou, průběh ze simulace je zobrazen čárkovaně. Pro lepší srovnání měření a simulace byly hodnoty naměřené za použití úzkého magnetu překlopeny (vynásobeny -1) tak, jako by byl magnet na šroubu orientován stejně jako magnet široký (viz kap. 3.2.5).

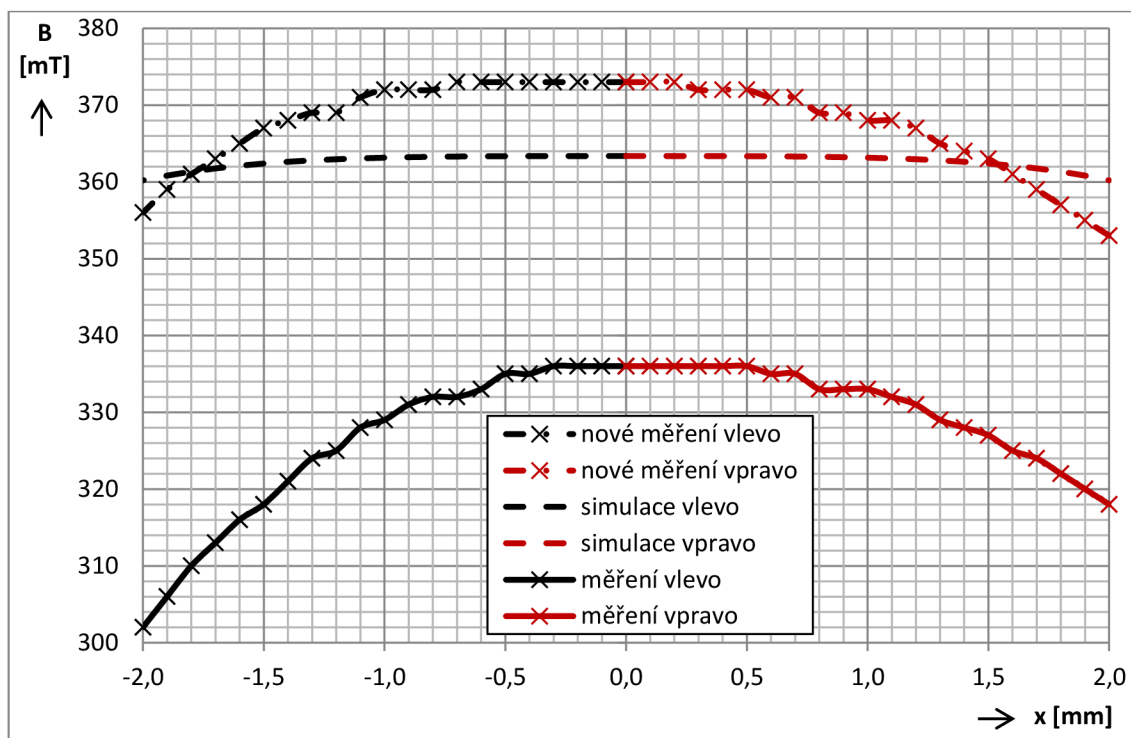
Z grafu pro široký magnet je vidět, že při měření hodnota magnetické indukce s rostoucím vyosením Hallovy sondy (dále jen sonda) z osy magnetu, v porovnání se simulací, poměrně výrazně klesá – z nulové do krajní polohy $+2\text{ mm}$ poklesne cca o 18 mT , v případě krajní polohy -2 mm dokonce cca o 34 mT . Naopak při simulaci je tento pokles nepatrný, v obou krajních polohách pouze cca o 3 mT .

V grafu pro úzký magnet jsou rozdíly poklesu mezi měřením a simulací taktéž patrné, nicméně nejsou tak markantní jako u širokého magnetu. Zatímco v případě měření je pokles v krajní poloze $+2\text{ mm}$ cca o 47 mT a v krajní poloze -2 mm cca o 102 mT , při simulaci je tento pokles v obou krajních polohách cca 46 mT .

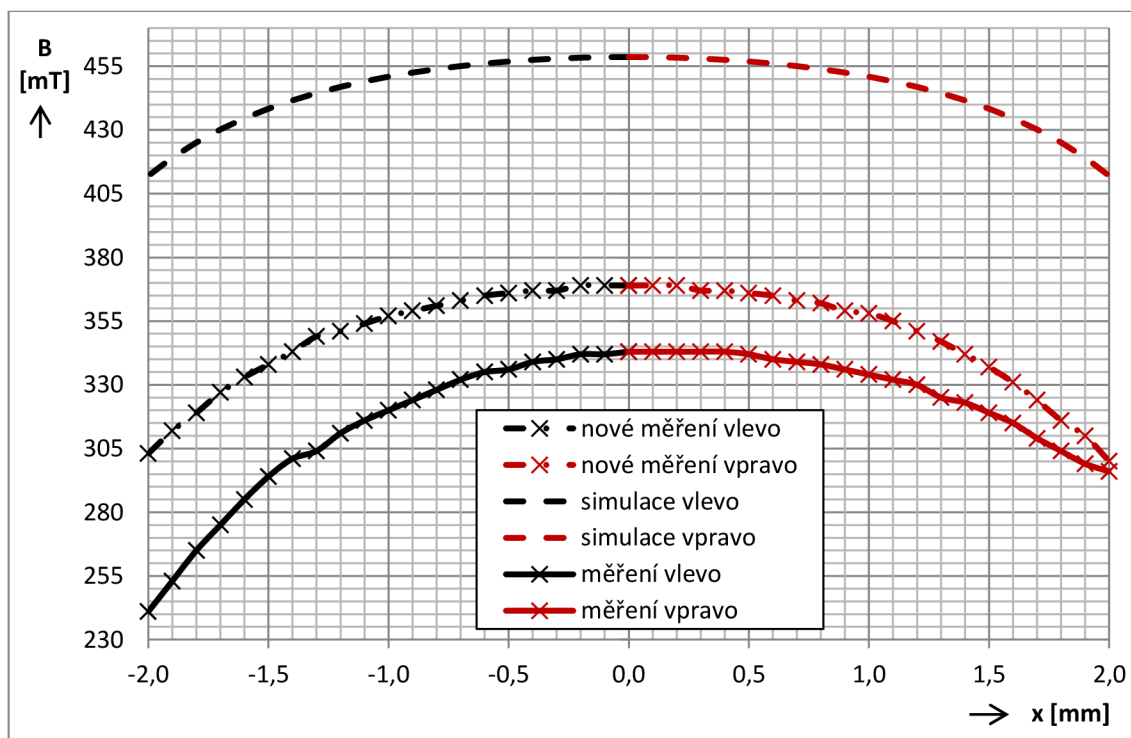
K rozdílu mezi měřením a simulací mohlo dojít při měření, kdy magnetické pole mohlo být ovlivněno kovovými předměty přítomnými v okolí měřicí oblasti, např. vibračním stolek ve kterém byl upevněn šroub s magnetem, nebo laboratorním stojanem, ve kterém byla upevněna sonda. Pro ověření správnosti měření jsem proto měření opakoval, tentokrát s upravenou měřicí aparaturou z úkolu 3.2.5. Úprava spočívala v nahrazení kovového laboratorního stojanu stojanem dřevěným a použitím dřevěného hranolu jako nosiče šroubu s magnetem. Výška hranolu byla 10 cm , aby byla zajištěna dostatečná vzdálenost od nejbližšího kovového předmětu, kterým byl souřadnicový stůl Proxxon KT 70. Pomocí něj jsem ručně nastavoval vyosení sondy z osy magnetu a odečítal hodnoty magnetické indukce z displeje gaussmetru. Vzhledem k tomu, že nebylo možné použití kovových svorek k přichycení sondy k dřevěnému stojanu, musela být použita lepicí páska. Tím pádem bylo obtížné přesné nastavení kolmosti sondy vzhledem k rovině povrchu magnetu a výšky mezery mezi sondou a povrchem magnetu. Fotografie měřicí aparatury je přiložena v příloze B.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 11 v příloze A, výsledné závislosti pro jednotlivé magnety jsou vyznačeny čerchovaně v grafech č. 21 a 22. Je vidět, že tvar průběhů se prakticky shoduje s prvním měřením, nicméně pokles je nyní v obou krajních polohách téměř totožný což znamená, že se podařilo přesněji nastavit počáteční souosost sondy a magnetů. Přesto, zejména u širokého magnetu, úplně neodpovídá pokles mezi měřením a simulací. To může být způsobeno nepřesným nastavením vzdálenosti sondy od povrchu magnetu, nebo chybnou simulací modelu magnetu.

Graf 21: Závislosti magnetické indukce B na vzájemném horizontálním posunu Hallovy sondy a širokého magnetu



Graf 22: Závislosti magnetické indukce B na vzájemném horizontálním posunu Hallovy sondy a úzkého magnetu

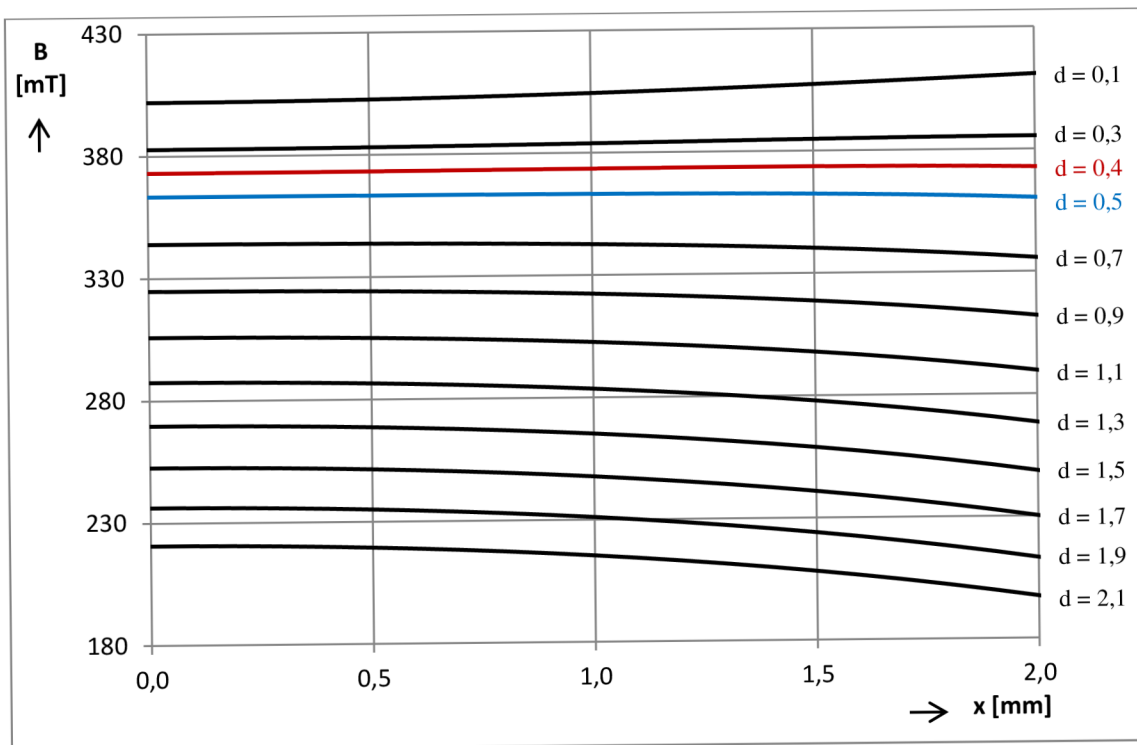


Z grafů č. 21 a 22 je dále vidět, že velikost měřených a simulovaných hodnot magnetické indukce není zcela totožná. Rozdíl mohl vzniknout nepřesně nastavenou vzdáleností mezi sondou a magnetem při měření. Z tohoto důvodu jsem pomocí simulace provedl citlivostní analýzu. Ta spočívala v nalezení takové vzdálenosti sondy od povrchu magnetu, kdy se budou velikosti magnetické indukce z měření a simulace shodovat. Shodu jsem se snažil nalézt pro výsledky nového měření, které považuji za přesnější.

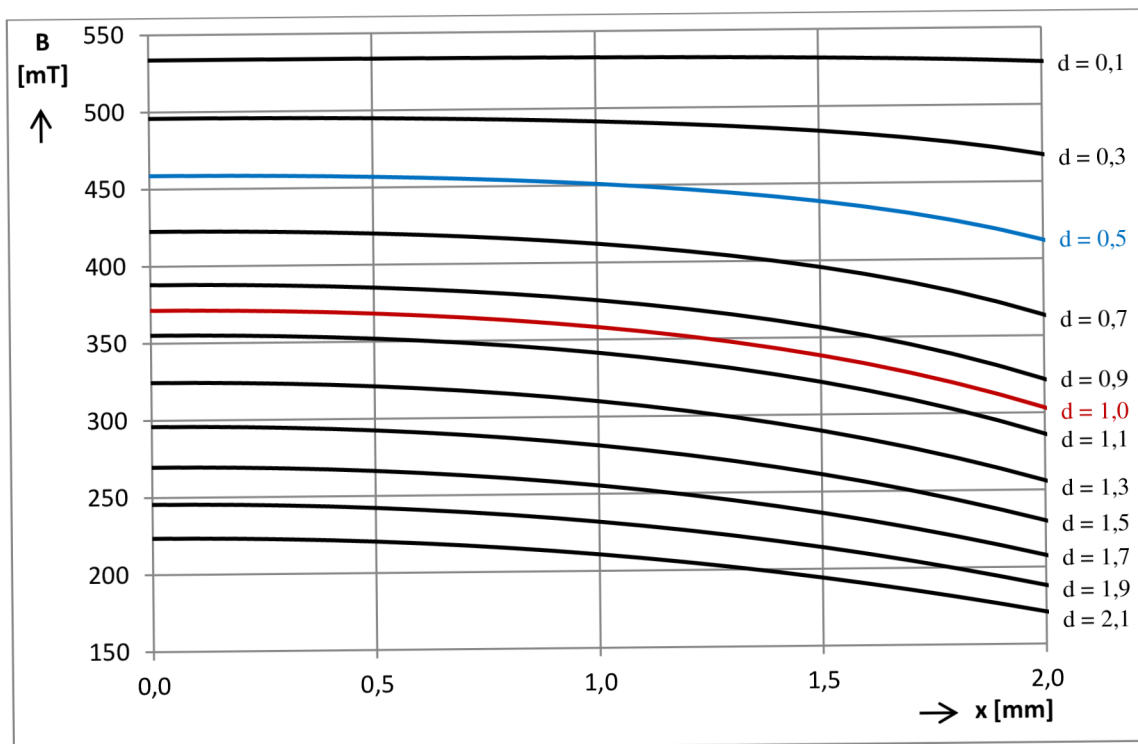
Grafy č. 23 a 24 zobrazují provedenou citlivostní analýzu pro široký, respektive úzký magnet. Zobrazeny jsou závislosti magnetické indukce na vzájemném horizontálním posunu sondy a magnetů, pro různé vzdálenosti d sondy od povrchu magnetů. Modře jsou vyznačeny průběhy, odpovídající vzdálenosti $d = 0,5 \text{ mm}$, červeně pak průběhy, jejichž hodnota magnetické indukce v počáteční poloze $x = 0,0 \text{ mm}$ se shoduje s hodnotou magnetické indukce v téže poloze při novém měření.

Zatímco v případě širokého magnetu se hodnoty magnetické indukce v počáteční poloze shodují při $d_{\text{měř}} = 0,5 \text{ mm}$ a $d_{\text{sim}} = 0,4 \text{ mm}$, v případě úzkého magnetu je shoda při $d_{\text{měř}} = 0,5 \text{ mm}$, $d_{\text{sim}} = 1,0 \text{ mm}$ a navíc se takřka dokonale shoduje i pokles magnetické indukce v krajních polohách, který je v měření i simulaci cca 70 mT . Odchyłky ve vzdálenosti sondy od povrchu magnetů mezi měřením a simulací tedy jsou $0,1 \text{ mm}$, respektive $0,5 \text{ mm}$. Vzhledem k přesnosti přichycení sondy k dřevěnému stojanu lepicí páskou jsou tyto odchyłky zcela v toleranci. Přetrvává však rozdíl v poklesu hodnoty magnetické indukce mezi simulací a měřením v případě širokého magnetu. Vzhledem k tomu, že simulace obou magnetů se liší pouze v jejich rozměrech a magnetických vlastnostech, je nepravděpodobné, že by byla simulace širokého magnetu provedena nesprávně. Možný vliv na měřené hodnoty mohla mít popraskaná ochranná vrstva niklu na povrchu širokého magnetu.

Graf 23: Závislosti magnetické indukce B na vzájemném horizontálním posunu Hallovy sondy a širokého magnetu pro různé vzdálenosti d [mm] sondy od povrchu magnetu



Graf 24: Závislosti magnetické indukce B na vzájemném horizontálním posunu Hallovy sondy a úzkého magnetu pro různé vzdálenosti d [mm] sondy od povrchu magnetu



3.4 Shrnutí a obecná doporučení

Z výsledků simulací, měření a jejich vzájemného srovnání vyplývají následující skutečnosti a závěry.

Velikost indukovaného napětí v cívce je závislá na mnoha parametrech, jimiž jsou průměr magnetu d_{mag} , výška magnetu h_{mag} , magnetické vlastnosti magnetu, tedy jeho síla F_{mag} , průměr cívky d_{civ} , výška cívky h_{civ} , šířka vinutí cívky k_{civ} , počet závitů cívky N_{civ} , vzájemná vertikální poloha cívky a magnetu x_v , vzájemná horizontální poloha x_h , frekvence kmitání magnetu f_k a velikost amplitudy kmitů y_k . Tuto závislost lze vyjádřit matematicky.

$$U = f(d_{mag}, h_{mag}, F_{mag}, d_{civ}, h_{civ}, k_{civ}, N_{civ}, x_v, x_h, f_k, y_k) \quad (3.22)$$

Vzhledem k tomu, že frekvenci a velikost amplitudy kmitů nemůžeme libovolně měnit, protože závisí na měřené úloze, nemusíme jejich vliv uvažovat. Maximální hodnota napětí se v cívce indukuje, pokud je průměr magnetu téměř srovnatelný se vzduchovou mezerou cívky. Nemusíme tak uvažovat ani vzájemný horizontální posun. Počet závitů cívky je přímo závislý na rozměrech vinutí cívky, případně na tloušťce drátů, kterým je vinutí tvořeno. Pokud tedy nebudeme uvažovat ani tento parametr, zjednoduší se nám závislost 3.22 následovně.

$$U = f(d_{mag}, h_{mag}, F_{mag}, d_{civ}, h_{civ}, k_{civ}, x_v) \quad (3.23)$$

Aby byla splněna podmínka co nejmenší vzduchové mezery uvnitř cívky, je na sobě navzájem závislý průměr magnetu s průměrem cívky a šířkou jejího vinutí. Od rozměrů magnetu se odvíjí jeho magnetické vlastnosti. Čím větší magnet je, tím silnější je jeho magnetické pole. Alespoň mezi magnety, používanými při měření, se jako lepší jeví použití magnetu, který má větší průměr než výšku. Naopak v případě cívky vychází lépe stejná velikost šířky a výšky vinutí, případně cívka s větší hodnotou výšky vinutí. S rostoucími rozměry magnetu a tím i cívky se sice zvyšuje hodnota indukovaného napětí, nicméně roste i celková hmotnost snímače. To může mít negativní vliv na měřené objekty a tím i na celkové výsledky měření, např. při použití elektrodynamického snímače v hmotnostním průtokoměru je nepřístupné nadměrné zatěžování měřicích trubic.

4 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl návrh a realizace elektrodynamického snímače, složeného z cívky a magnetu, pro měření relativních kmitů dvou povrchů. K určení optimálních parametrů snímače se předpokládalo použití vhodného simulačního softwaru za současného užití běžně dostupné výpočetní techniky.

V úvodu práce bylo nutné seznámit se s problematikou proměnného magnetického pole a simulačním softwarem COMSOL Multiphysics, který jsem vybral k tvorbě simulací. V něm jsem vytvořil 2D modely permanentních magnetů a ze získaných dat jsem podle odvozených vztahů vypočítal indukované napětí do cívky snímače. Výpočty jsem prováděl pomocí vlastních funkcí vytvořených v programu Matlab. Po provedení simulací a výpočtů jsem realizoval praktické měření v laboratoři. Pro účely měření byly vyrobeny tři cívky s označením souměrná, vysoká a nízká, které se lišily poměrem stran vinutí. Na závěr jsem provedl srovnání a zhodnocení výsledků simulace a měření.

Prvním úkolem v simulaci i měření byl výpočet indukovaného napětí do cívky v případě, že vertikální osa cívky je shodná s vertikální osou magnetu. Při srovnání výsledků jsem zjistil, že hodnoty indukovaného napětí z měření jsou téměř dvakrát vyšší, než hodnoty ze simulace. Důvod tohoto rozdílu se mi přes veškerou snahu nepodařilo objasnit. Důležitou roli ve velikosti indukovaného napětí má také vzájemná poloha cívky a magnetu, kdy horizontální střed vinutí cívky by měl být na úrovni hrany magnetu. Tato poloha se však mírně mění v závislosti na výšce cívky.

V druhém úkolu šlo o určení výrobních tolerancí, konkrétně o zjištění vlivu vzájemného vyosení cívky a magnetu na velikost indukovaného napětí. Zatímco při experimentu v laboratoři jsem zjistil, že hodnota napětí s rostoucím vyosením roste, výsledek simulace a následných výpočtů byl zcela opačný. Z uvedených důvodů předpokládám, že chyba nastala právě při výpočtech. Vzhledem k tomu, že jsem na tento rozdíl přišel až v závěru práce, nebylo z časových důvodů možné chybu najít, případně odstranit.

Posledním úkolem bylo měření magnetického pole, a to především kvůli zjištění, zda jsou modely permanentních magnetů vytvořeny správně. Vzhledem k přesnosti laboratorního experimentu, a možným odchylkám parametrů skutečných magnetů od údajů udávaných výrobcem, jsem zjistil, že se výsledky, v rámci tolerance, shodují a modely magnetů jsou tak vytvořeny správně.

Srovnáním výsledků simulací a měření bylo dokázáno, že výpočet indukovaného napětí do cívky lze provést i na běžně dostupné výpočetní technice. Z provedených simulací a měření vyplývá, že lepší výsledky podávají cívky, jejichž výška vinutí je větší nebo rovna šířce vinutí. Dále bylo zjištěno, že průměr magnetu by měl být téměř shodný s průměrem vzduchové mezery cívky, protože právě v tom případě je hodnota indukovaného napětí největší.

Hlavní náplní budoucího vývoje by mělo být především nalezení a korekce chyby ve výpočtech indukovaného napětí. Na základě této opravy by pak bylo možné provést více přesnějších simulací, dle kterých by byl vyroben snímač s optimálními parametry.

LITERATURA

- [1] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. Měření vibrací ve vibrodiagnostice. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, 2010, roč. 16, č. 1, 32 - 36. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40375
- [2] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. Možnosti a problémy moderní (vibro)diagnostiky. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, 2009, roč. 14, č. 10, 10 - 13. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=39703
- [3] KREIDL, Marcel. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. ISBN 80-730-0158-6.
- [4] SINOMAG, s.r.o. *Permanentní magnety: Co je třeba vědět o magnetech*. Dostupné z: http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf
- [5] DRAXLER, Karel, Petr KAŠPAR a Pavel RIPKA. *Magnetické prvky a měření*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994, 276 s. ISBN 80-010-1080-5.
- [6] BENEŠ, Pavel. *Automatizace a automatizační technika*. Vyd. 2. Brno: CP Books, 2005, viii, 280 s. ISBN 80-251-0795-7.
- [7] PRÁŠIL, Milan. *Metrologie vybraných kinematických veličin: Učební texty k semináři*. Praha: Český metrologický institut Praha, 2012. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_08_1212.pdf
- [8] KOUTNÝ, Petr. *Hmotnostní průtokoměr*. 2011. 61 l. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39358.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [9] Patent Kind Codes for CAS Basic and Patent Family Members. In: *Patent Kind Codes* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.cas.org/content/references/patkind>
- [10] COMSOL. *Multiphysics Modeling and Simulation Software* [online]. 2013 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://www.comsol.com/>
- [11] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. vyd. Brno/Praha: VUTIUM/PROMETHEUS, 2000, 1198 s. ISBN 80-214-1869-9.
- [12] MATLAB - Jazyk pro technické výpočty | Humusoft. *Technické výpočty, řídicí technika, simulace | Humusoft* [online]. 2012 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/matlab/>

- [13] MICRO MOTION, Inc. *Ferromagnetic drive and velocity sensors for a coriolis mass flow rate meter* [patent]. USA. 73/861.355, US 4777833. Uděleno 18. 10. 1988. Zapsáno 12. 11. 1986. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/4777833.html>
- [14] K-FLOW DIVISION OF KANE STEEL CO., Inc. *Coriolis mass flow meter adapted for low flow rates* [patent]. USA. 73/861.355, US 5115683 (A). Uděleno 26. 5. 1992. Zapsáno 8. 9. 1989. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/5115683.html>
- [15] MICRO MOTION, Inc. *Stationary coils for a coriolis effect mass flowmeter* [patent]. USA. 73/861.355, US 5349872. Uděleno 27. 9. 1994. Zapsáno 20. 8. 1993. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/5349872.html>
- [16] EMERSON ELECTRIC CO. *Flow meter pickoff assembly and flow meter pickoff adjustment method for nulling flow meter zero offset* [patent]. USA. 73/1.34, US 6997033 B2. Uděleno 14. 2. 2006. Zapsáno 3. 2. 2004. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/6997033.html>
- [17] DIGISENSORS, Inc. *Induction sensor* [patent]. USA. 324/207.15, US 7528597 (B2). Uděleno 5. 5. 2009. Zapsáno 7. 3. 2005. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/7528597.html>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Indukční snímače – a) elektromagnetický, b) elektrodynamický [6]	12
Obrázek 2: Průběh intenzity magnet. pole H a magnetické indukce B permanentního magnetu umístěného ve vzduchu [5]	14
Obrázek 3: Hysterezní smyčka [4]	15
Obrázek 4: Princip fungování Coriolisova průtokoměru [8]	17
Obrázek 5: Průtokoměry společnosti Emerson (fy Emerson)	18
Obrázek 6: Indukční snímač dle patentu US 4777833 [13]	19
Obrázek 7: Indukční snímač dle patentu US 5115683 (A) [14]	20
Obrázek 8: Indukční snímač dle patentu US 5349872 [15]	20
Obrázek 9: Indukční snímač dle patentu US 699703 (B2) [16]	20
Obrázek 10: Indukční snímač dle patentu US 7528597 (B2) [17]	21
Obrázek 11: Geometrie modelu	23
Obrázek 12: Výpočetní síť jednotlivých simulovaných oblastí	25
Obrázek 13: Simulace – magnetická indukce B - výsledná hodnota	27
Obrázek 14: Simulace – magnetická indukce B – výsledná hodnota (detail)	27
Obrázek 15: Simulace – magnetická indukce B a intenzita magnetického pole H	28
Obrázek 16: Složky magnetické indukce B	28
Obrázek 17: Simulace – magnetická indukce B – vertikální složka	29
Obrázek 18: Simulace – magnetická indukce B – vertikální složka (detail)	29
Obrázek 19: Magnetická indukce B – vertikální složka - Matlab	33
Obrázek 20: Výpočet magnetického indukčního toku Φ	35
Obrázek 21: Zobrazení vyosení závitů	36
Obrázek 22: Výpočet magnetického indukčního toku v jednotlivých cívkách	39
Obrázek 23: Schématický náčrt cívek (zleva: souměrná, vysoká, nízká)	44
Obrázek 24: Skutečné provedení cívek (zleva: souměrná, vysoká, nízká)	44
Obrázek 25: a) způsob magnetování, b) magnety připevněné na mosazných šroubech	45
Obrázek 26: Schématický náčrt měřicí aparatury pro úkol č. 1	47
Obrázek 27: Schématický náčrt měřicí aparatury pro úkol č. 3	52
Obrázek 28: Vzájemná počáteční poloha cívky a magnetu – a) simulace, b) měření	56
Obrázek 29: Měření indukovaného napětí	82
Obrázek 30: Měření magnetické indukce	82
Obrázek 31: Měření magnetické indukce – nové měření	83
Obrázek 32: Měřicí aparatura – celkový pohled	83

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Parametry notebooku použitého k simulaci a výpočtům	22
Tabulka 2: Seznam funkcí pro výpočet indukovaného napětí	33
Tabulka 3: Vypočítaný magnetický indukční tok z programů COMSOL Multiphysics a Matlab	38
Tabulka 4: Geometrické a magnetické vlastnosti používaných magnetů (fy Magsy, s.r.o).....	45
Tabulka 5: Seznam přístrojů k úkolu č. 1	46
Tabulka 6: Seznam přístrojů k úkolu č. 2	50
Tabulka 7: Seznam přístrojů k úkolu č. 3	52
Tabulka 8: Naměřené hodnoty vertikální složky magnetické indukce B pro úzký a široký magnet.....	53
Tabulka 9: Naměřené hodnoty indukovaného napětí při zachování sousosty cívky a magnetu	77
Tabulka 10: Naměření hodnoty indukovaného napětí při horizontálním vychýlení.....	79
Tabulka 11: naměřené hodnoty magnetické indukce – nové měření	80
Tabulka 12: Seznam vytvořených funkcí v pro výpočet indukovaného napětí	81

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Závislost vertikální složky magnetické indukce na vzdálenosti od vertikální osy širokého magnetu	30
Graf 2: Závislost vertikální složky magnetické indukce na vzdálenosti od vertikální osy úzkého magnetu	31
Graf 3: Závislost magnetického indukčního toku na vzájemné poloze cívky a magnetu	38
Graf 4: Závislosti indukovaných napětí v cívkách na vzájemné poloze cívek a širokého magnetu	41
Graf 5: Závislosti indukovaných napětí v cívkách na vzájemné poloze cívek a úzkého magnetu	41
Graf 6: Závislosti maximálních napětí indukovaných v cívkách na velikosti horizontálního posunu	42
Graf 7: Průběhy indukovaných napětí v souměrné cívce pro různé hodnoty horizontálního posunu	43
Graf 8: Závislosti indukovaných napětí v cívkách na vzájemné poloze cívek a širokého magnetu	49
Graf 9: Závislosti indukovaných napětí v cívkách na vzájemné poloze cívek a úzkého magnetu	49
Graf 10: Závislost indukovaného napětí na velikosti posuvu pro souměrnou a vysokou cívku .	51
Graf 11: Závislost magnetické indukce B na vzájemném horizontálním posunu Hallovy sondy a širokého magnetu	55
Graf 12: Závislost magnetické indukce B na vzájemném horizontálním posunu Hallovy sondy a úzkého magnetu	55
Graf 13: Závislost naměřeného a vypočítaného napětí indukovaného v souměrné cívce při použití širokého magnetu	57
Graf 14: Závislost naměřeného a vypočítaného napětí indukovaného ve vysoké cívce při použití širokého magnetu	57
Graf 15: Závislost naměřeného a vypočítaného napětí indukovaného v nízké cívce při použití širokého magnetu	58
Graf 16: Závislost naměřeného a vypočítaného napětí indukovaného v souměrné cívce při použití úzkého magnetu	58
Graf 17: Závislost naměřeného a vypočítaného napětí indukovaného ve vysoké cívce při použití úzkého magnetu	59

Graf 18: Závislost naměřeného a vypočítaného napětí indukovaného v nízké cívce při použití úzkého magnetu	59
Graf 19: Závislost indukovaného napětí na velikosti horizontálního posuvu pro souměrnou a vysokou cívku - měření.....	61
Graf 20: Závislost indukovaného napětí na velikosti horizontálního posuvu pro souměrnou a vysokou cívku - simulace.....	61
Graf 21: Závislosti magnetické indukce B na vzájemném horizontálním posunu Hallovy sondy a širokého magnetu	63
Graf 22: Závislosti magnetické indukce B na vzájemném horizontálním posunu Hallovy sondy a úzkého magnetu	63
Graf 23: Závislosti magnetické indukce B na vzájemném horizontálním posunu Hallovy sondy a širokého magnetu pro různé vzdálenosti d [mm] sondy od povrchu magnetu.....	65
Graf 24: Závislosti magnetické indukce B na vzájemném horizontálním posunu Hallovy sondy a úzkého magnetu pro různé vzdálenosti d [mm] sondy od povrchu magnetu.....	65

SEZNAM SYMBOLŮ

h_{civ}	výška cívky	[m]
h_{mag}	výška permanentního magnetu	[m]
BH_{max}	maximální energetický součin	[kJ/m ³]
B_r	remanence	[T]
F_{mag}	síla permanentního magnetu	[N]
H_{CB}	koercivita	[A/m]
H_{CJ}	vnitřní koercivita	[A/m]
S_p	snímací plocha Hallovy sondy	[m ²]
U_{ef}	efektivní hodnota napětí	[V]
U_{max}	maximální hodnota napětí	[V]
U_{pp}	špičková hodnota napětí	[V]
d_s	průměr Hallovy sondy	[m]
d_{civ}	průměr cívky	[m]
d_{mag}	průměr permanentního magnetu	[m]
d_p	průměr snímací plochy Hallovy sondy	[m]
f_k	frekvence kmitů	[Hz]
k_{civ}	šířka vinutí cívky	[m]
t_i	okamžitá hodnota času	[s]
y_0/y_k	amplituda kmitů	[m]
y_i	okamžitá hodnota polohy	[m]
μ_0	permeabilita vakua	[H/m]
μ_r	relativní permeabilita	[-]
Δ/x	horizontální posun	[m]
$\Delta\Phi$	změna magnetického indukčního toku	[Wb]
Δt	změna času	[s]
Φ	magnetický indukční tok	[Wb]
B	magnetická indukce	[T]

H	intenzita magnetického pole	$[A/m]$
I	proud	$[A]$
J	magnetická polarizace	$[T]$
N/N_{civ}	počet závitů cívky	$[-]$
O	obvod	$[m]$
S	plocha	$[m^2]$
U	napětí	$[V]$
$d/d_{měř}/d_{sim}$	vzdálenost Hallovy sondy od magnetu	$[m]$
f	frekvence signálu z generátoru	$[Hz]$
k	korekční faktor vibrometru	$[(\frac{mm}{s})/V]$
r/R	poloměr	$[m]$
u	okamžitá hodnota napětí	$[V]$
y	žádaná výchylka	$[m]$
φ	fázový posun	$[^\circ]$
ω	úhlová rychlost	$[rad/s]$

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Tabulky naměřených hodnot

Příloha B: Seznam funkcí v programu Matlab

Příloha C: Fotky z měření

Příloha D: Disk DVD

PŘÍLOHY

Příloha A

Tabulka 9: Naměřené hodnoty indukovaného napětí při zachování sousostí cívky a magnetu

cívka	široký magnet			úzký magnet		
	souměrná	vysoká	nízká	souměrná	vysoká	nízká
poloha [mm]	Amplituda U_{ef} [mV]	Amplituda U_{ef} [mV]	Amplituda U_{ef} [mV]	Amplituda U_{ef} [mV]	Amplituda U_{ef} [mV]	Amplituda U_{ef} [mV]
-2,0	95,446		104,792	54,504		56,392
-1,8	99,920		107,592	56,818		58,085
-1,6	104,609		110,145	59,176		59,759
-1,4	109,528		112,956	61,673		61,436
-1,2	114,607		115,470	64,205		63,110
-1,0	119,902	83,336	117,156	66,762		64,752
-0,8	125,379	88,022	120,379	69,427		66,374
-0,6	130,983	92,903	123,569	72,094		67,931
-0,4	136,876	98,169	125,857	74,835		69,439
-0,2	142,797	103,607	128,562	77,541		70,846
0,0	148,912	109,184	131,312	80,340	60,495	72,411
0,2	155,053	115,202	133,992	83,045	63,385	73,589
0,4	161,212	121,407	136,526	85,691	66,255	74,632
0,6	167,507	128,085	138,777	88,287	69,240	75,507
0,8	173,666	134,879	140,631	90,794	72,253	76,185
1,0	179,720	141,963	141,960	93,125	75,267	76,672
1,2	185,510	149,234	142,723	95,358	78,351	76,884
1,4	190,945	156,513	142,746	97,398	81,336	76,866
1,6	196,019	163,912	141,997	99,229	84,371	76,552
1,8	200,441	171,188	140,230	100,811	87,302	75,936
2,0	204,125	178,372	137,413	102,099	90,139	74,989
2,2	206,929	185,287	133,532	103,082	92,873	73,740
2,4	208,753	191,719	128,539	103,670	95,435	72,140
2,6	209,429	197,742	122,322	103,951	97,813	70,211
2,8	208,967	203,050	114,988	103,830	100,015	67,969
3,0	207,519	207,758	106,525	103,261	102,003	65,359
3,2	204,115	211,563	97,004	102,257	103,763	62,448
3,4	198,497	214,454	86,603	100,833	105,208	59,264
3,6	193,364	216,442	75,258	98,917	106,420	55,780
3,8	186,310	217,380	63,264	96,570	107,300	52,048
4,0	177,620	217,317	50,677	93,751	107,870	48,136
4,2	168,363	216,149	37,695	90,460	108,114	43,958
4,4	153,209	213,900	24,559	86,749	108,008	39,627

4,6	139,705	210,528	11,844	82,522	107,573	35,087
4,8	124,841	206,102	7,588	77,933	106,752	30,453
5,0	108,639	200,540	18,908	72,953	105,603	25,691
5,2	91,338	193,833	32,181	67,575	104,033	20,871
5,4	73,201	186,117	45,438	61,941	102,163	15,998
5,6	54,109	177,130	58,593	55,881	99,851	11,038
5,8	34,839	167,192	71,235	49,601	97,182	6,283
6,0	16,571	156,231	83,352	43,079	94,115	2,615
6,2	13,436	144,259	94,685	36,325	90,703	4,994
6,4	29,761	131,540	105,140	29,487	86,914	9,611
6,6	49,285	117,779	114,797	22,427	82,676	14,483
6,8	68,606	103,626	123,368	15,405	78,117	19,291
7,0	87,388	88,878	130,795	8,522	73,189	24,030
7,2	105,291	73,722	137,071	3,701	67,920	28,698
7,4	122,126	58,309	142,198	7,742	62,346	33,207
7,6	137,892	42,536	146,159	14,580	56,340	37,609
7,8	152,265	27,104	149,078	21,553	50,115	41,797
8,0	165,280	12,664	150,910	28,474	43,677	45,786
8,2	176,931	10,055	151,857	35,313	36,901	49,532
8,4	186,934	23,399	151,941	41,934	30,049	53,031
8,6	195,583	38,696	151,351	48,423	22,931	56,278
8,8	202,728	54,085	150,044	54,624	15,835	59,230
9,0	208,374	69,408	148,223	60,486	8,855	61,828
9,2	212,478	84,295	145,307	66,085	3,765	64,119
9,4	215,193	98,864	143,676	71,263	7,745	66,076
9,6	216,558	113,252	140,891	76,131	14,724	67,750
9,8	216,694	126,787	137,973	80,518	21,808	69,005
10,0	215,611	139,888	134,870	84,526	28,826	69,966
10,2	213,420	152,007	131,692	88,049	35,715	70,605
10,4	210,307	163,336	128,494	91,135	42,418	70,942
10,6	206,358	173,926	125,194	93,810	48,886	71,002
10,8	201,801	183,379	121,932	95,968	55,012	70,743
11,0	196,654	191,866	118,656	97,677	60,927	70,314
11,2	191,136	199,234	115,405	98,961	66,458	69,615
11,4	185,431	205,527	112,278	99,766	71,618	68,737
11,6	179,374	210,762	109,117	100,142	76,485	67,657
11,8	173,279	214,974	106,055	100,088	80,901	66,491
12,0	167,192	218,088	103,015	99,626	84,987	65,132
12,2	161,125	220,218	100,179	98,824	88,646	63,693
12,4	155,197	221,266	97,276	97,724	91,928	62,184
12,6	149,239	221,404	94,521	96,268	94,865	60,584
12,8	143,535	220,552	91,835	94,527	97,349	58,943
13,0	137,970	218,804	89,272	92,599	99,498	57,278

13,2	132,617	216,198	86,772	90,436	101,274	55,552
13,4	127,429	212,828		88,116	102,666	53,837
13,6	122,408	207,372		85,584	103,692	52,070
13,8	117,647	203,097		83,030	104,370	50,324
14,0	113,075	195,617		80,362	104,689	48,600
14,2	108,722	189,767		77,626	104,651	46,883
14,4	104,590	185,523		74,857	104,296	45,161
14,6	100,622	178,763		72,082	103,665	43,483
14,8	96,891	171,691		69,313	102,715	41,826
15,0	93,374	164,656		66,539	101,457	40,175
15,2	90,023	157,566		63,837	99,965	38,610
15,4	86,833	150,595		61,157	98,205	37,037
15,6	83,816	143,736		58,487	96,169	35,477
15,8	80,212	133,127		55,900	93,979	33,995
16,0					91,573	
16,2					88,959	
16,4					86,258	
16,6					83,373	
16,8					80,471	
17,0					77,431	
17,2					74,405	
17,4					71,324	
17,6					68,221	
17,8					65,183	
18,0					62,192	
18,2					59,200	

Tabulka 10: Naměření hodnoty indukovaného napětí při horizontálním vychýlení

souměrná cívka				vysoká cívka			
vlevo		vpravo		vlevo		vpravo	
x [mm]	U [mV]	x [mm]	U [mV]	x [mm]	U [mV]	x [mm]	U [mV]
0,0	104,123	0,0	104,123	0,0	108,095	0,0	108,095
-0,1	104,037	0,1	104,137	-0,1	108,063	0,1	108,224
-0,2	104,081	0,2	104,194	-0,2	108,037	0,2	108,328
-0,3	104,162	0,3	104,358	-0,3	108,078	0,3	108,508
-0,4	104,303	0,4	104,55	-0,4	108,147	0,4	108,713
-0,5	104,503	0,5	104,761	-0,5	108,279	0,5	108,961
-0,6	104,762	0,6	105,064	-0,6	108,443	0,6	109,260
-0,7	105,037	0,7	105,416	-0,7	108,645	0,7	109,630
-0,8	105,424	0,8	105,821	-0,8	108,901	0,8	110,011
-0,9	105,834	0,9	106,261	-0,9	109,190	0,9	110,445
-1,0	106,271	1,0	106,761	-1,0	109,533	1,0	110,906

-1,1	106,775	1,1	107,297	-1,1	109,897	1,1	111,417
-1,2	107,332	1,2	107,91	-1,2	110,314	1,2	111,996
-1,3	107,949	1,3	108,608	-1,3	110,800	1,3	112,628
-1,4	108,653	1,4		-1,4	111,306	1,4	
-1,5	109,376	1,5		-1,5	111,856	1,5	
-1,6		1,6		-1,6	112,463	1,6	

Tabulka 11: naměřené hodnoty magnetické indukce – nové měření

úzký magnet				široký magnet			
vlevo		vpravo		vlevo		vpravo	
výchylka [mm]	indukce [mT]	výchylka [mm]	indukce [mT]	výchylka [mm]	indukce [mT]	výchylka [mm]	indukce [mT]
0,0	369	0,0	369	0,0	373	0,0	373
-0,1	369	0,1	369	-0,1	373	0,1	373
-0,2	369	0,2	369	-0,2	373	0,2	373
-0,3	367	0,3	367	-0,3	373	0,3	372
-0,4	367	0,4	367	-0,4	373	0,4	372
-0,5	366	0,5	366	-0,5	373	0,5	372
-0,6	365	0,6	365	-0,6	373	0,6	371
-0,7	363	0,7	363	-0,7	373	0,7	371
-0,8	361	0,8	362	-0,8	372	0,8	369
-0,9	359	0,9	359	-0,9	372	0,9	369
-1,0	357	1,0	358	-1,0	372	1,0	368
-1,1	354	1,1	355	-1,1	371	1,1	368
-1,2	351	1,2	351	-1,2	369	1,2	367
-1,3	349	1,3	347	-1,3	369	1,3	365
-1,4	343	1,4	342	-1,4	368	1,4	364
-1,5	338	1,5	337	-1,5	367	1,5	363
-1,6	333	1,6	331	-1,6	365	1,6	361
-1,7	327	1,7	324	-1,7	363	1,7	359
-1,8	319	1,8	316	-1,8	361	1,8	357
-1,9	312	1,9	310	-1,9	359	1,9	355
-2,0	303	2,0	300	-2,0	356	2,0	353

Příloha B

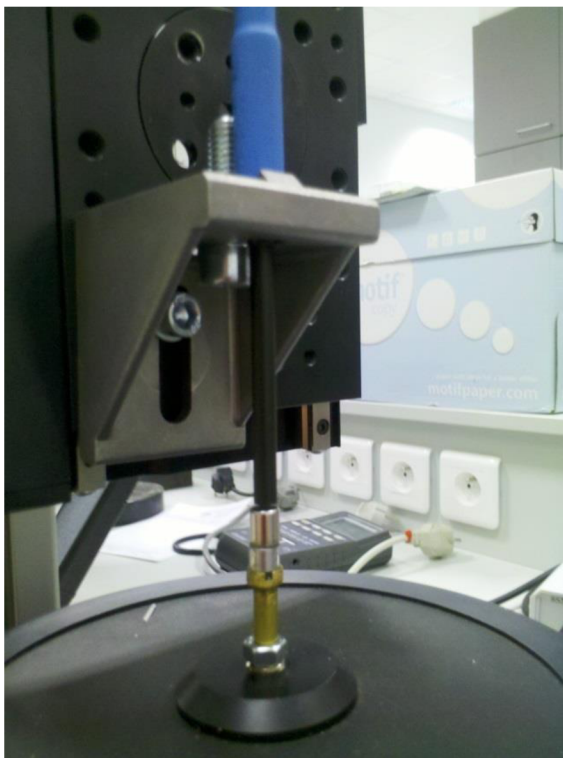
Tabulka 12: Seznam vytvořených funkcí v pro výpočet indukovaného napětí

Název funkce včetně (vstupních) a [výstupních] parametrů
[] = predzprac (jmena_vstup, jmena_vystup)
[B, p_x, p_y] = nacti (jmena_vstup)
[] = sluc (jmena_vystup)
[tok] = integruj_01 (parametry, p_x, B)
[oblast_ind_y] = rozdel_01 (parametry, p_y)
[civky] = civka_01 (parametry, p_y, tok, oblast_ind_y)
[d_tok, d_cas, osa_y] = zmena_01 (parametry, stredni)
[u_max, u_p] = maxim_01 (civky)
[tok] = integruj_02 (parametry, p_x, B)
[oblast_ind_y] = rozdel_02 (parametry, p_y)
[civky] = civka_02 (parametry, p_y, tok, oblast_ind_y)
[d_tok, d_cas, osa_y] = zmena_02 (parametry, stredni)
[u_max, u_p] = maxim_02 (civky)

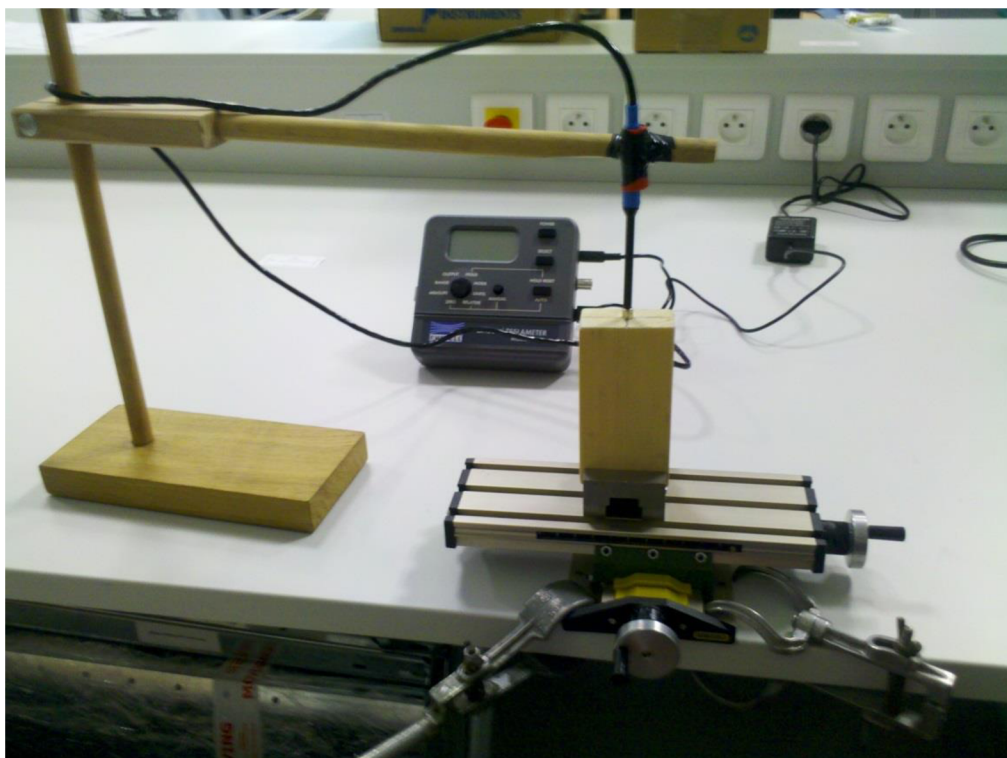
Příloha C



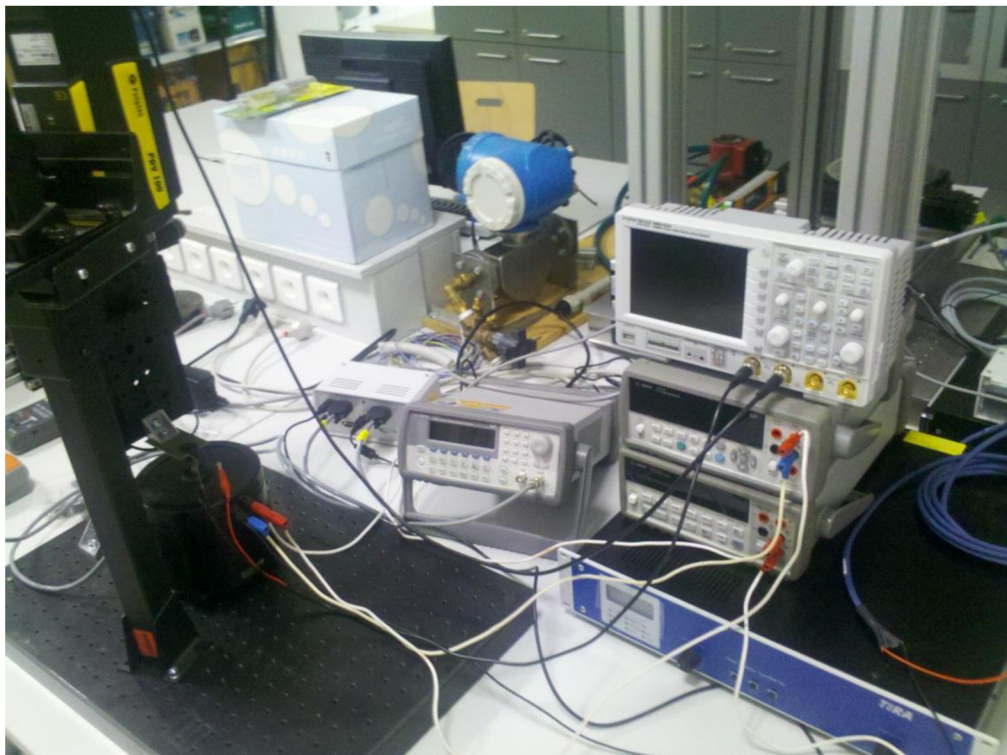
Obrázek 29: Měření indukovaného napětí



Obrázek 30: Měření magnetické indukce



Obrázek 31: Měření magnetické indukce – nové měření



Obrázek 32: Měřicí aparatura – celkový pohled

Příloha D

Obsah přiloženého disku DVD:

- Soubor 2013_DP_Koutny_Petr.pdf – elektronická verze diplomové práce ve formátu .pdf
- Soubor Data.xlsx – tabulky s výsledky měření a simulací ve formátu.xlsx.
- Soubor Vypocet.zip – funkce a data pro výpočet indukovaného napětí zkomprimované do formátu .zip
- Soubory Magnet_s.mph a Magnet_u.mph – modely permanentních magnetů ve formátu modelových souborů programu COMSOL Multiphysics.