

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Simulace elektromagnetického pole budícího jha
elektronového mikroskopu**

**Simulation of the Electromagnetic Field of Types
Electron Microscopes**

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Rattay**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Simulace elektromagnetického pole budícího jha elektronového
mikroskopu**
Simulation of the Electromagnetic Field of Types Electron Microscopes

Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretický úvod.
- 2) Základní principy elektromagnetického pole a magnetických obvodů.
- 3) Elektromagnetické čočky elektronových mikroskopů, principy a provedení.
- 4) Tvorba modelu a simulace elektromagnetického pole typové čočky
- 5) Zhodnocení a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

Draxler, K.: Magnetické prvky a měření, CVUT, Praha, 1999
Trnka, Z., Dufek, M., Hrabák, J.: Magnetická měření, SNTL, Praha, 1966
Brož, J.: Moderní problémy feromagnetismu, Academia, Praha, 1962
Dědek, L.: Teorie elektromagnetického pole, VUT, Brno, 1990
Haňka, L.: Teorie elektromagnetického pole, SNTL, Praha, 1975
Gardner, W.J., Microsensors - Principles and Applications, Wiley, 1994
Egerton, R.F., Physical principles of electron microscopy: an introduction to TEM, SEM, and AEM, Springer, 2005

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Marek, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.



Bc. Michal Rattay

Datum odevzdání: 4. 5. 2012

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Martinu Markovi, PhD. za poskytnutou odbornou pomoc při vypracování této diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na simulaci elektromagnetického pole typové čočky elektronového mikroskopu. První část je věnována teoretickému rozboru, kde jsou vysvětleny základní zákony, rovnice a veličiny pro elektromagnetické pole. Následující část je zaměřena na princip elektronového mikroskopu a elektromagnetických čoček. V praktické části je zahrnuta simulace elektromagnetického pole smyšlené čočky, která byla navržena podle dostupné literatury. Simulace bude provedena v programu ANSYS v 12.1, kde naměříme a znázorníme intenzitu magnetického pole a hustotu magnetického toku. Závěrečná část obsahuje zhodnocení poznatků a naměřených výsledků, které byly získány na základě experimentu.

Klíčová slova

Elektromagnetické pole, elektronový mikroskop, elektromagnetická čočka, Maxwellovy rovnice, permeabilita, intenzita magnetického pole, elektron, ANSYS.

Abstract

This dissertation focuses on a simulation of an electromagnetic field of an electron microscope lens type. The first portion is dedicated to a theoretical analysis, where the basic laws, equations and quantities for an electromagnetic pole are explained. The following portion is focused on the principle of an electron microscope and electromagnetic lenses. In the practical portion, the simulation of an electromagnetic field of a fabricated lens is summarized, which was proposed according to information from available literature. The simulation will be carried out in the ANSYS program at 12.1, where we will measure and draw the intensity of the magnetic field and density of the magnetic flow. The conclusion includes an evaluation of the findings and the measured results attained on the basis of the experiment.

Key words

Electromagnetic field, electron microscope, electromagnetic lens, Maxwell's equations, permeability, magnetic field intensity, electron, ANSYS.

Seznam některých použitých symbolů a zkratek

Symbol	Význam	Jednotka (hodnota)
B	Magnetické indukce	[T]
H	Intenzita magnetického pole	[A·m ⁻¹]
D	Elektrická indukce	[C·m ⁻²]
E	Intenzita elektrického pole	[V·m ⁻¹]
ε	Permitivita	[F·m ⁻¹]
μ	Permeabilita	[H·m ⁻¹]
φ	Magnetický tok	[Wb]
e	Náboj elektronu	[1,602·10 ⁻¹⁹ C]
h	Planckova konstanta	[6,62·10 ⁻³⁴ J·s]
m	Hmota elektronu	[9,107·10 ⁻³¹ kg]
λ	Vlnová délka	[m]
U	Elektrické napětí	[V]
I	Elektrický proud	[A]
R _m	Magnetický odpor	[H ⁻¹]
G _m	Permeance (Magnetická vodivost)	[H]
F	Síla	[N]
Q	Elektrický náboj	[C]
l	Délka	[m]

Zkratka	Význam
TEM	Transmisní elektronový mikroskop
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop
rot	rotace
div	divergence

Další použité symboly a zkratky jsou vysvětleny v textu.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Základní principy elektromagnetického pole a magnetických obvodů	2
2.1	Náboj.....	2
2.2	Elektromagnetické pole.....	2
2.3	Základní veličiny elektromagnetického pole	3
2.4	Maxwellovy rovnice.....	6
2.5	Základní zákony pro elektromagnetické pole	8
2.6	Permeabilita, permitivita a Hysterezní křivka	10
2.7	Magnetické obvody.....	12
2.7.1	Řešení magnetických obvodů.....	13
2.7.2	Magnetický odpor a magnetická vodivost.....	14
2.7.3	Magnetický odpor a magnetická vodivost vzduchových mezer.....	15
2.7.4	Metody řešení rozptylových polí.....	15
3	Elektromagnetické čočky elektronových mikroskopů, principy a provedení	18
3.1	Elektronový mikroskop	18
3.1.1	Transmisní elektronový mikroskop.....	19
3.1.2	Rastrovací elektronový mikroskop.....	24
3.2	Elektromagnetické čočky elektronových mikroskopů	27
3.2.1	Vady elektromagnetických čoček	31
4	Tvorba modelu a simulace elektromagnetického pole typové čočky.....	33
4.1	Tvorba modelu elektromagnetické čočky	34
4.2	Výsledky modelování pro hodnoty proudů 0,1 A, 0,6A a 1 A.....	37
4.3	Sestrojení B – H charakteristiky.....	43
5	Zhodnocení a závěr	45
6	Seznam použité literatury	46
7	Seznam příloh.....	48
8	Seznam obrázků a tabulek.....	49

1 Úvod

Diplomová práce je zaměřena na základní principy elektromagnetického pole a jeho působení na elektron, který se v tomto poli pohybuje. Nezbytnou součástí je seznámení se s elektronovým mikroskopem.

V první kapitole jsou popsány důležité veličiny a zákony působící v elektromagnetickém poli. Základní poznatky o elektromagnetických jevech jsou zobrazeny v Maxwellových rovnicích. Dále je zde zahrnut princip výpočtu magnetického obvodu pro určení intenzity magnetického toku.

Následující kapitola je soustředěna na princip a provedení elektronového mikroskopu. Je zde popsán zdroj elektronů, usměrnění elektronového paprsku pomocí elektromagnetických čoček, dopad elektronů na preparát a záznam obrazu. Nepostradatelnou částí elektronového mikroskopu jsou elektromagnetické čočky, které jsou popsány v další části kapitoly.

V další části práce je věnován prostor tvorbě vlastního modelu elektromagnetické čočky elektronového mikroskopu. Jsou zde uvedeny programy pro tvorbu, analýzu a výpočet typové čočky (AutoCAD a ANSYS). Vytvoření vlastního modelu typové čočky společně s využitými elementy a následný náročný proces meshování tvoří důležitý základ pro následný proces výpočtu.

Závěrečná kapitola diplomové práce zahrnuje zhodnocení navrženého modelu 2 D analýzy elektromagnetického pole typové čočky, vypočteného metodou konečných prvků v programu ANSYS.

2 Základní principy elektromagnetického pole a magnetických obvodů

Tvůrcem první představy o elektromagnetickém poli jako nositeli a zprostředkovateli elektromagnetických interakcí byl anglický fyzik Michael Faraday. Soustavu rovnic elektromagnetického pole vyjádřil skotský fyzik James Clerk Maxwell, podle kterého jsou pojmenovány. Maxwell v mnoha směrech zobecnil a matematicky vyjádřil Faradayovy výsledky.

Pozdějšími pokusy byly veškeré důsledky plynoucí z Maxwellových rovnic bez výjimky potvrzeny. Nejdůležitější důsledek svých rovnic odvodil Maxwell sám a to, že elektromagnetický rozruch se nejenom šíří od místa k místu, ale šíří se i rychlostí světla. [7]

2.1 Náboj

Náboj nemá vlastní hmotnost ani hybnost a nelze jej oddělit od částice. Když mluvíme o energii náboje, tak uvažujeme buď energii jeho elektromagnetického pole, nebo energii částice, která je nositelem náboje. Náboj tedy není další formou hmoty a je pouze výraznou vlastností částice. Elektromagnetické pole tuto vlastnost vyjadřuje do okolního prostoru. Vztah mezi částicí a elektromagnetickým polem je uskutečněn pomocí náboje.

Náboj je fyzikální veličina a má mimořádné postavení. Z pokusů byly určeny jeho základní vlastnosti:

- je nezníčitelný a nelze jej vytvořit; platí zákon zachování náboje,
- celkové množství kladných nebo záporných nábojů je shodné,
- náboj nelze neomezeně dělit; jeho elementární kvantum je náboj elektronu (protonu) rovný $1,6 \cdot 10^{-19}$ C,
- hodnota náboje nezávisle na pohybu částice je ve všech pozorovacích soustavách stejná. [7]

2.2 Elektromagnetické pole

Magnetické pole působí na zmagetovaná tělesa, vodiče s proudem a pohybující se částice s elektrickým nábojem silovými účinky. Elektromagnetická síla se skládá z elektrické a magnetické složky. Magnetické pole, jehož vlastnosti nejsou závislé na čase, se nazývá stacionární.

Kvantitativní mírou magnetického pole je magnetická indukce. Magnetické pole znázorňujeme pomocí indukčních siločar. Mírou velikosti magnetické indukce v určité části prostoru je hustota siločar. Jestliže magnetické indukční čáry jsou rovnoběžné, pak pole nazýváme homogenní.

Zmagetovaná tělesa mají jižní a severní pól. Zde se největší měrou projevují magnetické vlastnosti. Vzájemná poloha zmagetovaných těles určuje charakter silové interakce. Při přiblížení dvou rozdílných pólů se magnety budou přitahovat a naopak. Rozřežeme-li tyčový magnet na dvě části, tak každá část bude obsahovat severní a jižní pól. Takto bychom mohli pokračovat až do

atomární úrovně, aniž by zanikl magnetický dipól. Magnetické pole náleží některým elementárním částicím (např. proton, elektron, neutron). [13]

Elektromagnetické pole je nositelem energie, je schopno konat práci a má svou vlastní hybnost, kterou může předat nabitému tělesu. Podle teorie relativity má pak i náležitou hmotnost, která je spojena s jeho energií Einsteinovým vztahem

$$W = m \cdot c^2. \quad (2.2.1)$$

Nezanedbatelný vliv na elektromagnetické jevy má prostředí, které je obvykle definováno veličinami ϵ , μ a γ (ϵ - permitivita, μ - permeabilita, γ - měrná vodivost). Při objasňování zákonitostí elektromagnetických jevů napřed vycházíme z předpokladu, že se odehrávají ve vakuu, tedy v poli bez látkového prostředí pouze s osamocenými náboji a proudy.

Pokud se jedná o vlastnosti prostředí, ustálila se určitá terminologie. Jestliže graf závislosti magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H je přímka, mluvíme o prostředí lineárním. V tomto prostředí veličiny ϵ , μ ani γ nejsou závislé na veličinách E nebo H. Jestliže tyto konstanty jsou ve všech směrech stejné, mluvíme o izotropním prostředí. Pokud jsou konstanty prostředí stejné ve všech bodech, mluvíme o homogenním prostředí. Nejčastěji se vyskytuje prostředí lineární, izotropní a homogenní, které se někdy označuje zkratkou LIH. [7]

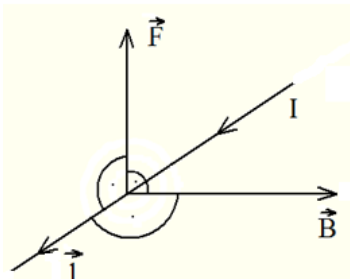
2.3 Základní veličiny elektromagnetického pole

Magnetická indukce

Magnetická indukce B je vektorová veličina, která vyjadřuje silové účinky na vodič, kterým protéká elektrický proud.

$$F = B \cdot I \cdot l \quad [N; T, A, m] \quad (2.3.1)$$

Jednotkou magnetické indukce je 1 T (Tesla). Je-li přímý vodič o délce $l = 1\text{ m}$ kolmý na magnetickou indukci B a prochází jím elektrický proud $I = 1\text{ A}$, tak na něj působí síla o velikosti $F = 1\text{ N}$. Pomocí magnetického toku lze také vyjádřit magnetickou indukci $1\text{ T} = 1\text{ Wb}\cdot\text{m}^{-2}$.



Obr. 1 Magnetická indukce [9]

Ve feromagnetiku dosahuje magnetická indukce hodnot 1,5 T až 2 T. Na povrchu permanentních magnetů je $B = 0,2$ T až 0,6 T a ve vzduchové mezeře laboratorních elektromagnetů $B = 1$ T až 2 T. U supravodivých cívek můžeme dosáhnout magnetické indukce 10 T až 20 T.

Magnetický tok

Magnetický tok je skalární veličina, která je definována napětím u_i . Toto napětí je indukováno v závitě při časové změně toku ϕ dle vztahu

$$u_i = \frac{d\phi}{dt} \quad [\text{V}; \text{Wb}, \text{s}] \quad (2.3.2)$$

Při rovnoměrném poklesu magnetického toku z jednotkové hodnoty na nulu v čase $t = 1$ s vznikne v závitě, který obepíná tok, indukované napětí 1 V, jenž odpovídá hodnotě magnetickému toku 1 Wb.

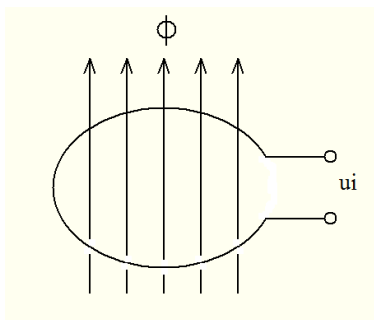
Tok lze definovat podle vztahu

$$\phi = \iint B dS = \iint B_n dS \quad [\text{Wb}; \text{T}, \text{m}^2] \quad (2.3.3)$$

kde B_n je složka B kolmá k ploše dS . V homogenním poli prochází jednotkový magnetický tok plochou $S = 1 \text{ m}^2$, která je kolmá ke směru magnetické indukce o hodnotě 1 T. Je-li vektor B kolmý na plochu S a pole je homogenní, dostaneme vztah

$$\phi = B \cdot S \quad [\text{Wb}; \text{T}, \text{m}^2] \quad (2.3.4)$$

Jednotkou magnetického toku je 1 Wb, který lze také vyjádřit jako 1 Vs.



Obr. 2 Magnetický tok [9]

Intenzita magnetického pole

Je vektorová veličina definovaná podle I. Maxwellovy rovnice. Od velmi dlouhého přímého vodiče, kterým protéká proud I je intenzita magnetického pole ve vzdálenosti r

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad [A \cdot m^{-1}; A, m] \quad (2.3.5)$$

Jednotkou intenzity magnetické pole je $1 A \cdot m^{-1}$. Tato hodnota odpovídá intenzitě pole ve vzdálenosti $r = 1/(2\pi)$ m od vodiče s proudem $I = 1 A$. Vztah mezi intenzitou pole a indukcí je

$$H = \frac{B}{\mu \cdot \mu_0}; B = H \cdot \mu \cdot \mu_0, \quad (2.3.6)$$

kde μ je poměrná (relativní) permeabilita prostředí. Je to bezrozměrné číslo.

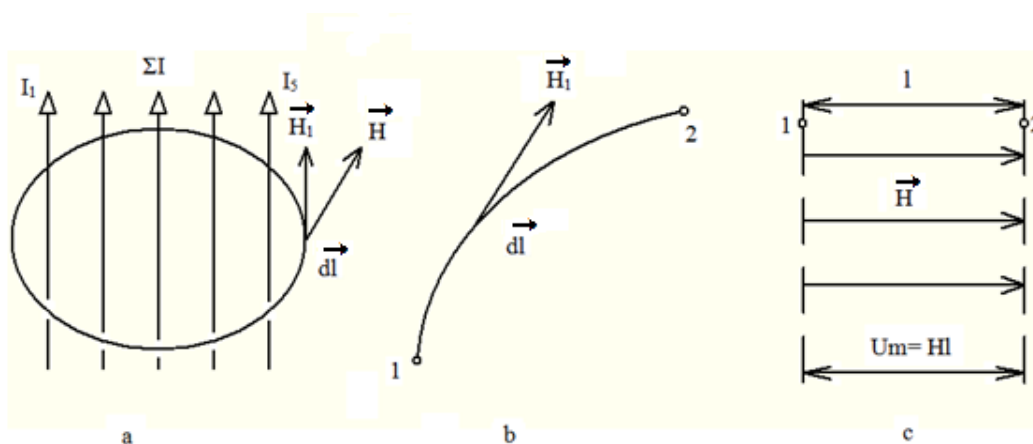
Magnetomotorická síla a magnetické napětí

Magnetomotorická síla je skalární veličina. Síla je vyvolaná proudem a působí v uzavřené dráze. Podle I. Maxwellovi rovnice můžeme sílu vyjádřit vzorcem

$$F_m = \oint H dl = \oint H_l dl = \sum I \quad [A; A \cdot m^{-1}, m, A], \quad (2.3.7)$$

kde H_l dle (Obr. 3a) je průmět vektoru H do směru elementu dl ,

$\sum I$ je celkový proud protékající uzavřenou dráhou l , daný součtem proudů všech vodičů s uvažováním směru toku proudů.



Obr. 3 Magnetomotorická síla a magnetické napětí [9]

Podle (Obr. 3a) jsme k danému směru proudu přiřadili směr vektoru H . Je-li hodnota intenzity H po celé délce dráhy l stejná a vektor H má všude směr elementu dráhy dl , pak můžeme napsat zjednodušený tvar

$$F_m = H \cdot l = \sum I \quad [A; A \cdot m^{-1}, m, A]. \quad (2.3.8)$$

Magnetické napětí U_m je skalární veličina, která je měřena mezi dvěma body po dráze l (Obr. 3b) a můžeme ji zapsat vzorcem

$$U_m = \int_1^2 H_l dl \quad [A; A.m^{-1}, m]. \quad (2.3.9)$$

Na (Obr. 3c) má spojnice mezi dvěma body směr vektoru H, a tedy vzorec pro magnetické napětí v homogenním poli je

$$U_m = H \cdot l \quad [A; A.m^{-1}, m]. \quad (2.3.10) [9]$$

2.4 Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice jsou považovány za „základní rovnice“ elektromagnetického pole. Ve čtyřech rovnicích jsou zobrazeny základní zákony elektromagnetismu.

1. Maxwellova rovnice

Vektor indukce D je hlavní veličinou elektrického pole. Z úvah o výstupu indukce D z uzavřené plochy jsme dospěli k 1. Maxwellově rovnici, která představuje Gaussovu větu.

$$\operatorname{div} D = \rho, \quad (2.4.1)$$

kde div - operátor zvaný divergence, D – vektor elektrické indukce, ρ – hustota elektrického náboje.

2. Maxwellova rovnice

Vyjadřuje zákon kontinuity siločar magnetické indukce. Výstup magnetické indukce z uzavřené plochy je roven nule.

$$\operatorname{div} B = 0, \quad (2.4.2)$$

kde B – magnetická indukce.

3. Maxwellova rovnice

Představuje Ampérův zákon celkového proudu, doplněný o posuvný Maxwellův proud.

$$\operatorname{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (2.4.3)$$

kde rot – operátor zvaný rotace, H – vektor intenzity magnetického pole, J – vektor hustoty elektrického proudu, parciální derivace D podle času – posuvný Maxwellův proud.

4. Maxwellova rovnice

Vyjadřuje Faradayův indukční zákon.

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad [\text{V/m}^2; \text{T/s}], \quad (2.4.4)$$

kde E – vektor intenzity elektrického pole.

Ke čtyřem základním rovnicím se přidávají další tři:

$$D = \varepsilon E \quad [\text{C/m}^2; \text{F/m}, \text{V/m}], \quad (2.4.5)$$

kde ε – je materiálová konstanta zvaná elektrická permitivita.

$$B = \mu H \quad [\text{T}; \text{H/m}, \text{A/m}], \quad (2.4.6)$$

kde μ – je materiálová konstanta zvaná magnetická permeabilita.

$$J = \gamma E \quad [\text{A/m}^2; \text{S/m}, \text{V/m}], \quad (2.4.7)$$

kde γ – je materiálová konstanta zvaná specifická vodivost. Je to tzv. diferenciální Ohmův zákon. Pro vakuum $\gamma = 0$.

Matematické řešení Maxwellových rovnic je velmi náročné a složité, proto se je snažíme zjednodušit. Pokud můžeme zanedbat některou z veličin, tak tím dosáhneme výrazného zjednodušení a uvažujeme skupiny úloh pro:

1. pole statické – proudy v tomto poli jsou nulové, protože náboje jsou v klidu. Vektory pole jsou v čase konstantní a derivace podle času nulové. Maxwellovi rovnice se rozpadnou na dvě samostatné skupiny rovnic.

$$\text{a) } \operatorname{rot} E = 0 \quad , \quad \operatorname{div} D = \rho \quad , \quad D = \varepsilon E \quad (2.4.8)$$

$$\text{b) } \operatorname{rot} H = 0 \quad , \quad \operatorname{div} B = 0 \quad , \quad B = \mu H \quad (2.4.9)$$

Skupina rovnic a) popisuje elektrostatické pole, jehož zdrojem jsou náboje.

Skupina rovnic b) popisuje pole magnetostatické (permanentních magnetů), které nemá zdroj volných proudů.

2. pole stacionární – je pole, ve kterém náboje mají konstantní rychlost, jedná se tedy o pole stejnosměrných proudů. Elektrické pole je popsáno skupinou rovnic (2.4.8), magnetické pole pak skupinou rovnic

$$\operatorname{rot} H = J \quad , \quad \operatorname{div} B = 0 \quad , \quad B = \mu H \quad (2.4.10)$$

Protože $\operatorname{div} \operatorname{rot} H = \operatorname{div} J = 0$, vznikne další skupina rovnic popisující stacionární pole ustálených proudů.

$$\operatorname{div} J = 0 \quad , \quad \operatorname{rot} E = 0 \quad , \quad J = \gamma E \quad (2.4.11)$$

3. pole kvazistacionární – je pole, ve kterém lze posuvné proudy zanedbat. Je tomu např. v proměnném poli ve vodivém prostředí.

$$\operatorname{rot} H = J, \quad \operatorname{rot} E = - \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (2.4.12)$$

$$\operatorname{div} D = \rho, \quad \operatorname{div} B = 0, \quad (2.4.13)$$

$$D = \varepsilon E, \quad B = \mu H, \quad J = \gamma E. \quad (2.4.14)$$

Do zavedení Maxwellova posuvného proudu bylo takto nahlíženo na pole. [8], [10]

2.5 Základní zákony pro elektromagnetické pole

Ampérův zákon

Popisuje vzájemné silové působení dvou vodičů zanedbatelného kruhového průřezu, jimiž protéká proud I respektive I_1 . Vodiče jsou k sobě rovnoběžné o velmi dlouhé délce (teoreticky nekonečná délka), vzájemně kolmé vodiče na sebe nepůsobí silou.

Pole nekonečně dlouhého vodiče působí na jiný paralelní nekonečně dlouhý vodič po celé jeho délce, a proto na jeho úsek délky l působí síla:

$$F = \frac{I \cdot I_1}{2\pi r} \cdot l \cdot \mu_0 \quad (2.5.1)$$

kde I a I_1 jsou proudy ve vodičích, r je vzdálenost mezi vodiči a μ_0 je permeabilita vakua a její hodnota je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [Hm⁻²].

Definice ampéru: „Ampér je stálý elektrický proud, který při průchodu dvěma přímými rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu umístěnými ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti 1 metr vyvolá mezi nimi stálou sílu o velikosti $2 \cdot 10^{-7}$ newtonu na 1 metr délky vodiče.“

Faradayův indukční zákon

M. Faraday objevil, že v uzavřené vodivé smyčce vzniká elektrický proud, když se v její blízkosti pohybuje magnet. Při časové změně magnetického indukčního toku se ve vodiči indukují elektromotorické napětí U_i .

$$\text{Pro jeden závit} \quad U_i = - \frac{d\phi}{dt} \quad (2.5.2)$$

$$\text{Pro } N \text{ závitů} \quad U_i = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.5.3)$$

Coulombův zákon

Elektrický náboj e vytvoří ve svém okolí elektrické pole, které působí silovými účinky na ostatní náboje vložené do tohoto pole. Siločára elektrického pole nám vyznačuje směr pohybu kladného náboje Q_2 , ale nic nevyovídá o velikosti síly, která působí na tento náboj. Pomocí intenzity elektrického pole E vyjadřujeme silové působení elektrického pole na libovolný náboj Q_2

$$E = \frac{F}{Q_2}, \quad (2.5.4)$$

kde F je síla působící na náboj Q_2 .

Intenzita elektrického pole je úměrná hustotě siločar. Velikost intenzity E na povrchu koule o poloměru R se středem v bodovém náboji Q_1 je:

$$E = \frac{1}{\varepsilon} \frac{Q_1}{4\pi R^2}, \quad (2.5.5)$$

kde ε je elektrická permitivita.

Náboj Q_2 vložíme do elektrického pole náboje Q_1 za účelem změřit intenzitu elektrického pole náboje Q_1 , výsledné elektrické pole se změní, ale na sílu působící na náboj Q_2 má vliv jen původní pole náboje Q_1 a výsledná síla působící na něj je Coulombův zákon:

$$F = EQ_2 = \frac{1}{\varepsilon} \frac{Q_1 Q_2}{4\pi R^2}. \quad (2.5.6)$$

Biotův a Savartův zákon

U Ampérova zákona jsme uvažovali o dvou nekonečně dlouhých vodičích, ale ve skutečnosti vodiče nejsou nekonečně dlouhé ani přímé. Tudiž musíme indukci B počítat jako vektorový součet (integrál) příspěvků od jednotlivých velmi krátkých částí vodiče, kterými protéká proud I .

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I}{r^3} dl \times r \quad (2.5.7)$$

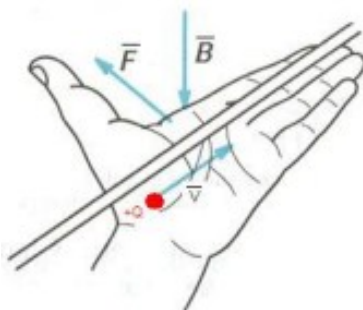
kde r je polohový vektor, dl je délková část vodiče, kterým protéká proud I .

Lorentzova síla

Rovnice (2.5.8) platí nejen pro elektron, ale i pro libovolný náboj Q , který se pohybuje rychlostí v a nachází se v magnetickém poli o indukci B . Jestli-že se v daném místě vyskytuje i elektrické pole o intenzitě E , pak výsledná síla působící na náboj Q je:

$$F = Q(E + v \times B) \quad (2.5.8)$$

Síla F je vždy kolmá k vektoru rychlosti v a může měnit pouze směr pohybu nabyté částice, nikoliv velikost rychlosti. Magnetická síla nekoná práci na rozdíl od elektrické. Pomocí pravidla levé ruky se určí orientace síly F (Obr. 4): Přiložíme-li levou ruku ke kladně nabitě částici tak, aby prsty ukazovaly směr pohybu částice, vektor magnetické indukce vstupoval do dlaně, pak směr síly F je určen vztyčeným palcem. Na záporně nabitou částici působí síla opačně orientovaná.



Obr. 4 Určení orientace síly [13]

[13], [8]

2.6 Permeabilita, permitivita a Hysterezní křivka

Permeabilita materiálu nebo prostředí je fyzikální veličina, která udává míru magnetizace v důsledku působení magnetického pole. Některá prostředí tyto účinky zesilují, jiná naopak zeslabují. Magnetické pole určité intenzity H vyvolá v různých prostředích odlišné účinky. Magnetická indukce B se mění v závislosti na magnetických vlastnostech prostředí, magnetická intenzita je nezávislá na prostředí.

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (2.6.1)$$

Permeabilita vakua μ_0 je fyzikální konstanta.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} \quad (2.6.2)$$

Relativní permeabilita je podíl permeability daného materiálu a permeability vakua

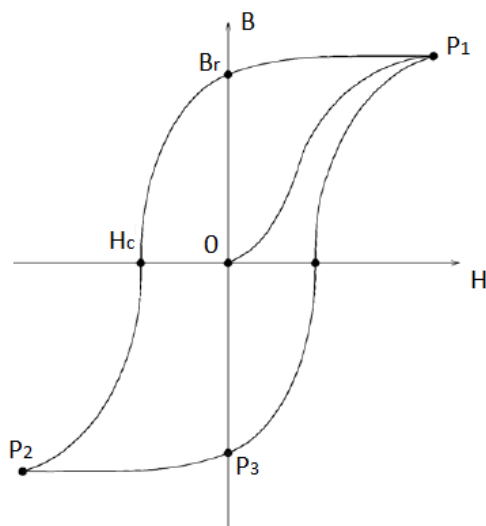
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}, \quad (2.6.3)$$

kde μ je absolutní permeabilita daného materiálu.

Látky dělené podle magnetických vlastností:

- Diamagnetické materiály – mají relativní permeabilitu nepatrně menší než 1, tyto látky mírně zeslabují magnetické pole (např. zlato, rtuť, měď, ...)
- Paramagnetické materiály – jejich relativní permeabilita je nepatrně větší než 1, tyto látky mírně zesilují magnetické pole (např. hliník, sodík, draslík, ...)
- Feromagnetické materiály – tyto materiály výrazně zesilují magnetické pole a jejich permeabilita je mnohem větší než 1 (např. nikl, kobalt, železo, ...).

Hysterezní křivka charakterizuje magnetické vlastnosti materiálů. Je to závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H .



Obr. 5 B - H charakteristika [9]

Křivka OP_1 se nazývá křivka prvotní magnetizace (na počátku je materiál nezmagnetovaný). Při nízkých hodnotách H je proces z velké části vratný (při snížení magnetické intenzity na nulu bude materiál opět nemagnetický). Při vyšších hodnotách H je proces nevratný. V bodě P_1 , kde křivka končí, dosahuje magnetizace nasycené hodnoty. Snižujeme-li intenzitu magnetického pole až na nulovou hodnotu, magnetizace nevymizí, křivka nám protne osu magnetické indukce. Magnetická indukce má v tomto bodě velikost B_r , která se nazývá remanentní pole (je to zbytková indukce magnetického pole). Pro potlačení remanentního pole musíme materiál magnetovat v opačném směru, až do hodnoty H_c , kdy hodnota magnetické indukce je nulová. Velikost intenzity H_c se nazývá koercitivní síla. Měníme-li hodnotu H dále do záporných hodnot, změní indukce B znaménko a „roste“ až do bodu P_2 , kde dojde k nasycení. Při zvyšování magnetického pole v opačném směru dospějeme znovu do stavu nasycení v bodě P_2 . Opětným snižováním magnetického pole a jeho přepólováním se dostaneme do bodu P_1 . Uzavřenou křivku nazýváme hysterezní.

Magneticky tvrdé materiály (např. tvrdé ferity, kobalt, wolfram) mají širokou hysterezní křivku a velký remanentní magnetismus B_r . Jsou tedy vhodná pro výrobu permanentních magnetů.

Magneticky měkké materiály (např. měkké železo, křemíková ocel) mají úzkou hysterezní křivku a jsou vhodná pro výrobu magnetických obvodů u transformátorů.

Permitivita je fyzikální veličina určující poměr elektrické indukce D a intenzity elektrického pole E .

$$\varepsilon = \frac{D}{E}. \quad (2.6.4)$$

Permitivita vakua je fyzikální konstanta

$$\varepsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}.$$

Relativní permeabilita je podíl permitivity daného materiálu a permitivity vakua

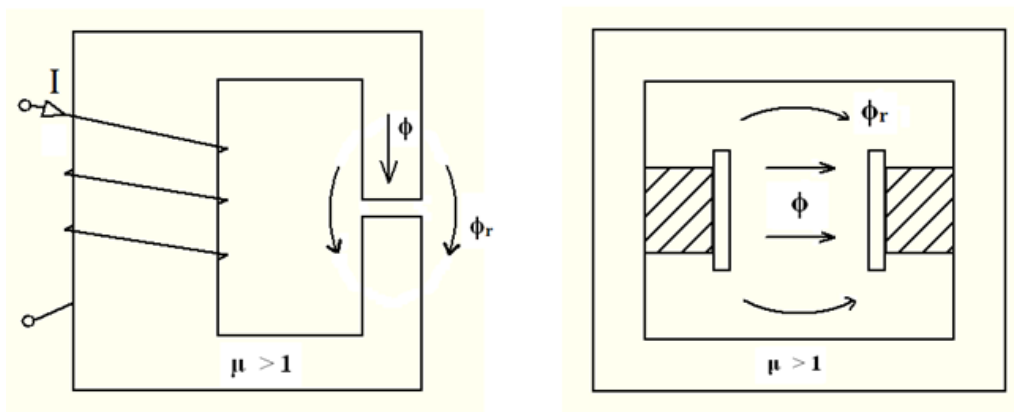
$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad (2.6.5)$$

kde ε je absolutní permitivita daného materiálu. [9], [1]

2.7 Magnetické obvody

Soustavu do sebe uzavřených nebo téměř uzavřených částí magnetik, kterými prostupuje též magnetický tok, označujeme jako magnetický obvod. Obvod je z pravidla tvořen feromagnetikem, jehož permitivita $\mu \gg 1$. Tím je magnetický tok soustředěn do požadované dráhy a jen velmi malá část tzv. rozptylový tok jde mimo ni. Jako zdroj magnetického toku je použit permanentní magnet nebo cívka, kterou prochází proud.

Pomocí magnetických obvodů zesílíme indukci B při stejném budícím proudu.



Obr. 6 Magnetický obvod [9]

2.7.1 Řešení magnetických obvodů

Magnetický obvod se obvykle skládá z několika úseků, které mají konstantní průřez S , a tedy i konstantní veličiny B a H . Magnetické obvody můžeme řešit podobně jako elektrické obvody.

Rovnice (2.7.1.1) je podobná Ohmovu zákonu $U = RI$,

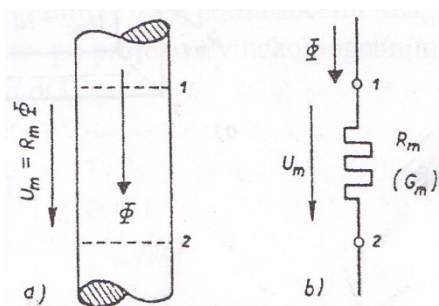
$$U_m = R_m \cdot \phi = \frac{\phi}{G_m}, \quad (2.7.1.1)$$

kde U_m je magnetické napětí mezi body 1 a 2, U_m odpovídá elektrickému napětí U ;

R_m je magnetický odpor (reluktance) dráhy toku mezi body 1 a 2 [H^{-1}], R_m je analogií elektrického odporu R ;

ϕ je magnetický tok [Wb], kterému odpovídá elektrický proud I ;

G_m je vodivost (permeance), G_m odpovídá elektrické vodivosti G .



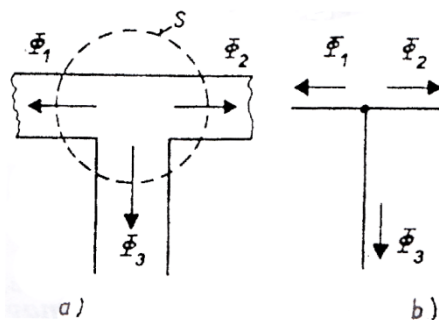
Obr. 7 Úsek magnetického obvodu [9]

První Kirchhoffův zákon platí i u rozvětveného magnetického obvodu a lze ho napsat ve tvaru

$$\sum_{k=1}^n \phi_k = 0, \quad (2.7.1.2)$$

kde ϕ_k jsou toky z jednotlivých větví magnetického obvodu stýkající se v jednom uzlu obvodu.

Rovnice (2.7.1.2) je analogická s rovnicí prvního Kirchhoffova zákona pro elektrické obvody $\sum I = 0$.



Obr. 8 Uzel magnetického obvodu [9]

Druhý Kirchhoffův zákon pro elektrické obvody $\sum U = 0$ platí i pro magnetické a lze ho napsat ve tvaru

$$\sum_{k=1}^n U_m = U_{mc} = \sum I = NI, \quad (2.7.1.3)$$

kde U_m je úbytek magnetického napětí [A] na k-tém úseku uzavřené dráhy v magnetickém obvodu,

U_{mc} je celkové magnetické napětí pro danou uzavřenou dráhu,

$\sum I$ je celkový proud $\sum I = NI$,

N je počet závitů cívky.

Pravidlem pravé ruky a smyslem toku budícího proudu určíme smysl toku ϕ . Dosazením rovnice (2.7.2.1) do rovnice (2.7.2.3) dostaneme rovnici (2.7.1.4), která odpovídá Hopkinsonovu zákonu pro smyčku magnetického obvodu magnetovaného cívkou o N závitů a proudem I :

$$\sum_{k=1}^n R_{mk} \cdot \phi_k = N \cdot I, \quad (2.7.1.4)$$

kde R_{mk} je reluktance k-tého úseku dráhy;

ϕ_k je tok k-tého úseku dráhy.

2.7.2 Magnetický odpor a magnetická vodivost

Magnetický odpor (reluktance) je odpor, který magnetický obvod klade průchodu magnetickému toku. Reluktance se počítá obdobně jako odpor u elektrického obvodu. Hodnota magnetického odporu závisí na délce vodiče l , průřezu vodiče S a relativní permeabilitě μ . Pak můžeme napsat vzorec

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot \mu_0 \cdot S} \quad [H^{-1}; m, H \cdot m^{-1}, m^2], \quad (2.7.2.1)$$

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

Magnetická vodivost (permeance) je převrácená hodnota magnetického odporu

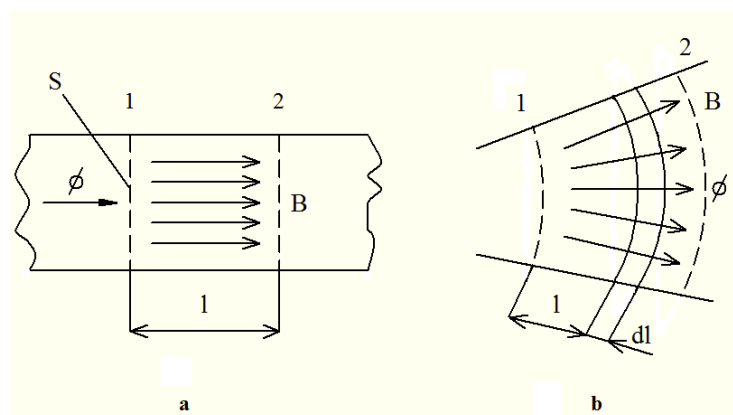
$$G_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot S}{l} \quad [H; H^{-1}; H \cdot m^{-1}, m^2, m]. \quad (2.7.2.2)$$

Rovnice (2.7.2.1) a (2.7.2.2) platí jen pro homogenní magnetické pole v uzavřené části obvodu (Obr. 9a). Je-li dráha magnetického odporu tvořena různými průřezy (nebo různým μ) v různých místech, avšak tok je rovnoměrně rozložen v každém průřezu (Obr. 9b), lze počítat reluktanci dráhy toku v úseku 1 až 2 vztahem

$$R_m = \frac{1}{\mu_0} \int_1^2 \frac{dl}{\mu \cdot S}, \quad (2.7.2.3)$$

kde dl je element délky,

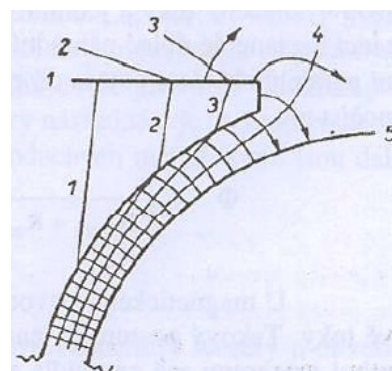
S je průřez dráhy v místě elementu dl kolmý k vektoru H a B , to je ekvipotenciální plocha v místě elementu dl .



Obr. 9 Rozložení magnetického toku [9]

2.7.3 Magnetický odpor a magnetická vodivost vzduchových mezer

Permeanci vzduchové mezery magnetického obvodu může vypočítat pomocí rovnic (2.7.2.1) až (2.7.2.3). Do výpočtu výsledné permeance se zahrne i rozptylové pole v jejím okolí (Obr. 10). Dojde-li v některé části k nasycení (horní část Obr. 10), povrch pólů není ekvipotenciálou a výpočet permeance nelze provést.



Obr. 10 Vzduchová mezera [9]

2.7.4 Metody řešení rozptylových polí

Pro přesnější řešení magnetických obvodů musíme stanovit magnetickou vodivost drah rozptylových toků, kterou nesmíme zanedbat. Obvody s permanentními magnety jsou klasickým příkladem. Přesné řešení je obtížné a někdy i nemožné, a proto se používají dvě metody přibližného řešení.

Řešení pole čtverečkovou metodou

Na (Obr. 11a) je znázorněna klínová vzduchová mezera, u které vyřešíme permeanci čtverečkovou metodou. Hlavním předpokladem je shodnost rovinných polí, která vznikla řezu rovinami xy . To je splněno, jestliže obrys řezu pólů v rovinách xy je neměnný a šířka vzduchové mezery je mnohem menší než šířka pólů. Dalším předpokladem je, že povrch feromagnetických pólů tvoří ekvipotenciální plochy, tj. obrysy pólů jsou ekvipotenciály. Indukční čáry společně s ekvipotenciálami jsou postupně zakreslovány do řezu xy (Obr. 11b) tak, aby přibližně vznikla

čtverečková síť. Po zakreslení čtverečkové sítě můžeme určit permeanci vzduchové mezery podle vzorce

$$G_m = \mu_0 \cdot \frac{m}{n} \cdot v \quad (2.7.4.1)$$

kde G_m je permeance kreslené oblasti pole [H],

m počet nakreslených paralelních trubíc [-],

n počet čtverečků řazených sériově v indukční trubici,

v hloubka obvodu v kolmém směru k nákresně [m].

Z přední a zadní části pólů vystupují rozptylové toky. S permeancí těchto toků vzorec (2.7.4.1) neuvažuje, a proto je třeba ji určit jiným způsobem.

Dle (Obr. 11b) má oblast pole $m = 17$ a $n = 4$. Hloubka obvodu je $v = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$. Nakreslená oblast má potom permeanci

$$G_m = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{17}{4} \cdot 0,1 = 5,3 \cdot 10^{-7} \text{ H} . \quad (2.7.4.2)$$

K ekvipotenciálním čarám jsou vektory B a H kolmé. Přibližnou velikost těchto vektorů ve středu čtverečku určíme podle vtaů

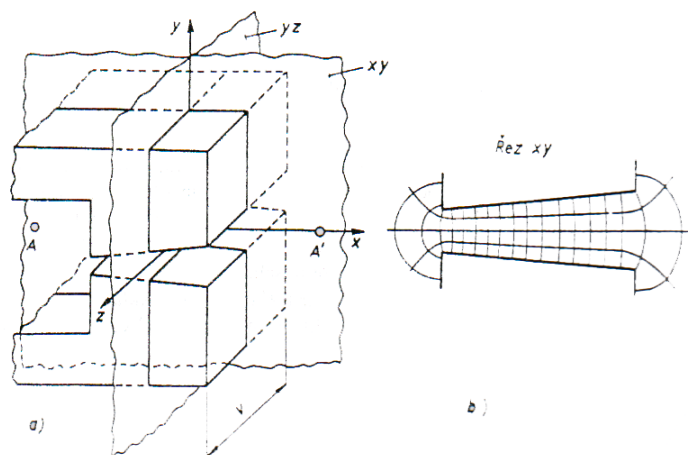
$$H = \frac{\Delta V_m}{l_c} = \frac{U_m}{n \cdot l_c}; \quad B = \mu_0 \cdot H, \quad (2.7.4.3)$$

kde ΔV_m je rozdíl magnetických potenciálů mezi ekvipotenciálními čarami ohraničujícími jeden čtvereček [A],

U_m magnetické napětí mezi póly [A],

l_c střední délka daného čtverečku ve směru indukčních čar [m].

U správně nakreslené čtverečkové sítě je rozdíl potenciálů u dvou sousedících ekvipotenciál stejný, a proto platí $\Delta V_m = U_m / n$.



Obr. 11 Klínová vzduchová mezera [9]

Řešení rozptylového pole pomocí jednoduchých indukčních trubic

Metodu je možno použít za předpokladu, že rozptylové pole daného obvodu nebo alespoň jeho části tvoří jednoduché indukční trubice. U magnetických obvodů s rovinou souměrnosti se nejnázne odhaduje průběh pole, protože i indukční trubice rozptylových toků budou souměrné podle této roviny. Indukční trubice mohou mít tvar hranolu, půlválce, čtvrtiny koule, dutého půlválce nebo čtvrtiny duté koule. Metoda není přesná, ale přibližná. [9], [1]

3 Elektromagnetické čočky elektronových mikroskopů, principy a provedení

Pohybující částicí je elektron, jehož rychlost určuje velikost urychlovacího napětí, můžeme tuto rychlost vyjádřit ze vztahu

$$eU = \frac{1}{2}mv^2, \quad (3.1)$$

kde e je náboj elektronu = $1,602 \cdot 10^{-19}$ C,
 m je hmota elektronu = $9,107 \cdot 10^{-31}$ kg,
 U je urychlovací napětí.

S každou pohybující se částicí je spojena vlnová délka, která je určena de Broglieho vztahem

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}, \quad (3.2)$$

kde h je Planckova konstanta = $6,62 \cdot 10^{-34}$ J·s,
 m je hmota částice,
 v je rychlost částice.

Po dosazení rovnice (3.1) do rovnice (3.2) dostaneme vztah

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2emU}} \quad (3.3)$$

Z rovnice (3.3) vyplývá, že vlnová délka elektronu je nepřímo závislá na urychlovacím napětí. [6]

3.1 Elektronový mikroskop

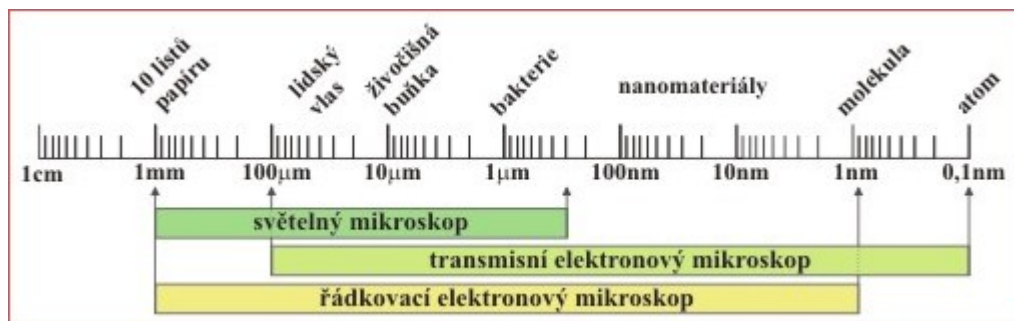
Elektronový mikroskop stejně jako optický mikroskop slouží ke zvětšení objektů. Na místo fotonů jsou zde využívány elektrony a skleněné čočky jsou nahrazeny elektromagnetickými čočkami. Elektromagnetické čočky jsou v podstatě cívky, které vytvářejí vhodně tvarované magnetické pole. Hlavním rozdílem mezi elektronovým a optickým mikroskopem je jejich rozlišovací schopnost. Elektronový mikroskop vytváří obraz vzorku pomocí proudu elektronů, které mají kratší vlnovou délku než viditelné světlo. Proto můžeme sledovat mnohem menší předměty než optickým mikroskopem. Vlnová délka elektronů je závislá na urychlovacím napětí mikroskopu. Toto napětí může dosahovat hodnot od 100 do 400 kV, vlnová délka elektronů pro 100 kV je pak $3,7 \cdot 10^{-7}$ nm a pro 400 kV je $1,6 \cdot 10^{-7}$ nm. Vlnová délka viditelného světla je 400 - 750 nm což je rozdíl až o 5 řádů. Rozlišovací schopnost špičkových mikroskopů je 0,12 – 0,17nm.

Rozdělení elektronových mikroskopů:

- Transmisní elektronový mikroskop (TEM)
- Rastrovací elektronový mikroskop (SEM) [12]

Nepostradatelným předpokladem funkce elektronového mikroskopu je dostatečné vakuum v prostoru, kterým procházejí elektrony. Úkolem vakuové techniky je snaha zabránit náhodným srážkám urychlených primárních elektronů s molekulami vzduchu, které by vedly ke změně jejich směru a energie. Pro dosažení pracovního vakua minimálně 10^{-3} Pa musí být mikroskop vybaven dostatečně výkonnými vývěvami. [6]

Typická velikost objektů, které lze pozorovat pomocí elektronového mikroskopu je znázorněna na (Obr. 12).



Obr. 12 Srovnání velikostí pozorovaných objektů [11]

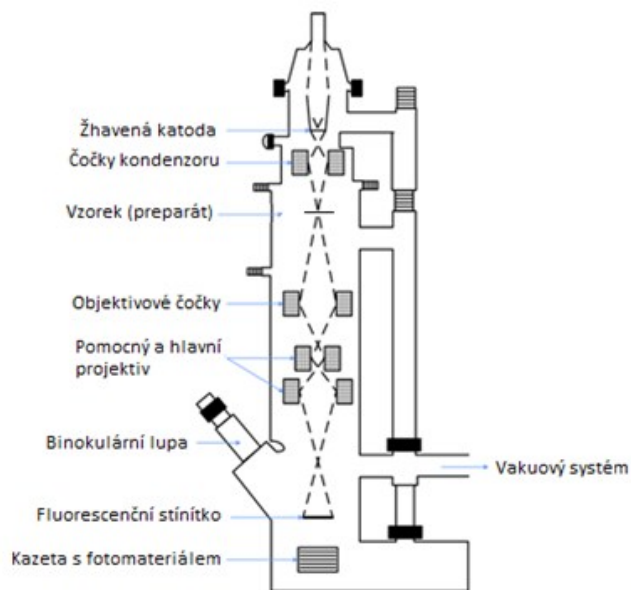
3.1.1 Transmisní elektronový mikroskop

První transmisní elektronový mikroskop sestrojil roku 1931 německý vědec E. Ruska. Původní využití elektronového mikroskopu bylo v biologii pro výzkum virů a bakterií. Následně byl využit u materiálového výzkumu pro zobrazení krystalových struktur vzorků.

Obraz preparátu je vytvořen na fluorescenčním stínítku svazkem elektronů, které prošly studovaným vzorkem. Svazek elektronů je emitován kovovou katodou, která po rozžhnutí uvolňuje elektrony urychlované elektrickým polem o napětí 100 – 400 kV. Proud elektronů prochází přes čočky kondenzoru, které soustřeďují elektrony na pozorovaný předmět (preparát). Vrstva preparátu musí být velmi tenká, asi 100 nm, aby nedošlo k pohlcování elektronů. Dále elektrony procházejí objektivem a vytvoří první elektronový obraz. Část tohoto obrazu se projektivem znovu zvětší a výsledný obraz se promítne buď na stínítko pokryté luminoforem nebo na fotografickou desku či film.

Transmisní elektronový mikroskop (Obr. 13) se skládá ze čtyř hlavních částí:

- tubusu s elektronovou optikou,
- vakuového systému,
- elektroniky (napájení čoček pro zaostřování a vychylování paprsku elektronů a zdroj vysokého napětí pro zdroj elektronů),
- softwaru. [12]



Obr. 13 Transmisní elektronový mikroskop [11]

Osvětlovací soustava

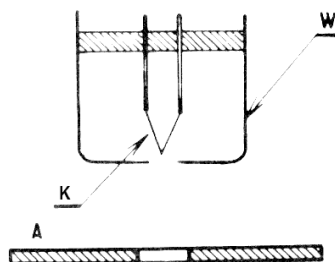
Osvětlovací soustava elektronového mikroskopu je část přístroje, ve které se vytváří a ovládá svazek elektronů použitých k „osvětlení“ preparátu. Musí vyhovovat těmto požadavkům:

- Svazek elektronových paprsků musí být dostatečně intenzivní, aby bylo dovoleno pozorování a fotografování při velkých zvětšeních.
- Úhlová apertura svazku musí být proměnná, aby mohla být nastavena její optimální hodnota pro pozorování a snímkování.
- Průřez svazku má být co nejmenší, aby nedocházelo k bombardování velké části preparátu.

Osvětlovací soustavu elektronového mikroskopu tvoří elektronová tryska a čočky kondenzoru. [6], [12]

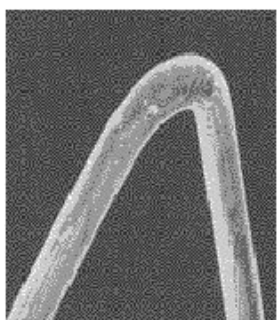
Elektronová tryska

Elektronová tryska (Obr. 14) je vlastním zdrojem elektronů. Skládá se z katody K, Wehneltova válce W a anody A.

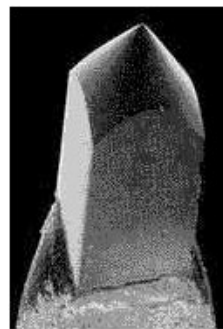


Obr. 14 Elektronová tryska [12]

Většina elektronových mikroskopů využívá jako katodu wolframové vlákno tvaru V (Obr. 15), které je přímo žhaveno na teplotu 2800 °C. V posledních letech se začaly využívat lepší zdroje elektronů. Jedním z nich je elektronová tryska na základě hexaboridu lanthanu (LaB₆), (Obr. 16), která emituje 10x více elektronů než wolfram žhavený na stejnou teplotu. Dalším novějším zdrojem elektronů je tryska emitující elektrony vlivem elektrického pole (field emission gun - FEG). U FEG trysky jsou elektrony emitovány z velmi ostrého hrotu silným magnetickým polem, které nám umožňuje dosáhnout větší elektronové hustoty.

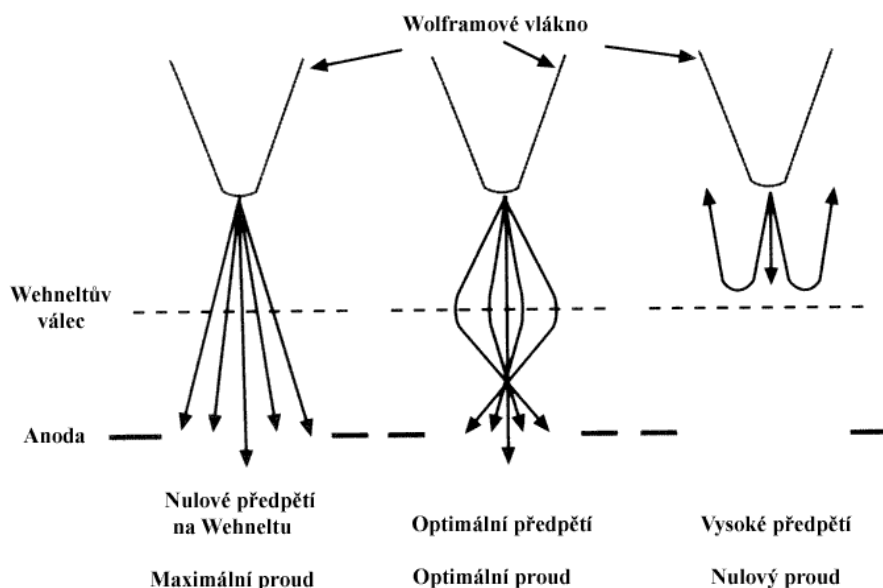


Obr. 15 Wolframové vlákno [12]



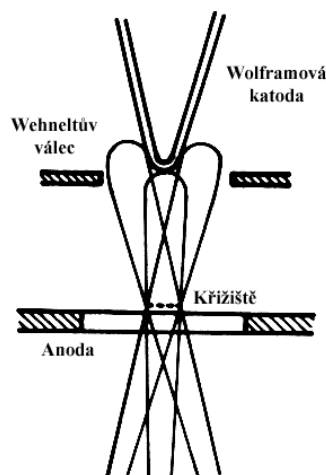
Obr. 16 Krystal LaB6 [12]

Hlavním úkolem elektronového zdroje je, aby poskytoval souvislý svazek elektronů. Elektrony by měly vycházet z bodového zdroje a měly by mít stejnou energii. Katoda emituje elektrony, které přitahuje anoda s kruhovým otvorem ve svém středu. Anoda dodá elektronům dostatečné zrychlení na průlet tubusem mikroskopu. Vlákno katody je vystředěno do otvoru Wehneltova válce, který má záporné předpětí. Působením předpětí (Obr. 17) se okolo emitujícího hrotu katody vytvoří mrak elektronů. Ty jsou postupně odsávány z otvoru Wehneltova válce k anodě. Elektrony, které mají správný směr, získají dostatečnou rychlost, aby prolétly dále do tubusu. Tímto způsobem je zajištěno dostatečné množství elektronů s přibližně stejnou počáteční energií.



Obr. 17 Vliv předpětí na proud elektronů [12]

Elektronová tryska je v podstatě imersní elektrostatická čočka. Na (Obr. 18) jsou znázorněny dráhy elektronů opouštějící různé části Wolframové katody. Blízko kruhového otvoru v anodě se elektrony v místě zvaném „křížičště“ střeťávají a vytvářejí nejužší průřez celého svazku. Křížičště slouží jako fiktivní katoda, ze které vyletují elektrony více méně přímočaře. Je to tedy zdroj elektronů, jehož poloha se mění centrováním katody. Protože hrot vlákna není ideálním bodovým zdrojem, má průřez svazku elektronů vycházejícího z katody oválný tvar.

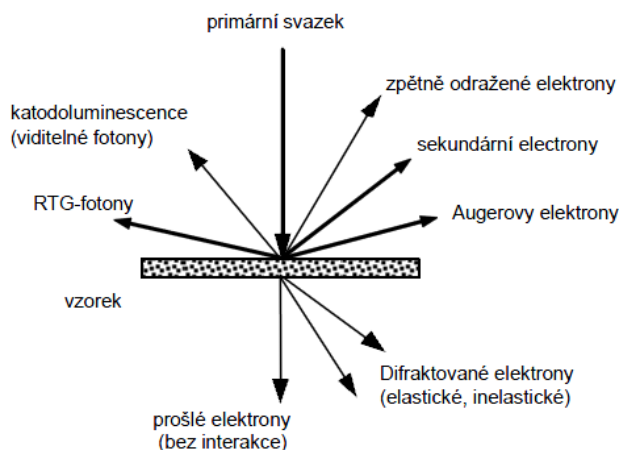


Obr. 18 Vznik křížičště [12]

Dopad elektronového svazku na preparát

Při dopadu elektronů na preparát může nastat několik příkladů (Obr. 19):

- Amplitudový kontrast obrazu – některé elektrony jsou absorbovány vlivem tloušťky a složení vzorku.
- Fázový kontrast v obraze – další elektrony jsou rozptýleny pod malými úhly, jejichž velikost závisí na složení vzorku.
- Difrakční kontrast obrazu – u krystalických vzorků jsou elektrony rozptýleny do různých směrů, které jsou v závislosti na krystalické struktuře.
- Zpětně odražené elektrony – z dopadajících elektronů jsou některé odrazeny.
- Sekundární elektrony – vlivem dopadajících elektronů může vzorek sám emitovat elektrony.
- RTG – elektrony dopadající na preparát mohou způsobit to, že vzorek může vyzařovat rentgenové paprsky.
- Katodoluminescence – v některých případech mohou elektrony u vzorku způsobit emisi fotonů (nebo světla).



Obr. 19 Dopad elektronů na vzorek [12]

Záznam obrazu

Pro zobrazení elektronů, které prošly vzorkem a zobrazovací soustavou, je třeba informaci, kterou nesou, převést do oblasti viditelného světla. Proto se na dno tubusu umísťuje stínítko pokryté ZnS (sulfid zinečnatý), který je schopen v závislosti na energii a množství dopadajících elektronů emitovat světlo o vlnové délce 450 nm. Díky nečistotám je emise elektronů posunuta blíže k zelenému světlu s vlnovou délkou 550 nm.

V současné době se obraz nejčastěji zaznamenává na speciální fotografický materiál nebo digitálně pomocí CCD kamery. Fotografický záznam obrazu ustupuje do pozadí, do popředí se dostávají CCD kamery.

Záznam na fotografický materiál

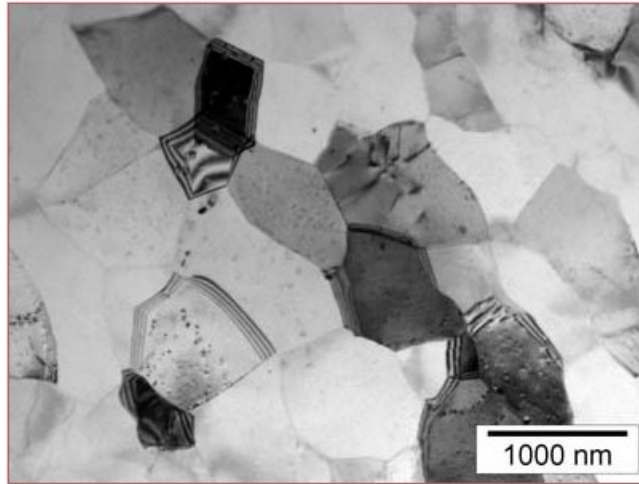
Fotografický film je uložen ve fotografické komoře, která je umístěna pod stínítkem transmisního elektronového mikroskopu. Film musí být vyroben z materiálu, který je citlivý v oblasti velmi krátkých vln a musí odolat vysokému vakuu v mikroskopu. Při pořizování záznamu se odkloní stínítko, najede pouzdro s filmem, na který přímo dopadají elektrony. Po expozici zářením dojde ke vzniku latentního obrazu. Po vyvolání exponovaná místa zčernají, přičemž míra zčernání závisí na intenzitě osvětlení.

Digitální záznam

Do dráhy elektronového svazku v oblasti pozorování obrazu je vložen detektor, který zaznamená množství primárních elektronů a jejich energii v závislosti na místě dopadu. Ideální detektor by měl pracovat bez šumu a přidání degradace rozlišení pozorovaného elektronového obrazu. Měl by mít velký počet pixelů, široký dynamický rozsah a výbornou linearitu.

Jde o přímý přenos obrazu v digitální podobě na obrazovku počítače pro další zpracování a analýzu. Nejčastěji se používají dva typy CCD kamer, a to Moradu a KeenView. [12], [2]

Na (Obr. 20) je vyobrazena mikrostruktura slitiny hliníku, kde můžeme pozorovat jednotlivé krystaly nazývané „zrna“.



Obr. 20 Mikrostruktura slitiny hliníku [11]

3.1.2 Rastrovací elektronový mikroskop

Rastrovací elektronový mikroskop (Obr. 21) je určen k pozorování povrchů různých objektů. Tenký svazek elektronů postupně dopadá na všechny místa vzorku a to po řádcích. Výsledný obraz je tvořen pomocí odražených nebo sekundárních elektronů. Při interakci primárního svazku se vzorkem vznikají další signály, např. Augerovy elektrony, RTG – fotony, katodoluminiscence, které nesou další informace o vzorku (Obr. 19).

Ve srovnání s transmisním elektronovým mikroskopem má rastrovací elektronový mikroskop poloviční délku tubusu. Je to dáno tím, že u rastrovacího elektronového mikroskopu se detekují signály, které primární svazek při dopadu uvolnil nad povrch preparátu. Není tedy třeba soustavy čoček, které u transmisního elektronového mikroskopu tvoří zobrazovací soustavu ve spodní části tubusu. Místo toho je rastrovací elektronový mikroskop vybaven detektory sekundárních a odražených elektronů. Dále je tvořen elektronikou pro zesílení a zpracování signálu a tvorbu obrazu.



Obr. 21 Rastrovací elektronový mikroskop

Zdrojem elektronů je stejně jako u transmisního elektronového mikroskopu přímo žhavené wolframové vlákno. Životnost katody je výrazně nižší než u TEM z důvodu větší emise elektronů a předžhávání. Rozlišovací schopnost u SEM závisí na průměru zfokusovaného primárního svazku elektronů dopadajících na povrch vzorku a hodnota tohoto průměru je zase ovlivněna průměrem katody. Proto rozlišovací schopnost SEM s wolframovou přímo žhavenou katodou je mezi 10 až 15 nm.

Stejně jako u TEM jsou primární elektrony urychlovány potenciálem mezi katodou a anodou, která má ve svém středu kruhový otvor. Tímto otvorem procházejí primární elektrony do soustavy elektromagnetických čoček. Pro biologické vzorky se používá urychlovací napětí 25 kV.

Soustava čoček je tvořena jednou nebo dvěma kondenzorovými čočkami a objektivovou čočkou. Hlavním úkolem soustavy čoček je co nejvíce zmenšit průměr svazku elektronů dopadajících na povrch preparátu. Po průchodu soustavou čoček je primární svazek elektronů před dopadem na povrch vzorku rozpořehován vychylovacími cívkami tak, že rastruje (řádkuje) malou plochu. Synchronně s primárním svazkem elektronů rastruje i paprsek, který tvoří obraz na obrazovce mikroskopu. Počet řádků je možné měnit od desítek do několika tisíc a zároveň lze měnit i rychlost přeběhu paprsku v řádku. Pro fotografický záznam vybíráme co nejpomalejší rychlost přeběhu. Získání jednoho celého obrazu potom může trvat 30, 60 i 120 s.

Detekce odražených a sekundárních elektronů

Při interakci primárního svazku elektronů s povrchem vzorku dochází k uvolnění sekundárních elektronů, které jsou zachyceny detektorem. Informace získané zachycením sekundárních elektronů jsou přeneseny na obrazovku mikroskopu.

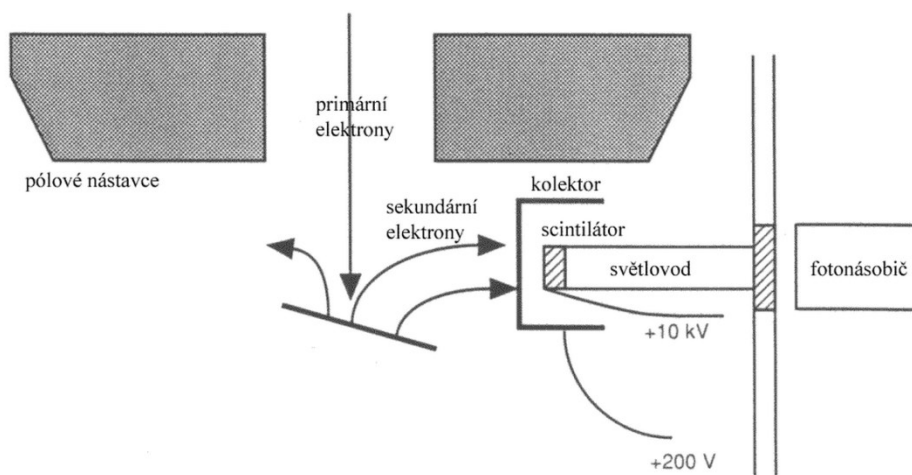
Detektor sekundárních elektronů by měl vyhovovat následujícím požadavkům:

- Vysoká citlivost – na detektor dopadá 10^6 – 10^9 elektronů za sekundu.
- Účinnost – omezuje konečnou kvalitu obrazu.

- Široký dynamický rozsah – signál se může měnit z bodu na bod v rozpětí 1:100 i větším.
- Malá velikost – pro velká zvětšení je třeba pracovat s malou pracovní vzdáleností, tedy co nejbliže elektromagnetickým čočkám.
- Odolnost – proti tlaku, vlhkosti, světlu.
- Cena a životnost.

Detektor sekundárních elektronů podle Everhart – Thornley (Obr. 22)

Patří mezi nejčastěji používané detektory. Je složen ze scintilátoru, který po dopadu elektronů uvolní záblesk světla ze středu viditelné oblasti (550 – 650 nm), jehož intenzita se rovná energii elektronů, které ho vyvolaly. Na přední straně scintilátoru je kovový film o potenciálu 10 kV, který urychlí dopadající elektrony. Takto urychlené elektrony pak mají dostatečnou energii pro vyvolání světelného impulsu. Světlo je dále vedeno světlovodem a komoru SEM opustí průchodem křemenným okénkem. Fotonásobič, který je umístěn mimo vakuum zachytí světelný signál a převede ho na elektrický, přičemž dojde k zesílení signálu zhruba 1 000 až 1 000 000 krát. Detektor se umísťuje do Faradayovy klece o předpětí 200 V, aby napětí na scintilátoru negativně neovlivňovalo dopadající primární svazek elektronů. Při tomto uspořádání dopadne na detektor 60 % sekundárních elektronů a nedojde k ovlivnění primárního svazku elektronů. Nevýhodou detektoru je postupná ztráta citlivosti.



Obr. 22 Schéma Everhart - Thornleyova detektoru sekundárních elektronů [12]

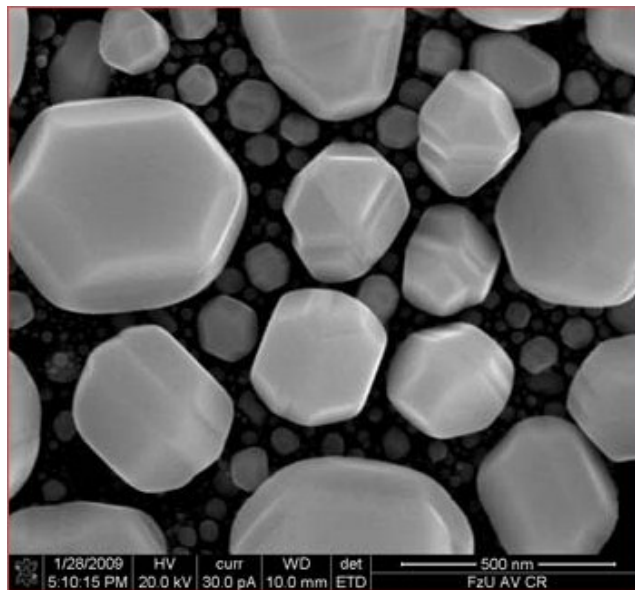
Detekce zpětně odražených elektronů

Jedním z typů je výše popsany Everhart - Thornley detektor v uspořádání, kdy scintilátor detektoru je připevněn na okraj pólových nástavců poslední elektromagnetické čočky. Jeho účinnost záchytu přesahuje 50 %. Dalším používaným typem je polovodičový detektor, který využívá p-n přechodu nebo Schottkyho diodu.

Záznam obrazu

Rastrovací elektronový mikroskop je vybaven pozorovací obrazovkou a fotomonitorem, ke kterému je připojen fotoaparát. Fotografie je tedy tradičním záznamem obrazu u SEM. Pro vytvoření obrazu na fotografický film se používají fotony, takže můžeme použít normální fotografický materiál. Novější SEM se dodávají s digitálním záznamem obrazu, který lze dále upravovat. [12], [2]

Příklad obrazu z rastrovacího mikroskopu je uveden na (Obr. 23), kde můžeme sledovat částice zlata na uhlíkové podložce.

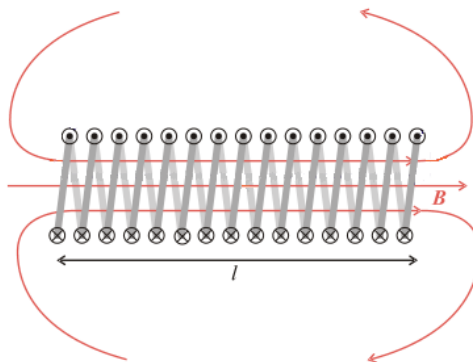


Obr. 23 Částice zlata na uhlíkové podložce [11]

3.2 Elektromagnetické čočky elektronových mikroskopů

Jednou z hlavních částí elektronového mikroskopu jsou elektromagnetické čočky, které nebyly v předchozí kapitole (3.1) popsány. V následující kapitole vysvětlíme jejich princip a provedení.

Elektromagnetická čočka je v podstatě cívka, která průchodem proudu vytváří vhodně tvarované magnetické pole. Vytvořené magnetické pole pak působí na dráhu letícího elektronu. Nejjednodušší elektromagnetickou čočkou je solenoid – kruhová cívka, jejichž siločáry magnetického pole jsou uvnitř cívky rovnoběžné s osou cívky a vně zakřivené (Obr. 24).

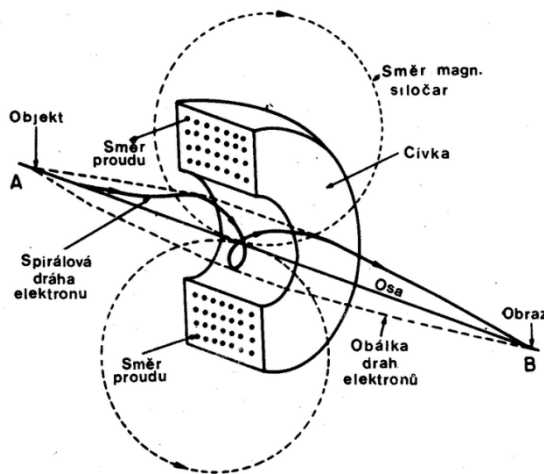


Obr. 24 Znárodnění siločar solenoidu

Solenoidem o N závitách a délce l protéká elektrický proud. Při zanedbání okrajových jevů můžeme použít Ampérův zákon a určit magnetické pole vzorcem

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l} \tag{3.2.1}$$

Působení magnetického pole solenoidu na dráhu elektronů je znázorněno na (Obr. 25). Elektrony vycházejí z bodového zdroje A, které po zakřivení jejich drah v magnetickém poli cívky opět protínají její osu v bodě B.



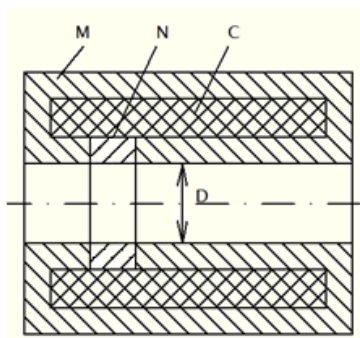
Obr. 25 Působení magnetického pole na elektron [12]

Pro zvýšení účinnosti jednoduchého solenoidu je cívka obklopena materiálem z měkkého železa, které je schopno koncentrovat siločáry do prostoru pólových nástavců, kde je přerušen magnetický obvod. Silnější magnetické pole cívky znamená kratší ohniskovou délku a tedy výkonnější a kvalitnější čočku. [12]

U elektronového mikroskopu obvykle nalezneme dva typy magnetických čoček. Na rozdíl od objektivu nebo projektivu, jež pracují s velmi malými ohniskovými dálkami, se u kondenzoru obvykle používá poměrně velké ohniskové dálky, aby se dostalo velké přímé zvětšení při přijatelné délce optické soustavy.

Magnetickou čočkou chápeme rotačně symetrické magnetické pole, které má fokusační účinky. Pod pojmem čočka si můžeme představit nejen vlastní magnetické pole, nýbrž i pólové nástavce a cívku, kterou protéká budící proud. Velkou výhodou magnetických čoček oproti elektrostatickým je to, že se jejich ohnisková dálka může měnit jednoduše změnou intenzity magnetického pole, tj. změnou budícího proudu.

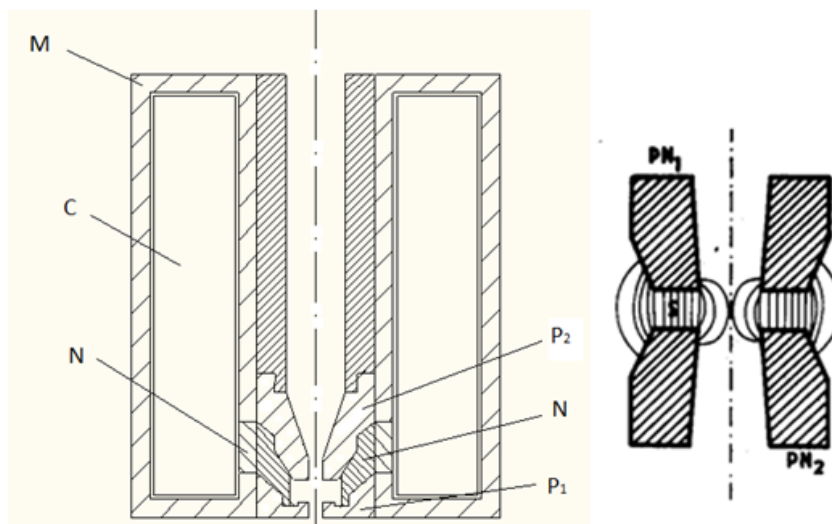
Jako příklad čočky o poměrně velké ohniskové délce si můžeme uvést kondenzor (Obr. 26). Cívka C, kterou protéká budící proud je uzavřena do železného pláště M, který je v místě N přerušen vložkou z nemagnetického materiálu (mosaz). Magnetické pole uzavírající se mezi oběma částmi obvodu je tedy vlastní čočkou. Minimální dosažitelná ohnisková dálka je zhruba rovna vnitřnímu průměru D, tj. obvykle v řádu cm.



Obr. 26 Schématický řez kondenzorem [6]

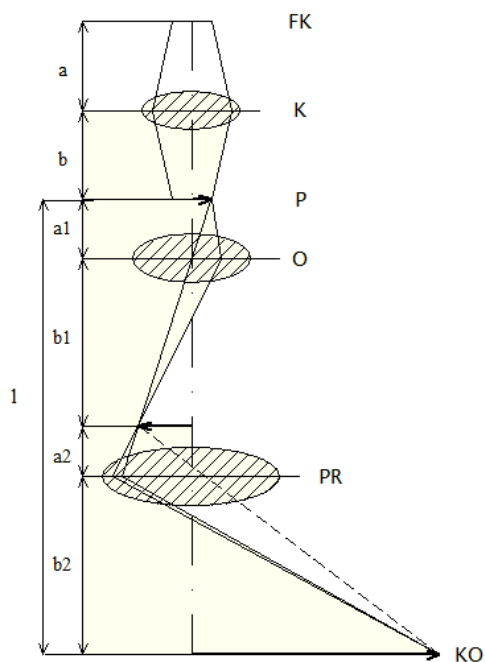
Pro velké přímé zvětšení je však zapotřebí čoček o mnohem menší ohniskové délce, aby optická soustava nebyla příliš rozměrná. Uvedeného požadavku dosáhneme tak, že zvýšíme intenzitu pole.

Zvýšenou intenzitu pole získáme tím, že pole koncentrujeme do menšího prostoru mezi pólové nástavce. Tak dostaneme ohniskové délky v řádu 1 mm. Řez čočkou používanou jako objektiv můžeme vidět na (Obr. 27). Do železného pláště M je uzavřena cívka C protékaná budícím proudem. Magnetický obvod je v místě N přerušen nemagnetickým materiálem (mosaznou vložkou), takže magnetický tok se uzavírá mezi pólovými nástavci P_1 a P_2 . Pólové nástavce musí být zhotoveny ze speciálního materiálu, protože na nich závisí do značné míry kvalita čočky.



Obr. 27 Schématický řez objektivem a znázornění siločar S mezi pólovými nástavci [6], [12]

V jednoduchosti lze říct, že elektrony opouštějící katodu jsou urychlovány elektrostatickým polem mezi katodou a anodou. Kondenzor K soustřeďuje elektrony na preparát P . Objektiv O vyvolá zvětšený obraz pozorovaného předmětu, jehož část se dále zvětšuje projektivem PR a promítá na stínítko KO .



Obr. 28 Paprskový diagram dvoustupňového elektronového mikroskopu [6]

Ve většině případů pracujeme s velkým zvětšením každého stupně, můžeme pro zjednodušení předpokládat, že předmět se nachází v ohnisku, takže platí $f \approx a$ a zvětšení

$Z = \frac{b}{a} \approx \frac{b}{f}$. Celkové zvětšení přístroje Z_{12} se rovná součinu zvětšení objektivu Z_1 a projektivu Z_2 .

$$Z_{12} = Z_1 Z_2 \approx \frac{b_1}{f_1} \frac{b_2}{f_2} \quad (3.2.2)$$

Celkové zvětšení dosahuje maximální hodnoty, jestliže $b_1 = b_2 \approx l/2$, kde l je vzdálenost od preparátu ke konečnému obrazu. Pak můžeme dostat maximální zvětšení

$$Z = \frac{l^2}{4f_1 f_2}. \quad (3.2.3)$$

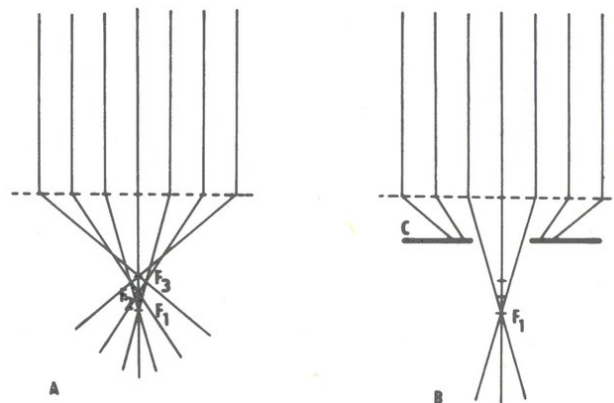
Vzdálenost mezi objektivem a konečným obrazem u dvoustupňového typu je $l = 500$ mm. Mezi katodou a preparátem je také vzdálenost 500 mm, aby bylo dostatek místa pro centrovací zařízení. S průchodkou pro vysoké napětí a kazetou na snímkování pak vzroste celková délka dvoustupňové optické soustavy asi na 150 cm. Osvětlovací soustavy dovolují přímé zvětšení až 100 000x. [6], [4], [5], [3]

3.2.1 Vady elektromagnetických čoček

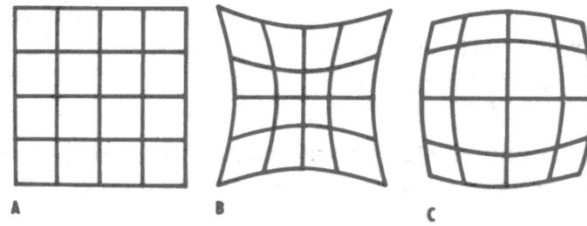
Elektronové čočky, tj. rotačně symetrická elektrostatická nebo magnetická pole jsou velmi nedokonalé a mají optické vady.

Druhy optických vad:

- Sférická vada – čočka není schopna zaostřit všechny elektrony vycházející z bodového zdroje opět do jednoho bodu. Elektrony, které projdou vnější částí čočky, jsou zaostřovány do bodu, který leží blíže k čočce, než elektrony, které procházejí čočkou v těsné blízkosti optické osy (Obr. 29a). Důsledkem sférické vady je, že zvětšení ve středu obrazu je jiné než na jeho krajích. Pomocí clony (Obr. 29b), která odstraní okrajové paprsky elektronů, se omezuje vliv této vady.



Obr. 29 Vznik sférické vady a její potlačení pomocí clony [12]



Obr. 30 Deformace obrazu sférickou vadou, kde A je nezkreslený obraz [12]

- Chromatická vada – je způsobena rozdílnou energií elektronů ve svazku. V magnetickém poli cívek jsou pomalejší elektrony o větší vlnové délce vychylovány jinak a protínají osu cívkou v jiném bodě, než elektrony s vyšší rychlostí. Vliv této vady snížíme tím, že zlepšíme koherentnost elektronového svazku, čehož lze dosáhnout stabilizací urychlovacího napětí mikroskopu.
- Osový astigmatismus – je způsoben nesymetrií magnetického pole. Následkem toho elektrony procházejí čočkou v různých rovinách a mají různé ohnisko. Astigmatismus je nejčastěji způsoben nečistotami, které se mohou vyskytovat na pólových nástavcích čoček, clonách apod. Nečistoty se nabíjejí a svým elektrickým polem způsobují změny v drahách elektronů. Vada se eliminuje pomocí magnetického pole stigmátoru.

[12]

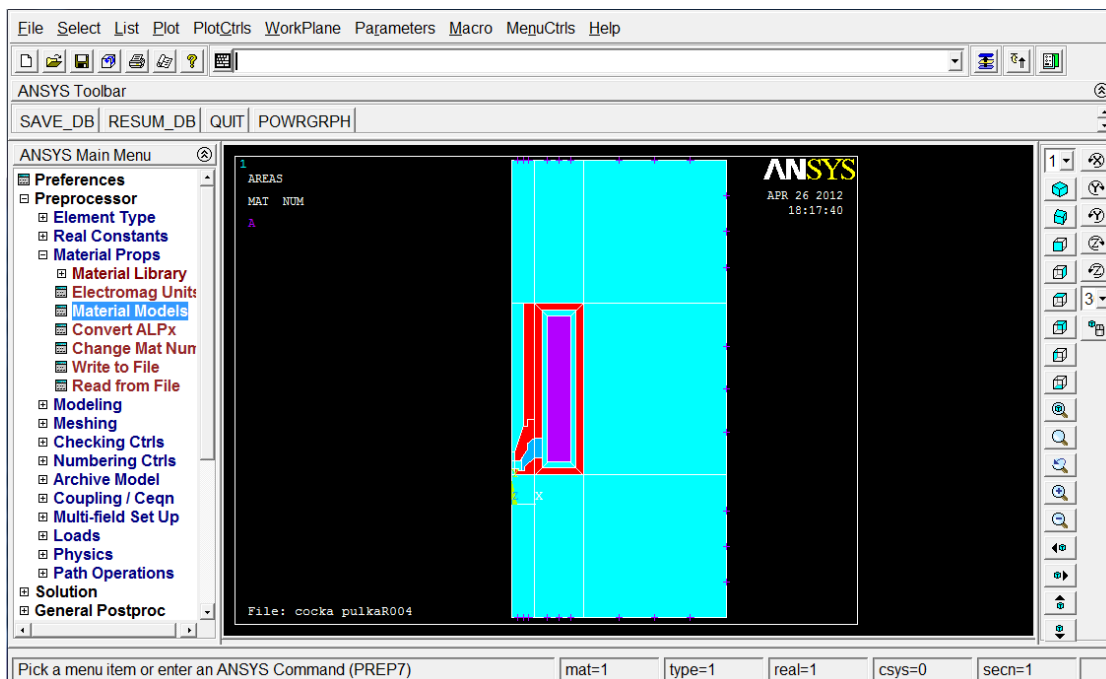
4 Tvorba modelu a simulace elektromagnetického pole typové čočky.

Hlavním úkolem diplomové práce je zjistit rozložení elektromagnetického pole typové čočky. Jedná se o smyšlenou čočku vytvořenou podle znalostí a informací z dostupné literatury. Cívka je tvořena 1000 závitů a prochází jí proud o hodnotě 1 A. Pólové nástavce a plášť jsou zhotoveny z měkkého železa, cívka vyrobena z mědi a vložka z mosazi. Celá čočka je vložena do vakua. Veškeré modelování a výpočty budou prováděny v programu ANSYS v 12.1 a pro nakreslení modelu byl využit program AutoCAD 2009.

Programy použité pro tvorbu modelu

AutoCAD 2009 – je software pro 2D a 3D projektování a konstruování, který byl vyvinut firmou Autodesk. Firma nabízí sadu profesionálních aplikací určených pro oblasti stavitelství, strojírenství, infrastruktury a obecného navrhování. [14]

ANSYS v 12.1 – je software vyvíjený společností ANSYS Inc., který umožňuje řešení problematik všech oborů fyziky tj. proudění tepla, stavební mechaniky, proudění tekutin a elektromagnetismu. Pomocí ANSYSu dokážeme řešit i ty nejvíce komplikované a složité problémy.



Obr. 31 Vzhled programu ANSYS

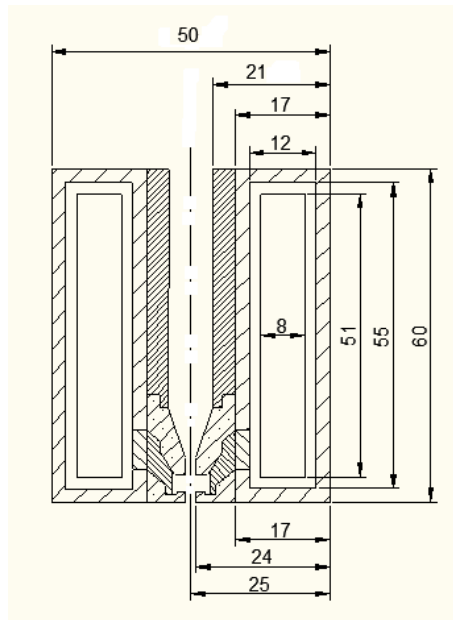
Metoda konečných prvků

Principem metody je rozdělit navržený objekt, který je předmětem výpočtu, na určitý počet elementů, které vyplňují s dostatečnou přesností jeho tvar. Jednotlivé elementy jsou navzájem

spojeny uzly, které mají přesně definované souřadnice. Hodnoty neznámých parametrů jsou počítány právě v těchto uzlech.

4.1 Tvorba modelu elektromagnetické čočky

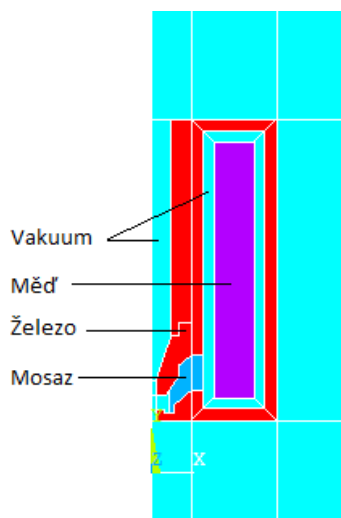
V programu AutoCAD nejprve nakreslíme elektromagnetickou čočku dle (Obr. 32). Rozměry elektromagnetické čočky jsou smyšlené a tvar je navržen podle dostupné literatury [6].



Obr. 32 Náčres elektromagnetické čočky

Jednotlivé objekty sjednotíme do jednoho objektu a vysuneme o 1 mm pro lepší import do programu ANSYS, kde se bude provádět veškerá analýza a simulace.

V ANSYSu budeme modelovat elektromagnetickou čočku včetně okolního prostředí (vakua) pro zachování reálných podmínek (Obr. 33). Ve skutečnosti se magnetický tok uzavírá i v tomto prostředí.



Obr. 33 Specifikace materiálu v ANSYSu

Před samotnou simulací musíme vymazat všechny objemy, které vznikly při exportu z programu AutoCAD. Dále je nutné nadefinovat relativní permeabilitu jednotlivých materiálů (prostředí), které se v objektu nacházejí. Což se provede pomocí volby Material Models, kde jsme nadefinovaly 4 druhy materiálu (prostředí) viz (Tab. 1).

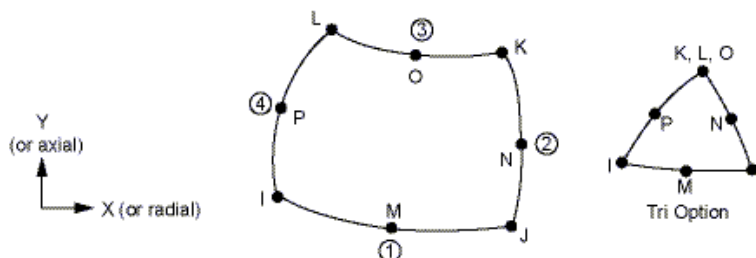
Tab. 1 Použité materiály a jejich relativní permeabilita

Druh materiálu (prostředí)	Relativní permeabilita
vakuum	1
měď	1
měkké železo	3000
mosaz	1

Element použitý pro tvorbu modelu

Nalezneme v sekci Element Type, Add/Edit/delete. Pro volbu jednotlivých elementů do modelu byl v našem případě zvolen element PLANE53, kterým můžeme modelovat 2-D magnetické pole.

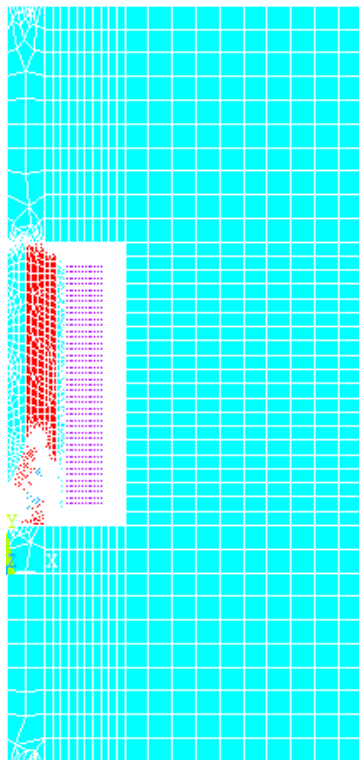
Element je definován 8 uzly a má až 4 stupně volnosti na uzlu: magnetický vektorový potenciál (AZ), napětí (Volt), elektrický proud (CURR) a elektromotorická síla (EMF). PLANE53 je založen na magnetickém vektorovém potenciálu a vztahuje se na analýzu nízkofrekvenčního magnetického pole. [15]



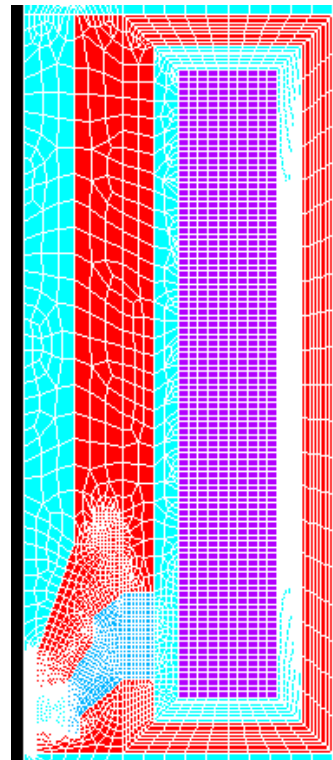
Obr. 34 Geometrie PLANE53 [15]

Meshování (Sít'ování)

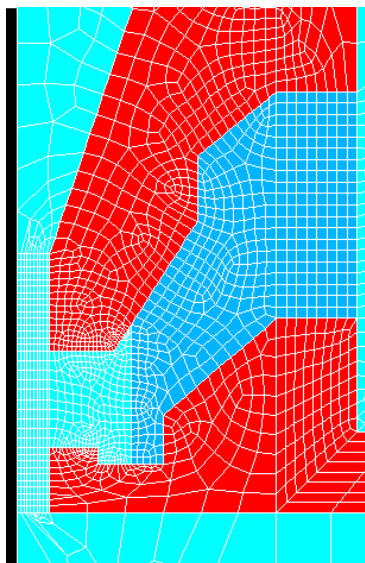
Proces meshování je velice důležitý, protože na něm závisí přesnost výsledku. U elementu, kde předpokládáme velké změny je meshování provedeno hustěji a naopak (Obr. 35 až 37). Díky tomu dostaneme přesnější výsledek.



Obr. 35 Meshování pro celý objekt



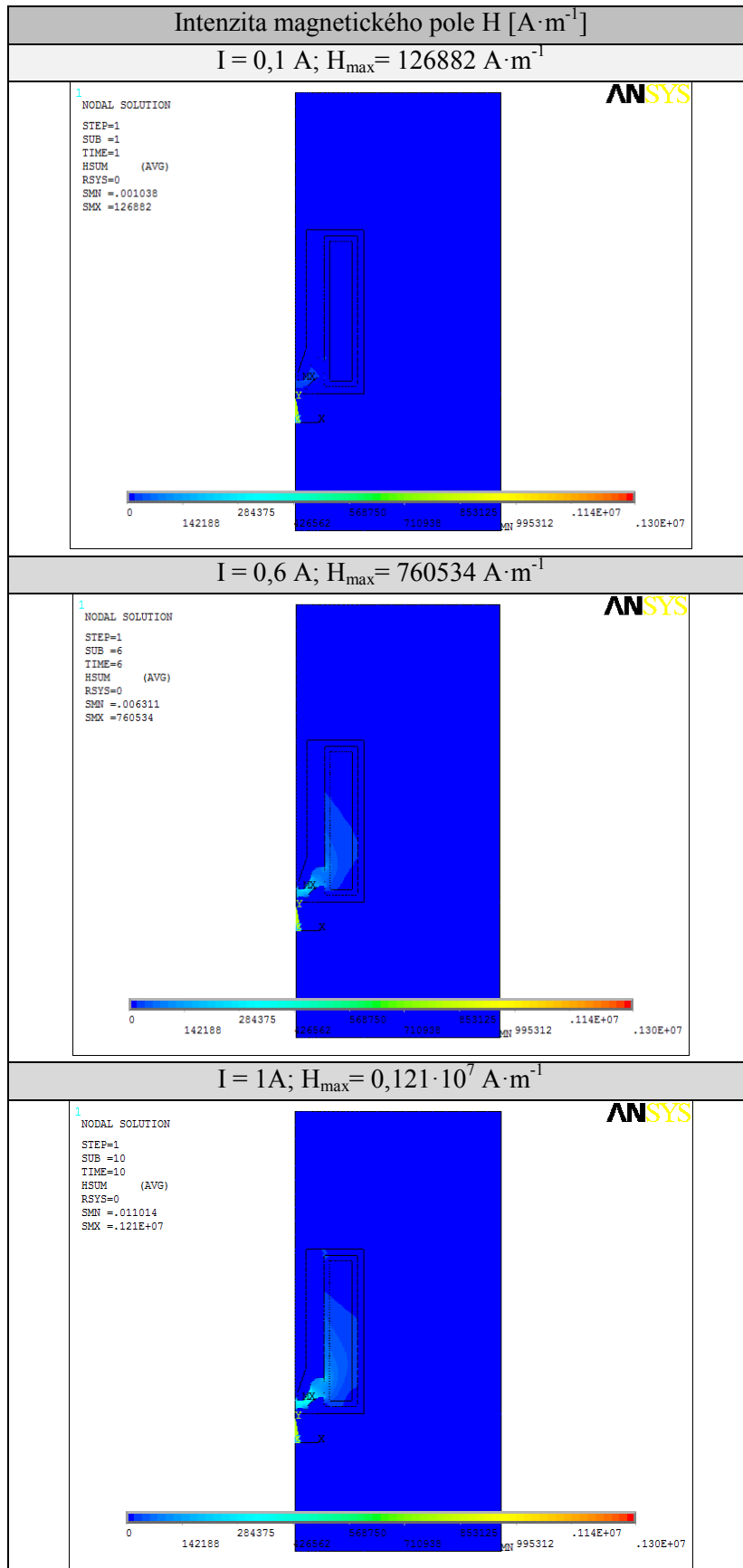
Obr. 36 Meshování pro čočku



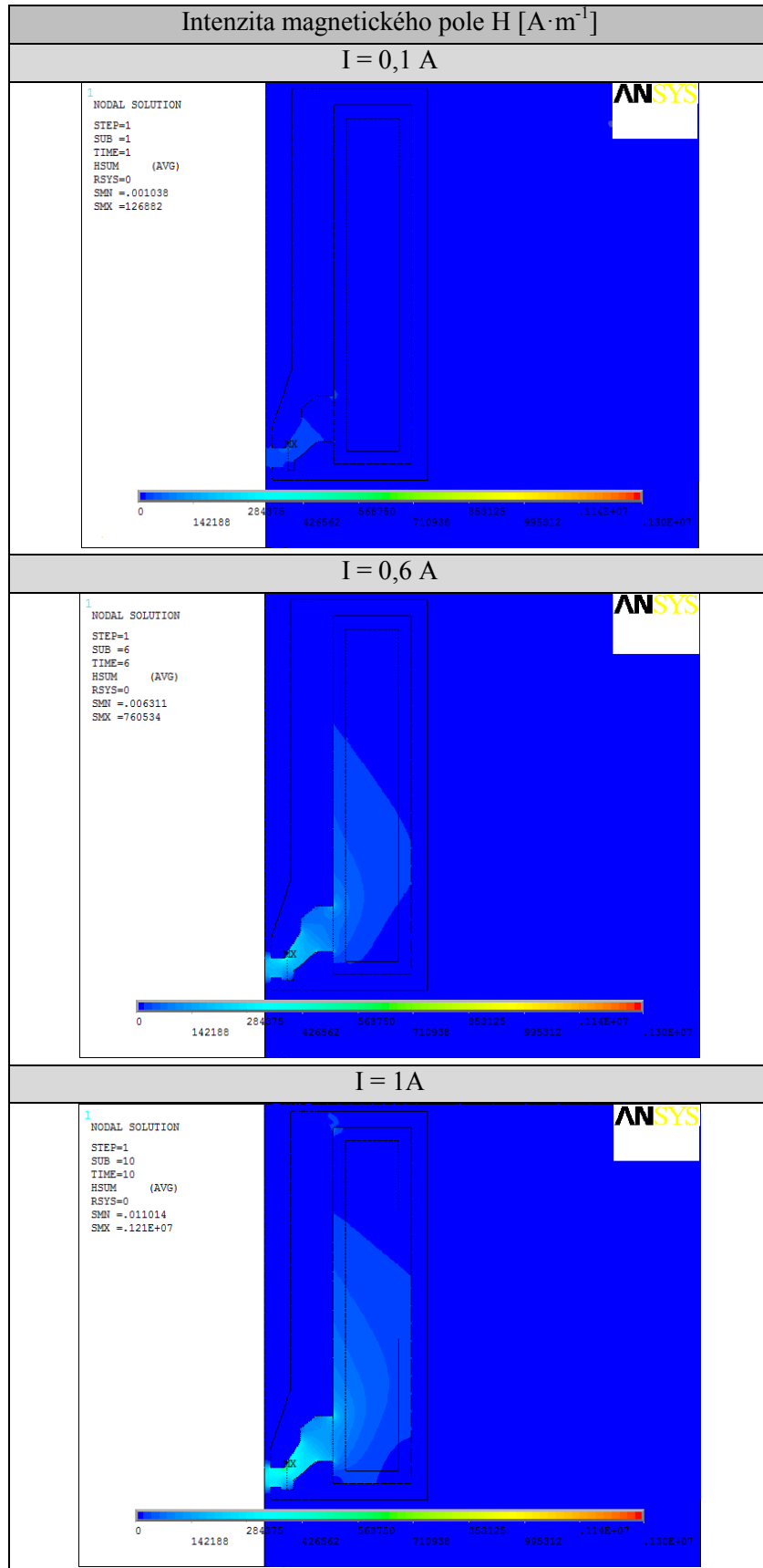
Obr. 37 Detail vymeshování pro oblast pólových nástavců

Po dostatečně kvalitním nameshování je model připraven k výpočtu a znázornění intenzity magnetického pole a hustoty magnetického toku (magnetické indukce). Simulace je rozdělena do deseti kroků podle proudu, který nabývá hodnot od 0 – 1 A.

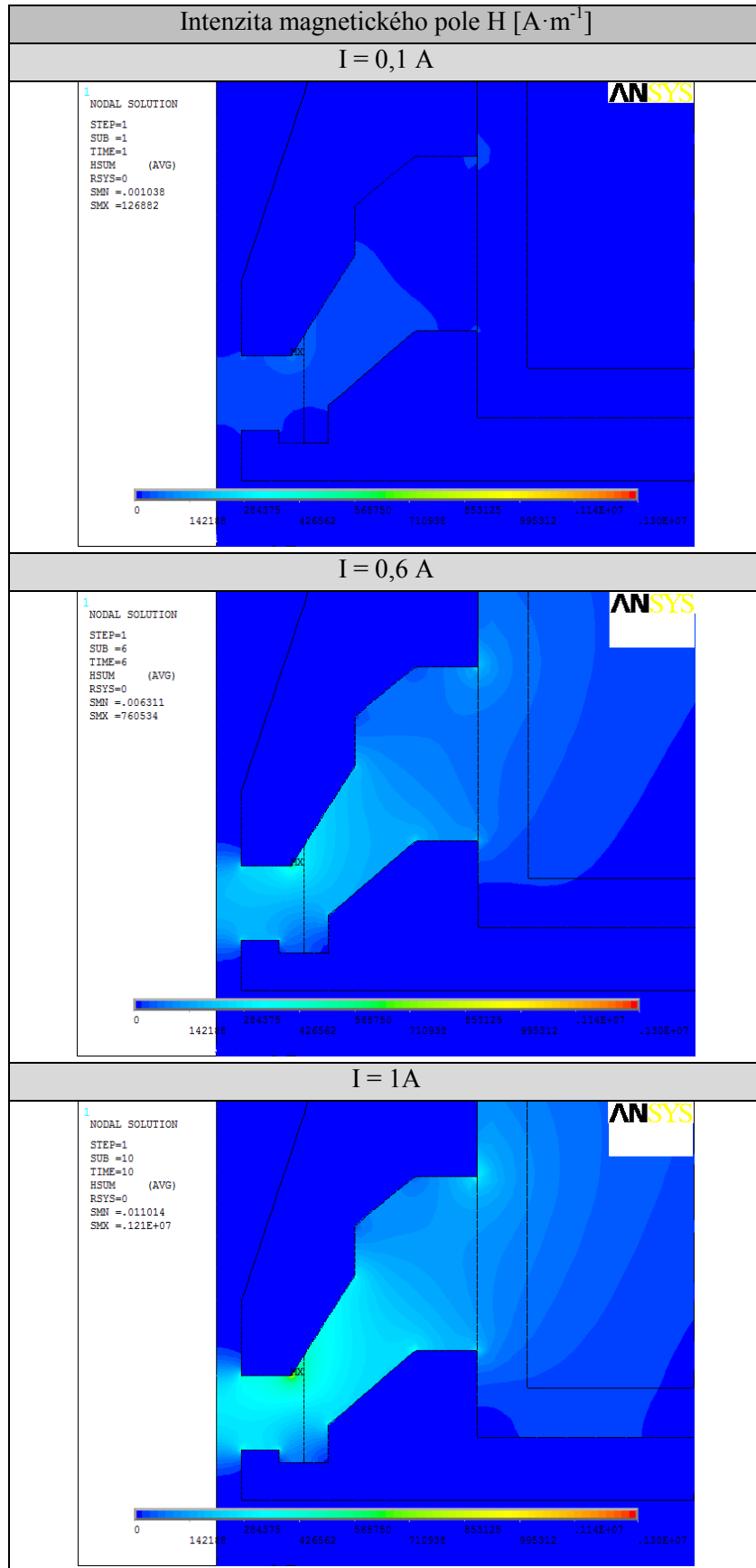
4.2 Výsledky modelování pro hodnoty proudů 0,1 A, 0,6A a 1 A



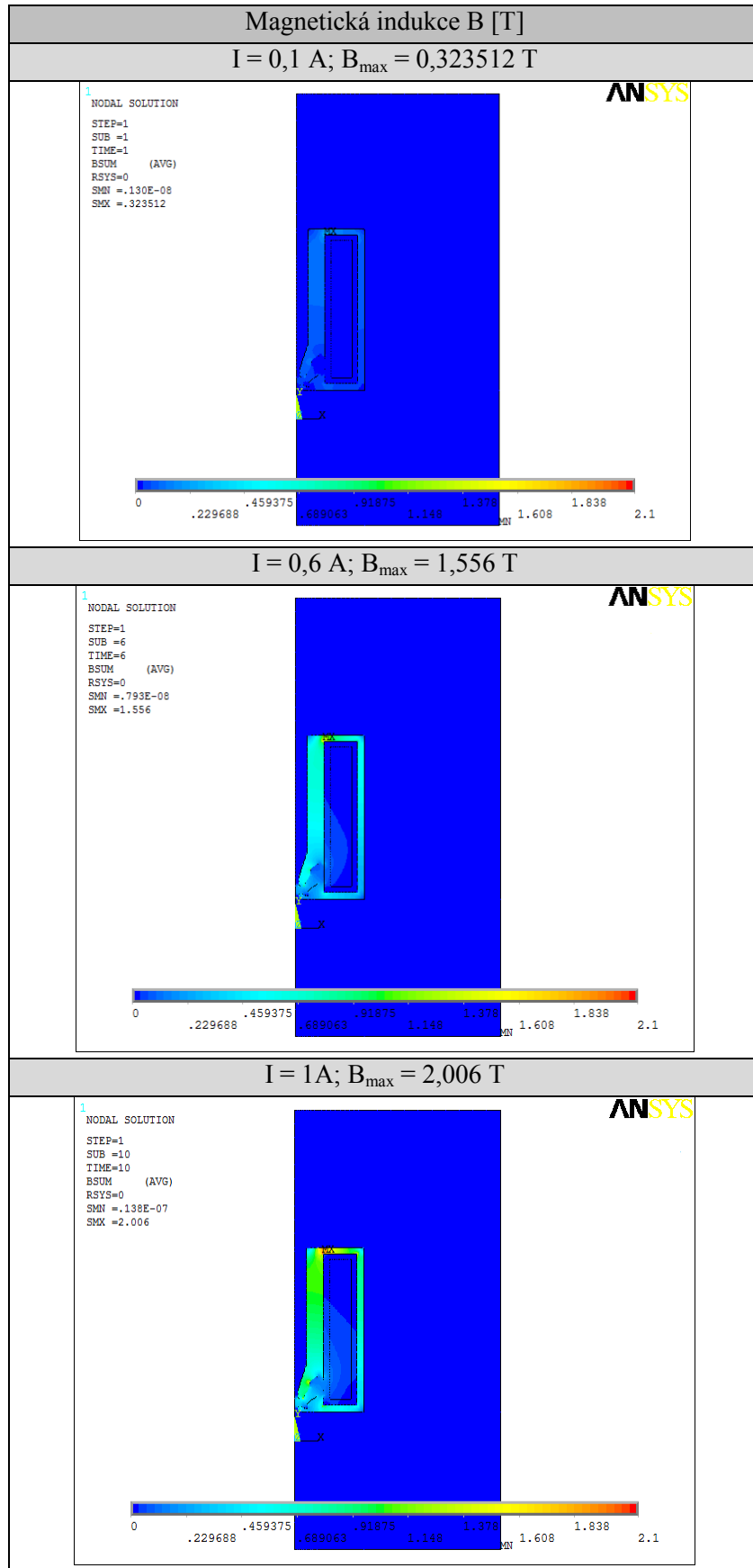
Obr. 38 Intenzita magnetického pole (celý objekt)



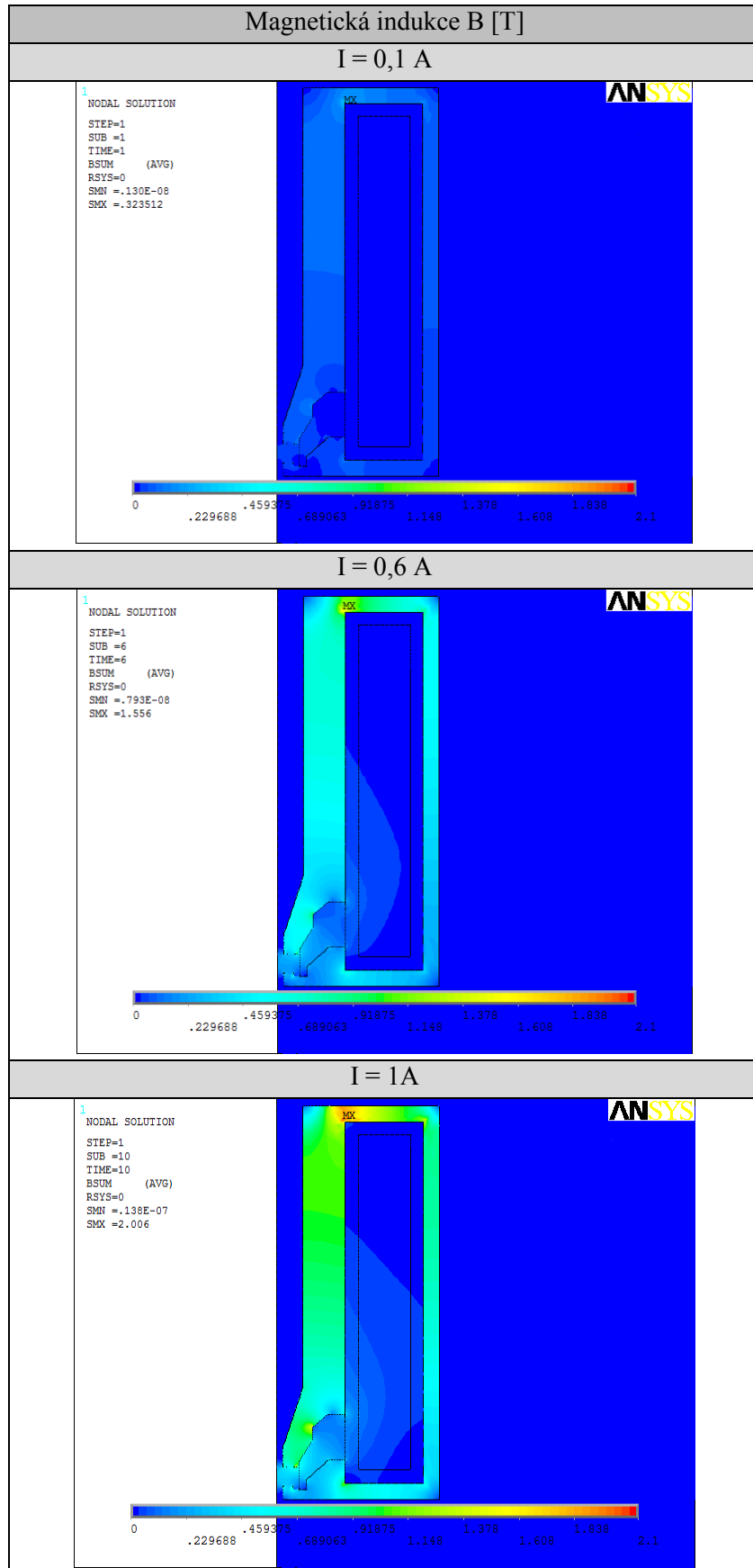
Obr. 39 Intenzita magnetického pole (detail čočky)



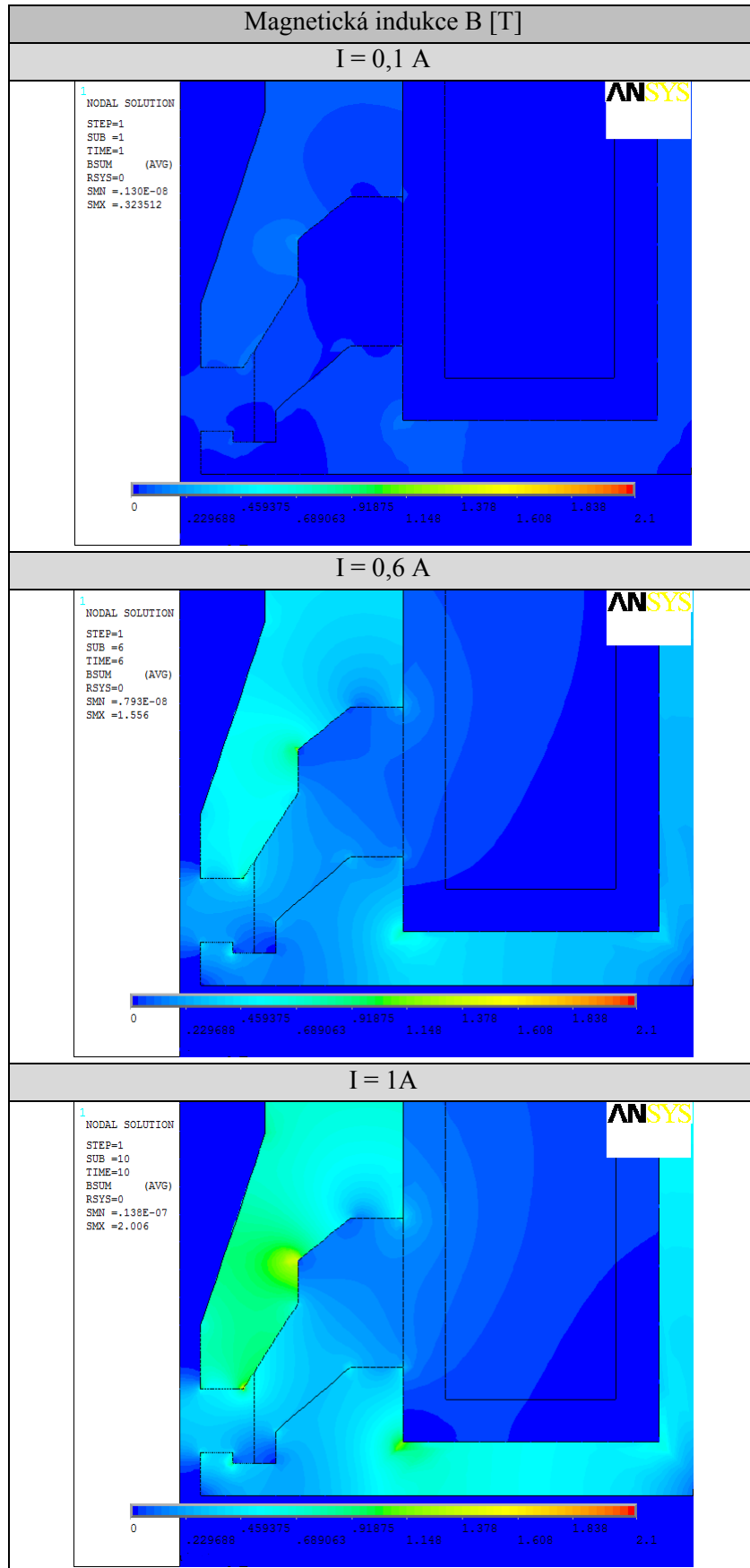
Obr. 40 Intenzita magnetického pole (detail pólových nástavců)



Obr. 41 Magnetická indukce (celý objekt)



Obr. 42 Magnetická indukce (detail čočky)



Obr. 43 Magnetická indukce (detail pólových nástavců)

4.3 Sestrojení B – H charakteristiky

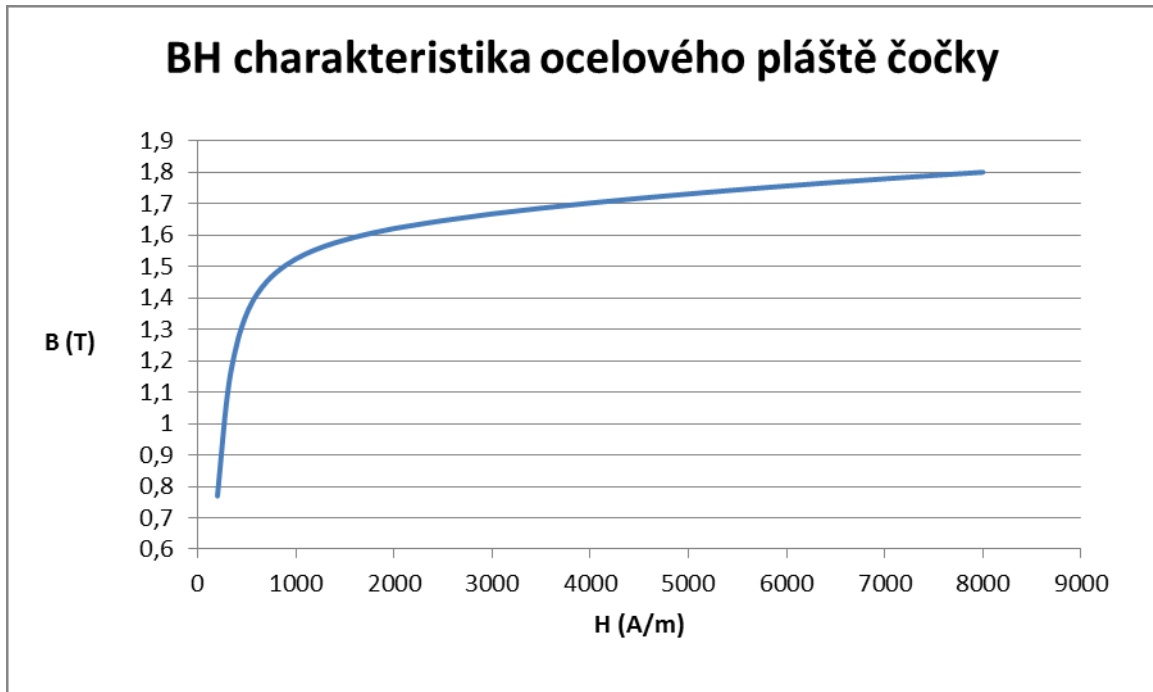
Naměřené a vypočtené hodnoty pro sestrojení B – H charakteristiky magnetického obvodu čočky (Tab. 2). Hodnoty byly dodány od vedoucího diplomové práce. Na (Obr. 44) je znázorněno nasycení ocelového pláště čočky.

Tab. 2 Hodnoty pro sestrojení B - H charakteristiky

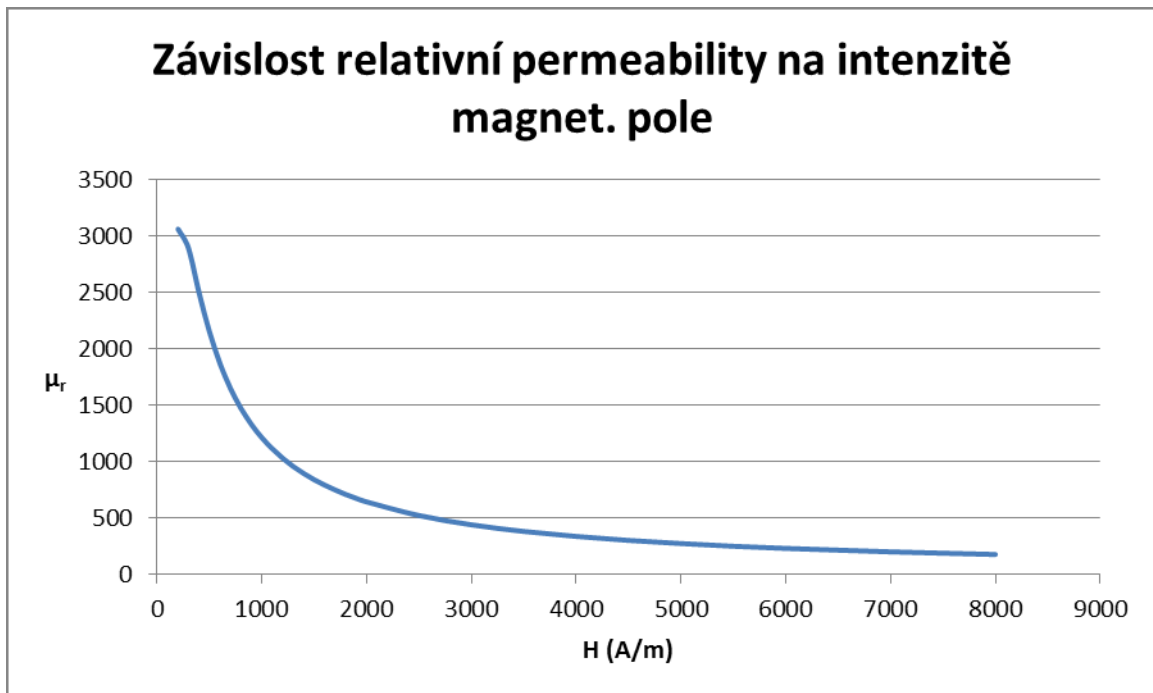
H (A/m)	B (T)	μ_r (-)
200	0.7692	3061
300	1.0894	2890
400	1.2559	2498
500	1.3520	2152
600	1.4106	1871
700	1.4515	1650
800	1.4816	1474
900	1.5053	1331
1000	1.5245	1213
1100	1.5406	1115
1200	1.5542	1031
1300	1.5658	958
1400	1.5761	896
1500	1.5852	841
1600	1.5939	793
1700	1.6015	750
1800	1.6086	711
1900	1.6149	676
2000	1.6213	645
2500	1.6467	524
3000	1.6681	442
3500	1.6863	383
4000	1.7027	339
4500	1.7176	304
5000	1.7315	276
5500	1.7446	252
6000	1.7570	233
6500	1.7687	217
7000	1.7797	202
7500	1.7904	190
8000	1.8006	179

Příklad výpočtu relativní permeability byl proveden dle vztahu (2.6.1):

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} = \frac{1,7315}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5000} = 276$$



Obr. 44 B - H charakteristika magnetického obvodu čočky



Obr. 45 Zobrazení závislosti relativní permeability na intenzitě magnetického pole

5 Zhodnocení a závěr

Cílem diplomové práce byla simulace elektromagnetického pole typové čočky elektronového mikroskopu. Model byl sestaven v programu ANSYS v 12.1 a simulace byla provedena pomocí 2 D statické analýzy magnetického pole.

Podrobná analýza byla provedena pro deset hodnot proudu od 0 do 1 A. Výsledky intenzity magnetického pole a magnetické indukce pro proudy 0,1 A, 0,6A a 1 A jsou uvedeny na (Obr. 38 až Obr. 43). Zbylé výsledky jsou uvedeny v (Příloha 1 až Příloha 6).

Z uvedených výsledků intenzity magnetického pole H je zřejmé, že největší intenzita je naměřena pro proud 1 A a nejnižší pro 0,1 A. Maximální intenzita $0,121 \cdot 10^7 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ je dosažena na rohu horního pólového nástavce a je označena písmeny MX. Minimální intenzita $126882 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ je označena písmeny MN a je dosažena v dolním pravém rohu objektu. Magnetická indukce B dosahuje maximální hodnoty 2,006 T v horní části magnetického obvodu čočky a minimální hodnoty 0,323512 T v dolní části objektu. Vypočtené výsledky nelze porovnat s výsledky uvedenými od výrobce nebo jinými výsledky, protože se jedná o smyšlenou typovou čočku.

U elektromagnetických čoček vyžadujeme, aby největší intenzita magnetického pole byla mezi pólovými nástavci. Na (Obr. 39) vidíme, že část intenzity nám „uniká“ směrem k mosazné vložce a pokračuje k cívce. Pro její snížení se musí zmenšit vzdálenost pólových nástavců a zúžit mezeru, která je vytvořena mosaznou vložkou. Pro snížení hodnoty magnetické indukce v horní části magnetického obvodu je zapotřebí zvětšit plochu na daném místě a nejbližší roh zaoblit.

Tvorba diplomové práce byla pro mě velkým přínosem z hlediska seznámení se se základy elektronové mikroskopie. Dalším přínosem byla první zkušenost s tvorbou modelu a simulace v programu ANSYS, který má využití ve všech oborech fyziky. Práce v programu byla velice složitá, ale s pomocí vedoucího diplomové práce byla úspěšně dokončena. Téma diplomové práce je pro mě velice zajímavé, protože elektronová mikroskopie má široké uplatnění a velkou budoucnost.

6 Seznam použité literatury

- [1] MAREK, Martin. *Způsoby zjišťování magnetických vlastností konstrukčních materiálů, specifické příklady užití a aplikací magnetických měření*. Ostrava, 2005. Disertační práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrických strojů a přístrojů.
- [2] ECKERTOVIÁ, Ludmila, ed. FRANK, Luděk, ed. a DELONG, Armin, ed. *Metody analýzy povrchů: elektronová mikroskopie a difrakce*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1996. 379 s. ISBN 80-200-0329-0.
- [3] MAREK, Martin a Regina HOLČÁKOVÁ. Computer simulation of electromagnetic field distribution in type lens of the electron microscope. In: *Electric Power Engineering 2011: proceedings of the 12th international scientific conference : May 17-19, 2011, hotel Dlouhé Stráně, Kouty nad Desnou, Czech Republic, Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, s. 423-430. ISBN 978-80-248-2393-5.*
- [4] MAREK, Martin et al. Innovative Research in Electron Microscopes, Magnetic Properties of Steels and Alloys for Magnetic Lenses and Chambers. In: CACIOTTA, M., ed. Z. LEONOWICZ, ed. *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering: Rome, 8-11 May 2011* [CD-ROM]. Wrocław: Politechnika Wroclawska, c2011, s. 188-191. ISBN 978-1-4244-8781-3 (plné texty).
- [5] HOLČÁKOVÁ, Regina a Martin MAREK. Innovative Research in Electron Microscopes, Analysis of Magnetic Field Distribution of Some Types of Magnetic Lenses by FEM. In: CACIOTTA, M., ed. Z. LEONOWICZ, ed. *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering: Rome, 8-11 May 2011* [CD-ROM]. Wrocław: Politechnika Wroclawska, c2011, s. 184-187. ISBN 978-1-4244-8781-3 (plné texty).
- [6] DELONG, Armin a DRAHOŠ, Vladimír. *Praktická elektronová mikroskopie*. Vyd. 1. Praha: Československá akademie věd, 1958. 370 s.
- [7] HAŇKA, Ladislav. *Teorie elektromagnetického pole*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1975. 580 s.
- [8] SZÁNTÓ, Ladislav. *Maxwellovy rovnice*. Vyd. 1. Praha: BEN, 2003. 112 s. ISBN 80-7300-096-2.
- [9] DRAXLER, Karel, KAŠPAR, Petr, RIPKA Pavel. *Magnetické prvky a měření*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. 276 s. ISBN 80-01-01909-8.
- [10] DĚDEK, Libor. *Teorie elektromagnetického pole*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 1990. 218 s. ISBN 80-214-0219-9.
- [11] JÄGER, Aleš, GÄRTNEROVÁ, Viera. *Elektronovým mikroskopem do nitra materiálů aneb jak vypadá jejich struktura* [online]. 2008, [cit. 2012-06-3]. Dostupné z: <<http://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>>.

Simulace elektromagnetického pole budícího jha elektronového mikroskopu

[12] NEBESÁŘOVÁ, Jana. *Elektronová mikroskopie pro biology* [online]. 2001, [cit. 2012-3-3]. Dostupné z: <<http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/4.1.html>>.

[13] *Magnetické pole a jeho vlastnosti* [online]. [cit. 2012-29-3]. Dostupný z: <http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/3_06_Magneticke_pole.pdf>.

[14] *Autodesk.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-7-4]. AutoCAD. Dostupný z <<http://www.autodesk.cz>>

[15] *ANSYS* [online]. 2012 [cit. 2012-7-4]. Dostupné z: <<http://www.ansys.com>>

7 Seznam příloh

Příloha 1	Celý objekt – Intenzita.pdf
Příloha 2	Detail čočky – Intenzita.pdf
Příloha 3	Detail pólových nástavců – Intenzita.pdf
Příloha 4	Celý objekt – Indukce.pdf
Příloha 5	Detail čočky – Indukce.pdf
Příloha 6	Detail pólových nástavců – Indukce.pdf

Všechny přílohy jsou uvedeny na CD/DVD.

8 Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 Magnetická indukce [9]	3
Obr. 2 Magnetický tok [9].....	4
Obr. 3 Magnetomotorická síla a magnetické napětí [9]	5
Obr. 4 Určení orientace síly [13].....	10
Obr. 5 B - H charakteristika [9].....	11
Obr. 6 Magnetický obvod [9].....	12
Obr. 7 Úsek magnetického obvodu [9]	13
Obr. 8 Uzel magnetického obvodu [9].....	13
Obr. 9 Rozložení magnetického toku [9]	15
Obr. 10 Vzduchová mezera [9]	15
Obr. 11 Klínová vzduchová mezera [9]	16
Obr. 12 Srovnání velikosti pozorovaných objektů [11]	19
Obr. 13 Transmisní elektronový mikroskop [11].....	20
Obr. 14 Elektronová tryska [12].....	20
Obr. 15 Wolframové vlákno [12], Obr. 16 Krystal LaB6 [12].....	21
Obr. 17 Vliv předpětí na proud elektronů [12].....	21
Obr. 18 Vznik křižště [12]	22
Obr. 19 Dopad elektronů na vzorek [12].....	23
Obr. 20 Mikrostruktura slitiny hliníku [11]	24
Obr. 21 Rastrovací elektronový mikroskop	25
Obr. 22 Schéma Everhart - Thornleyova detektoru sekundárních elektronů [12].....	26
Obr. 23 Částice zlata na uhlíkové podložce [11].....	27
Obr. 24 Znázornění siločar solenoidu	28
Obr. 25 Působení magnetického pole na elektron [12]	28
Obr. 26 Schématický řez kondenzorem [6].....	29
Obr. 27 Schématický řez objektivem a znázornění siločar S mezi pólovými nástavci [6], [12].....	30
Obr. 28 Paprskový diagram dvoustupňového elektronového mikroskopu [6].....	30
Obr. 29 Vznik sférické vady a její potlačení pomocí clony [12].....	31
Obr. 30 Deformace obrazu sférickou vadou, kde A je nezkraslený obraz [12]	32
Obr. 31 Vzhled programu ANSYS	33
Obr. 32 Nákres elektromagnetické čočky	34
Obr. 33 Specifikace materiálu v ANSYSu.....	34
Tab. 1 Použité materiály a jejich relativní permeabilita.....	35
Obr. 34 Geometrie PLANE53 [15]	35
Obr. 35 Meshování pro celý objekt Obr. 36 Meshování pro čočku	36
Obr. 37 Detail vymeshování pro oblast pólových nástavců	36
Obr. 38 Intenzita magnetického pole (celý objekt)	37
Obr. 39 Intenzita magnetického pole (detail čočky)	38
Obr. 40 Intenzita magnetického pole (detail pólových nástavců)	39
Obr. 41 Magnetická indukce (celý objekt).....	40
Obr. 42 Magnetická indukce (detail čočky)	41
Obr. 43 Magnetická indukce (detail pólových nástavců).....	42
Tab. 2 Hodnoty pro sestavení B - H charakteristiky	43

Simulace elektromagnetického pole budícího jha elektronového mikroskopu

Obr. 44 B - H charakteristika magnetického obvodu čočky	44
Obr. 45 Zobrazení závislosti relativní permeability na intenzitě magnetického pole	44