



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky**

Vplyv okolitého materiálu na presnosť merania Rogovského cievkou

Influence of surrounding material to Rogowski coil accuracy

Diplomová práca

Študijný program: Elektrotechnika, energetika a management
Študijný odbor: Elektroenergetika

Vedúci práce: Ing. Jaromír Podzemný

Jakub Machovič

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Jakub Machovič**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Vliv okolního materiálu na přesnost měření Rogowského cívkou**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zhodnocení vlivu feromagnetického/diamagnetického okolí na výstup RC různých rozměrů.
- 2) Zahrnutí více konstrukcí RC (1 vrstvá, vícevrstvá, diskrétní cívky).
- 3) Oba předchozí body zpracovat jak po teoretické, tak praktické stránce (reálná měření).

Seznam odborné literatury:

- [1] D. A. Ward and J. L. T. Exon: Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying, Special Report, September 2010, Sponsored by the Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society.
- [2] Eng. Sci. Educ. J.: Using Rogowski coils for transient current measurement, pp.105 - 113, 1993.
- [3] David E. Shepard, Donald W. Yauch: An overview of Rogowski coil current sensing technology.

Vedoucí: Ing. Jaromír Podzemný

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

Prehlásenie

Prehlasujem, že som uvedenú prácu vypracoval samostatne a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o dodržiavaní etických princípov pri príprave vysokoškolských záverečných prác.

V Prahe, dňa

.....

podpis

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som chcel pod'akovať predovšetkým vedúcemu práce ing. Jaromírovi Podzemnému za cenné pripomienky a rady při riešení práce a Doc. Ing. Vladislavovi Kvasničkovvi, CSc. za jeho pomoc s administratívou spojenou s vypracovaním práce v externej firme. Ďalej by som chcel pod'akovať svojej rodine a známym za prejavenu podporu.

ABSTRAKT

Diplomová práca je zameraná na zisťovanie vplyvu feromagnetických a diamagnetických látok na presnosť rogowského cievky. V úvode dokumentu sú rozpracované teoretické poznatky o princípe fungovania rogowského cievok, ich konštrukcie a magnetických vlastnostiach látok.

Ďalej nasleduje vlastná teoretická úvaha o vplyve feromagnetických a diamagnetických látok na presnosť rogowského cievky. Z tej vychádza návrh praktických testov na overenie predpokladaných závislostí. Zvláštna pozornosť je venovaná diamagnetickému tieneniu pre rogowského cievku.

Testovanie je rozdelené do dvoch častí. Prvou je virtuálne testovanie za pomoci softvéru FEMM 4.2, ktorý využíva pre výpočty metódu konečných prvkov. Výsledky virtuálnych testov sú použité pre definovanie potrebných, reálnych, laboratórnych testov.

Laboratórne testy sú spracované podľa návrhu a ich výsledky sú porovnávané s výsledkami virtuálnych testov.

Výstupom práce je formulovanie záverov na základe dosiahnutých výsledkov testov a návrh ďalších postupov, ktoré by pomohli presnejšie vyhodnotiť riešenú problematiku.

KEÚČOVÉ SLOVÁ: rogowského cievka; MKP; FEMM; feromagnetizmus; diamagnetizmus; magnetické tienenie

ABSTRACT

The master's thesis is focused on the determination of the influence of ferromagnetic and diamagnetic substances to accuracy of Rogowski coil. Introduction of thesis is focused on description of theoretical knowledge about the principles of operation of the Rogowski coil, its possible structures and magnetic properties of substances.

Following part is theoretical consideration about impact of ferromagnetic and diamagnetic substances to accuracy of Rogowski coil. This consideration serve as basis for testing sheme focused to verify the anticipated dependencies. Special attention is paid to diamagnetic shielding for Rogowski coil.

Testing was divided into two parts. The first is the virtual testing with the help of FEMM 4.2 software which works on principle of the finite element method. Results of virtual testing are used to define necessary laboratory tests.

Laboratory tests are processed according designed scheme and the results are compared with the results of virtual testing.

This work is accompanied by the formulation of conclusions based on test results and proposal of new procedures that could help to evaluate examined issues more accurately.

KEY WORDS: Rogowski coil; FEM; FEMM; ferromagnetism; diamagnetism; magnetic shielding

OBSAH

1 ÚVOD.....	13
2 TEORETICKÝ ROZBOR.....	14
2.1 Rogowského cievka všeobecne.....	14
2.2 Princíp funkcie rogowského cievky.....	17
2.3 Integračné metódy.....	18
2.4 Elektrický model rogowského cievky.....	19
2.5 Konštrukcia rogowského cievky.....	19
2.5.1 Konštrukčné zásady.....	19
2.5.2 Rôzne spôsoby delenia rogowského cievok.....	20
2.5.2.1 Delenie podľa počtu vrstiev vinutia.....	20
2.5.2.2 Delenie podľa kontinuity vinutia.....	21
2.5.2.3 Delenie cievok podľa konštrukcie.....	23
2.6 Magnetické vlastnosti látok.....	25
2.6.1 Magnetická merná vodivosť.....	25
2.6.2 Magnetický odpor.....	26
3 Vlastný Teoretický rozbor problému.....	27
3.1 Magnetické pole v okolí priameho vodiča.....	27
3.2 Rozloženie magnetického poľa v homogénnom prostredí.....	28
3.3 Rozloženie magnetického poľa v nehomogénnom prostredí.....	30
3.3.1 Vplyv feromagnetických látok.....	30
3.3.2 Vplyv diamagnetických látok.....	30
3.4 Návrh testov	31
4 Praktické testovanie.....	33
4.1 Virtuálne testovanie pomocou programu FEMM 2.2.....	33
4.1.1 Postup tvorby virtuálneho problému.....	34
4.1.1.1 Vytvorenie výkresov.....	34
4.1.1.2 Výber vhodných materiálov.....	36
4.1.1.3 Definícia problému.....	39
4.1.1.4 Nastavenie prúdu.....	40
4.1.1.5 Tvorba hraníc problému.....	41
4.1.1.6 Nastavenie bloku.....	42
4.1.2 Priebeh a výsledky testov	43
4.1.2.1 Závislosť energie mag. poľa v oblasti cievok na primárnom prúde.....	43
4.1.2.2 Závislosť energie mag. poľa v oblasti cievok na vzdialenosti feromagnetika.....	50

4.1.2.3 Závislosť energie mag. poľa v oblasti cievok na cudzieho vodiča prúdu.....	54
4.1.3 Zhrnutie a záver virtuálnych testov	58
4.2 Reálne testovanie v laboratórnych podmienkach.....	59
4.2.1 Príprava na testy	59
4.2.2 Priebeh a výsledky testov.....	59
4.2.2.1 Závislosť rozdielu výst. signálu na primárnom prúde.....	60
4.2.2.2 Závislosť rozdielu výst. signálu na vzdialenosti feromagnetika.....	61
4.2.2.3 Závislosť rozdielu výst. signálu na vzdialenosti cudzieho vodiča prúdu.....	61
4.2.3 Zhrnutie reálnych testov.....	62
5 ZÁVER.....	63
POUŽITÁ LITERATÚRA A SOFTWARE.....	65

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2.1 Náčrt rogowského cievky s prúdom tečúcim primárnym vodičom [1].....	14
Obr. 2.2 Porovnanie konvenčných transformátorov s rogowského cievkou [1].....	15
Obr. 2.3 Náhradný obvod rogowského cievky [2].....	19
Obr. 2.4 Príklad jednovrstvej cievky so spätným vodičom [1].....	21
Obr. 2.5 Príklad toroidnej rogowského cievky.....	22
Obr. 2.6 Príklad diskkrétnej rogowského cievky [1].....	23
Obr. 2.7 Pevná rogowského cievka s vyvedeným káblom [1].....	23
Obr. 2.8 Flexibilná rogowského cievka.....	24
Obr. 2.9 Rozloženie magnetického poľa v nehomogénnom prostredí.....	26
Obr. 3.1 Znázornenie rozdielov v dráhach magnetických siločiar v okolí vodiča.....	28
Obr. 4.1 Model diskkrétnej cievky s polygonálnym tienením.....	35
Obr. 4.2 Model toroidnej cievky s kruhovým tienením.....	36
Obr. 4.3 Nastavenia materiálu „Air“ (vzduch).....	37
Obr. 4.4 Nastavenia materiálu „Copper“ (meď).....	38
Obr. 4.5 Nastavenia materiálu „Pure Iron“ (čisté železo).....	38
Obr. 4.6 Nastavenia pre definíciu problému.....	40
Obr. 4.7 Nastavenie prúdu primárnym vodičom na hodnote 1200 A.....	40
Obr. 4.8 Príklad nastavenia funkcie „Open boundary builder“.....	41
Obr. 4.9 Príklad nastavenia vlastností bloku primárneho vodiča.....	43
Obr. 4.10 Rozloženie mag. poľa v okolí vodiča prúdu pre cievku s 12 elementami.....	45
Obr. 4.11 Legenda pre farebné mapy intenzity mag. poľa platná pre podkapitolu 4.1.2.1	45
Obr. 4.12 Rozloženie mag. poľa pre cievku s 12 elementami a polygonálnym tienením.....	46
Obr. 4.13 Rozloženie mag. poľa pre cievku s 12+4 elementami a polygonálnym tienením.....	48
Obr. 4.14 Rozloženie mag. poľa pre toroidnú cievku s kruhovým tienením.....	49
Obr. 4.15 Vplyv blízkeho feromagnetika na cievku s 12 elementami.....	51
Obr. 4.16 Legenda pre farebné mapy intenzity mag. poľa platná pre podkapitolu 4.1.2.2.....	51
Obr. 4.17 Vplyv blízkeho feromagnetika na cievku s 12 elementami a kruhovým tienením.....	52
Obr. 4.18 Vplyv blízkeho feromagnetika na cievku s 12 elementami a polygonálnym tienením.....	53
Obr. 4.19 Vplyv blízkeho vodiča prúdu na cievku s 12 elementami.....	55
Obr. 4.20 Legenda pre farebné mapy intenzity mag. poľa platná pre podkapitolu 4.1.2.3.....	56
Obr. 4.21 Vplyv blízkeho vodiča prúdu na cievku s 12 elementami a kruhovým tienením.....	56
Obr. 4.22 Vplyv blízkeho vodiča prúdu na cievku s 12 elementami a polygonálnym tienením.....	57
Obr. 4.23 Rozmiestnenie úlohy pri testovaní vplyvu feromagnetika na cievku s kruhovým tienením.....	60

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 4-1 Výsledky testov závislosti na prim. prúde pre diskretnú cievku s 12 elementami.....	44
Tab. 4-2 Výsledky testov závislosti na prim. prúde pre diskretnú cievku s 12+4 elementami.....	47
Tab. 4-3 Výsledky testov závislosti na prim. prúde pre toroidnú cievku	49
Tab. 4-4 Výsledky testov blízkeho feromagnetika pre diskretnú cievku s 12 elementami.....	50
Tab. 4.5 Výsledky testov blízkeho feromagnetika pre diskretnú cievku s 12+4 elementami.....	53
Tab. 4.6 Výsledky testov blízkeho feromagnetika pre toroidnú cievku.....	54
Tab. 4-7 Výsledky testov blízkeho vodiča pre diskretnú cievku s 12 elementami.....	55
Tab. 4-8 Výsledky testov blízkeho vodiča pre diskretnú cievku s 12+4 elementami.....	57
Tab. 4-9 Výsledky testov blízkeho cudzieho vodiča pre toroidnú cievku.....	58
Tab. 4-10 Výsledky laboratórných testov prúdovej závislosti cievky.....	60
Tab. 4-11 Výsledky laboratórných testov závislosti cievky na vzdialenosti feromagnetika.....	61
Tab. 4-12 Výsledky laboratórných testov závislosti cievky na crosstalking.....	62

1 ÚVOD

Cieľom tejto práce je teoretický rozbor prúdových senzorov konštruovaných na princípe rogowského cievky a teoretické, ako aj praktické posúdenie vplyvu feromagnetických a diamagnetických materiálov na presnosť týchto senzorov.

V dnešnej dobe sa čoraz viac kladie dôraz na úspory energie vo všetkých odvetviach. Ak sa v tejto veci zameriam na oblasť elektroenergetiky, konkrétne prenos a distribúciu elektrickej energie, ponúka sa možnosť postupného nahradzovania konvenčných prístrojových transformátorov senzormi, ktorých energetické nároky a straty sú v porovnaní s prístrojovými transformátormi zanedbateľné. Ako každé technické riešenie, má aj použitie senzorov svoje špecifiká, ktoré je potrebné pri návrhu rešpektovať a prípadne zapracovať na zmiernení ich negatívnych dopadov.

Nasledovný text sa venuje rozboru vlastností rogowského cievky, ktoré majú značný význam pri návrhoch technických riešení senzorov prúdu a posudzovaní vhodnosti ich aplikácie. Ďalej poskytuje prehľad základných, v súčasnej dobe používaných, konštrukčných prevedení prúdových senzorov na báze rogowského cievky.

V ďalšej časti sa práca zaoberá teoretickým rozborom magnetických vlastností látok a ich vplyvom na presnosť senzorov s rogowského cievkami. Z teoretických poznatkov následne vychádzajú návrhy praktických testov, ktoré sú rozdelené na virtuálne a reálne. Zvláštna pozornosť bola venovaná práve diamagnetickým látkam a ich využitiu v podobe magnetického tienenia.

Pri virtuálnych testoch bol použitý software FEMM 4.2, okrem iného určený pre simuláciu magnetických polí. V práci sú stručne popísané potrebné nastavenia programu a priebeh samotných testov, spolu s výsledkami a ich zhodnotením. Na základe získaných poznatkov z virtuálnych simulácií boli následne vyšpecifikované a realizované niektoré reálne testy.

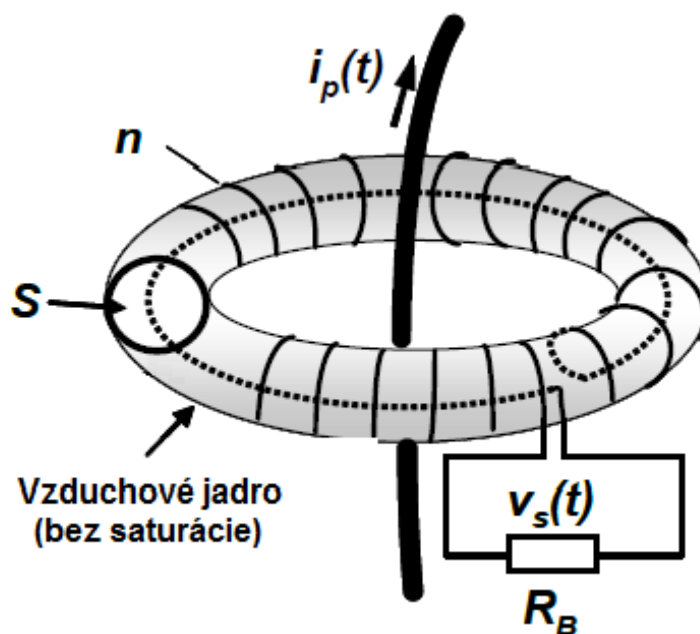
Záverom práce je porovnanie teoretických predpokladov a výsledkov praktických testov, spolu s návrhom opatrení, ktoré by v budúcnosti prispeli k presnejším výsledkom.

2 TEORETICKÝ ROZBOR

Text v tejto kapitole sa zaoberá teóriou konštrukcie a funkcie rogowského cievok. Informácie, schémy zapojenia, obrázky a vzorce pre spracovanie nasledovného textu boli čerpané z literatúry uvedenej v zozname. Odkazy na zdroj sú na konci príslušných odstavcov.

2.1 Rogowského cievka všeobecne

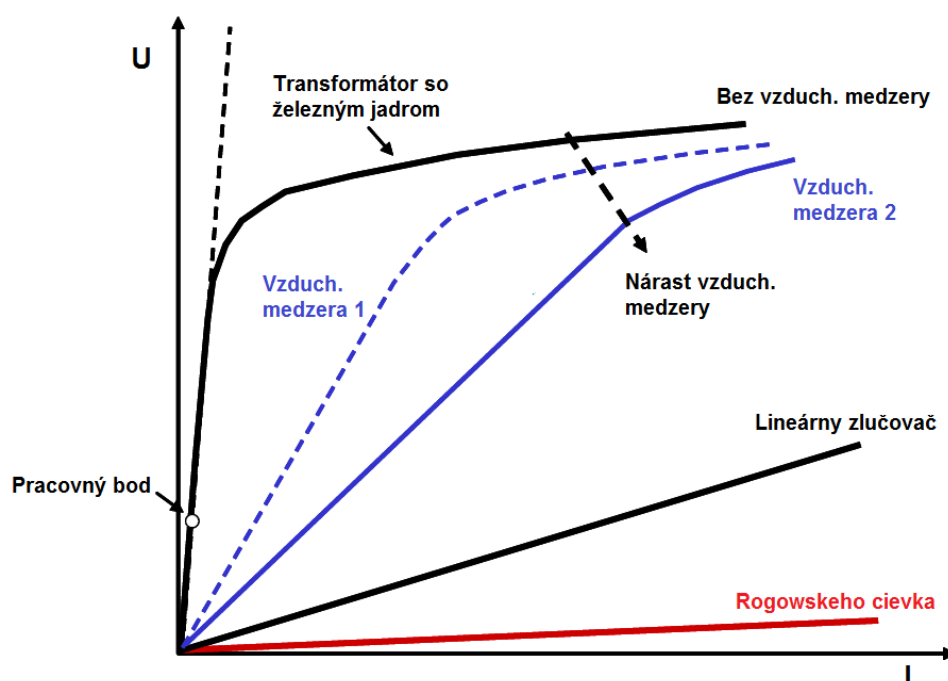
Rogowského cievka využíva pre svoju funkciu rovnaké princípy, aké sú využívané u konvenčných transformátorov prúdu. Ide o vzájomnú interakciu medzi zdrojom magnetického toku a induktorom. V induktore vznikajú veličiny, ktoré svojou orientáciou pôsobia proti príčine svojho vzniku, teda proti magnetickému toku vyvolanému zdrojom. Náčrt rogowského cievky je na *Obr. 2.1.* [1]



Obr. 2.1 Náčrt rogowského cievky s prúdom tečúcim primárnym vodičom [1]

Hlavný rozdiel oproti transformátorom je vo fyzickej stavbe magnetického obvodu oboch zariadení. Zatiaľ čo u konvenčného transformátoru sú obe vinutia navinuté na magnetickom jadre, u rogowského cievky tvorí jadro nemagnetický materiál. Týmto materiálom je najčastejšie vzduch, no hlavne pre flexibilné cievky sa používajú aj iné materiály, akými je napríklad silikónová guma. Priaznivým dôsledkom toho je lineárna charakteristika, pretože vo vzduchovom jadre nedochádza k saturácii. Tým negatívnym je malá vzájomná väzba medzi primárnym vodičom a sekundárnym vinutím. Dochádza tak len k minimálnej transformácii výkonu medzi

primárnym a sekundárnym obvodom. Z tohto dôvodu je na sekundárnej strane ako výstupná veličina využívané magnetomotorické napätie. Vytvorené napätie sa najčastejšie pohybuje v rádoch milivoltov, až voltov. Preto sa od zariadenia na spracovanie signálu vyžaduje vysoký vstupný odpor, ktorá obmedzuje úbytky napätia na vnútornej impedancii rogowského cievky. S príchodom elektronických terminálov chránenia sa energetická náročnosť vstupných obvodov razantne znížila, a zároveň vzrástla ich vstupná impedancia. Preto v súčasnej dobe na trhu rastie ponuka zariadení schopných spracovávať signály z rôznych senzorov. [1]



Obr. 2.2 Porovnanie konvenčných transformátorov s rogowského cievkou [1]

Porovnanie volt-ampérových charakteristík transformátorov so železným jadrom bez medzery, s medzerou, lineárnych spojok, a rogowského cievok je ukázané na **Obr. 2.2**. Transformátory so železným jadrom, bez vzduchovej medzery, sú saturovateľné a môžu si zachovávať remanentnú magnetizáciu v jadre až 80% zo saturačného toku. Pridaním vzduchovej medzery sa saturácia úplne neodstráni, ale výrazne obmedzí remanentný magnetizmus. Zároveň však vzrastie magnetizačný prúd, čo vedie k zvýšeniu chyby fázy. Lineárne spojky sú cievky so vzduchovým jadrom, u ktorých síce nedochádza k nasýteniu, ale sú citlivé na vonkajšie magnetické polia a ich presnosť je pomerne nízka. Sensory na princípe rogowského cievky sú lineárne a vďaka svojej presnosti môžu byť použité pre meracie aplikácie. Ich výstupné napätie je úmerné derivácii okamžitého primárneho prúdu a je voči nemu pootočené takmer o 90°. Pre získanie presnej odozvy primárneho prúdu, čo do tvaru krivky, fázy a veľkosti, je potrebné

výstupné napätie cievky integrovať. Preto väčšina komerčne dostupných prúdových senzorov na báze rogowského cievky je priamo vybavená integrátorom. Užívatelia, ktorí sa snažia použiť cievky bez integrátora sa potýkajú s mnohými problémami. Napríklad pri výskyte 10. harmonickej v primárnom prúde je táto zložka v pomeroch 10-krát väčšia u výstupného napätia než u primárneho prúdu. [1]

Vo všeobecnosti sa dá povedať, že rogowského cievky sú oproti konvenčným prúdovým transformátorom schopné značne znížiť náklady na budovanie, prevádzkovanie a servis energetického zariadenia. Môže za to hlavne ich vysoká presnosť a v širokom rozsahu prevádzkových ako, aj poruchových prúdov. Vďaka tomu jediné zariadenie sníma prúd pre účely a, ako aj chránenia. Pri trvalom navýšení, alebo znížení prenášaného výkonu nie je potrebná výmena senzoru, ak svojimi rozmermi naďalej vyhovuje novej prúdovodnej dráhe. Vyššia miera unifikácie, sériová výroba senzorov, a teda aj možnosť vytvárania skladových zásob sa stáva výhodná pre dodávateľov, a tiež odberateľov. Znižujú sa tým náklady na skladové zásoby náhradných dielov a skracujú sa dodacie doby v prípade, ak je potrebná výmena. Energetické zariadenia majú kratšie prestoje, z čoho plynie priaznivejšia ekonomická bilancia celého zariadenia. [1]

Ďalším podstatným ekonomickým aspektom, ktorý by pri výpočtoch nemal byť opomínaný je podstatne nižšia spotreba energie, a teda nižšie náklady životného cyklu rogowského cievky. Vo feromagnetickom jadre konvenčných transformátorov prúdu vznikajú hysterézne straty, zatiaľ čo u rogowského cievky k takýmto stratám nedochádza. Sekundárnym obvodom rogowského cievok navyše tečú iba nepatrné prúdy a jeho výkonové straty preto nie sú podstatné. [1]

Z mechanického hľadiska sú rogowského cievky podstatne ľahšie a menšie než konvenčné transformátory prúdu rovnakých parametrov. Z podstaty ich konštrukcie je možné vytvoriť rozpojiteľnú cievku, ktorá sa dá inštalovať na vodiče aj počas prevádzky, bez potreby rozpájania primárneho obvodu. [1]

Typické použitie cievky je ohnutie do uzavretého tvaru, najčastejšie kruhového, pre zachytenie celého obvodu vrstiev magnetického poľa v okolí primárneho vodiča, ktoré je úmerné prúdu prechádzajúcemu týmto vodičom. Najbežnejšie rogowského cievky sú konštruované ako vodič navinutý okolo nemagnetického jadra. Tým je najčastejšie dutý, plastový skelet, takže sa relatívna permeabilita blíži jednej. Cievka sa umiestňuje okolo vodiča pretekaného prúdom, ktorý chceme merať. [1]

2.2 Princíp funkcie rogowského cievky

Už bolo spomenuté, že rogowského cievka pracuje na rovnakých princípoch ako konvenčné transformátory prúdu. Využíva sa vzájomná interakcia medzi zdrojom magnetického toku a induktoru. Ako výstupný signál rogowského cievky je využívané magnetomotorické napätie.[2]

Toto napätie môže byť vo vodiči indukované pohybom vodiča v magnetickom poli, alebo jeho umiestnením do časovo premenného magnetického poľa. Indukované napätie bude vo všeobecnosti definované rovnicou, odvodenou z Ampérovho a Faradayovho zákona. [2]

Ampérov zákon hovorí, že integrál magnetického poľa po jednej uzavretej krivke je rovný celkovému prúdu, ktorý touto krivkou preteká. Táto závislosť je matematicky vyjadrená vzťahom

$$i = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (2.1)$$

kde i je uzavieraný prúd, \vec{H} intenzita mag. poľa a $d\vec{l}$ je nekonečne malý element dráhy. [2]

Faraday-Lenzov zákon popisuje tvorbu elektromotorického napätia vplyvom časovo premenného elektromagnetického poľa (Faradayov zákon) a fakt, že ak sa toto elektromotorické napätie objaví v uzavretom okruhu. Indukovaný prúd je vždy takého smeru, aby pôsobil proti zmene, ktorá ho vyvolala (Lenzov zákon). Pre striedavý prúd je výstupné napätie cievky rýchlosťou zmeny magnetického poľa. V nekonečne malom elemente dráhy $d\vec{l}$ prechádza elementom plochy $d\vec{S}$ magnetický tok $d\Phi$, ktorý je daný integráciou hustoty magnetickej indukcie \vec{B} v ploche $d\vec{S}$ za predpokladu, že priemer závitov je malý. Indukované napätie v $d\vec{l}$ sa vypočíta ako rýchlosť zmeny magnetického poľa

$$v_{dl} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.2)$$

$$v_{dl} = -\frac{d}{dt} \left(\int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} \right) \quad (2.3)$$

$$v_{dl} = -\frac{d}{dt} \left(\int_s \mu_0 \vec{H} \cdot d\vec{S} \right) \quad (2.4)$$

$$v_{dl} = -\mu_0 \cdot A \cdot \frac{dH}{dt} \cdot \cos \alpha \quad (2.5)$$

kde μ_0 predstavuje permeabilitu vákuua, A je plocha závitov a uhol α je odklon vektoru intenzity magnetického \vec{H} poľa od normály elementu plochy $d\vec{S}$. [2]

Magnetický tok prechádzajúci celou cievkou je daný integráciou po celej dĺžke cievky. Predpokladom je, že počet závitov na jednotku dĺžky je konštantný. Potom je celkové indukované napätie

$$v_{coil} = - \int_0^l v_{dl} \cdot n \cdot dl \quad (2.6)$$

$$v_{coil} = -\mu_0 \cdot A \cdot n \cdot \int_0^l \frac{dH}{dt} \cdot \cos \alpha \cdot dl \quad (2.7)$$

$$v_{coil} = -\mu_0 \cdot A \cdot n \cdot \frac{d}{dt} \cdot \int_0^l H \cdot \cos \alpha \cdot dl \quad (2.8)$$

$$v_{coil} = -\mu_0 \cdot A \cdot n \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.9)$$

kde n je počet závitov cievky. [2]

V nasledovnej rovnici je výstupné napätie cievky závislé na meranom prúde. Závislosť je vyjadrená konštantou úmernosti M , ktorá vyjadruje vzájomnú indukčnosť cievky.

$$v_{coil} = -M \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.10)$$

$$M = \mu_0 \cdot A \cdot n \quad (2.11)$$

[2]

2.3 Integračné metódy

Ako už bolo uvedené, výstupné napätie rogowského cievky je úmerné k rýchlosti zmeny primárneho prúdu. To znamená, že pre získanie signálu úmerného vlnovému priebehu prúdu je potrebné výstupné napätie cievky v_{coil} integrovať.

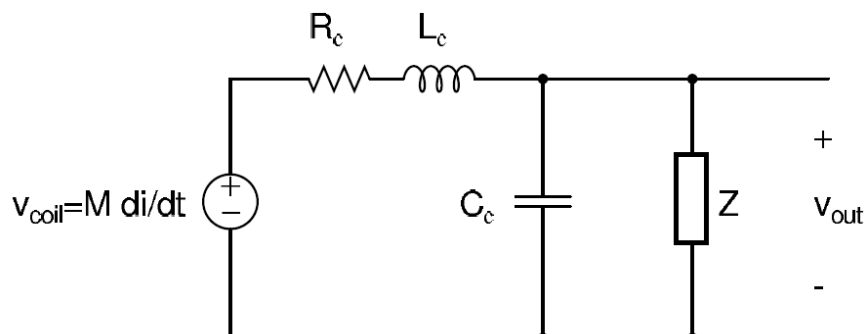
Existuje hneď niekoľko spôsobov integrácie>

- Matematická integrácia, ktorá pozostáva z integrácie signálu v_{coil} získaného z osciloskopu, alebo meracej karty.
- Elektronická integrácia, ktorá spočíva v integrácii pasívnymi integračnými obvodmi.
- Vlastná integrácia, tvorená samotnou konštrukciou samointegračnej rogowského cievky

[2]

2.4 Elektrický model rogowského cievky

Rogowského cievka je ekvivalentná obvodu na **Obr. 2.3**, kde R_c je odpor cievky, L_c je jej indukčnosť a C_c je kapacita. Z je vstupná impedancia meracieho zariadenia. [2]



Obr. 2.3 Náhradný obvod rogowského cievky [2]

Potom medzi teoretickým napätím cievky naprázdno v_{coil} a napätím indukovaným na jej svorkách v_{out} platí vzťah

$$\frac{v_{out}}{v_{coil}} = \frac{Z}{L_c \cdot Z \cdot C_c \cdot s^2 + (L_c + R_c \cdot Z \cdot C_c) \cdot s + R_c + Z} \quad (2.12)$$

kde

$$s = j \cdot \omega \quad (2.13)$$

[2]

2.5 Konštrukcia rogowského cievky

Nasledovný text sa venuje konštrukcii rogowského cievok. Popisuje základné konštrukčné požiadavky pre vinutia, ako aj spôsoby ich konštrukcie. V závere približuje najčastejšie používané prevedenia.

2.5.1 Konštrukčné zásady

Pre dosiahnutie presnej sekundárnej odozvy v závislosti na primárnom prúde je potrebné splniť dve podmienky:

- Relatívna pozícia primárneho vodiča v priestore rogowského cievky by mala byť taká, aby neovplyvňovala výstupný signál.
- Väzba medzi okolitými vodičmi, pretekanými vysokými prúdmi a rogowského cievkou by mala mať minimálny vplyv na výstupný signál. [1]

Prvá podmienka sa dá splniť snahou o dodržanie nasledovných teoretických zásad:

- **Konštantný prierez rogowského cievky.** Využívajú sa skelety z plastu, alebo iných materiálov, okolo ktorých sa cievka navinie. Získame tak požadovaný prierez po celom jej obvode.
- **Vinutie cievky s konštantným rozložením závitov po celom jej obvode.** Dosahuje sa zvyšovaním požiadaviek na presnosť strojov vyhotovujúcich vinutia.
- **Vinutie kolmé na stredovú os.** Snaha o čo najmenšie stúpanie závitov a minimalizácia chyby, kedy sa pri vinutí sa dostane závit do nesprávnej drážky. [1]

V praktických aplikáciách existuje veľká snaha o priblíženie sa ideálnym podmienkam v maximálnej možnej miere, a preto sa môžu pri výpočtoch, či hypotézach zanedbať drobné odchýlky od ideálneho stavu. Rovnako tak rozdiel v permeabilitách vákua a vzduchu je zanedbateľný, a preto sa vo väčšine výpočtov za relatívnu permeabilitu vzduchu dosadzuje jednotka. [1]

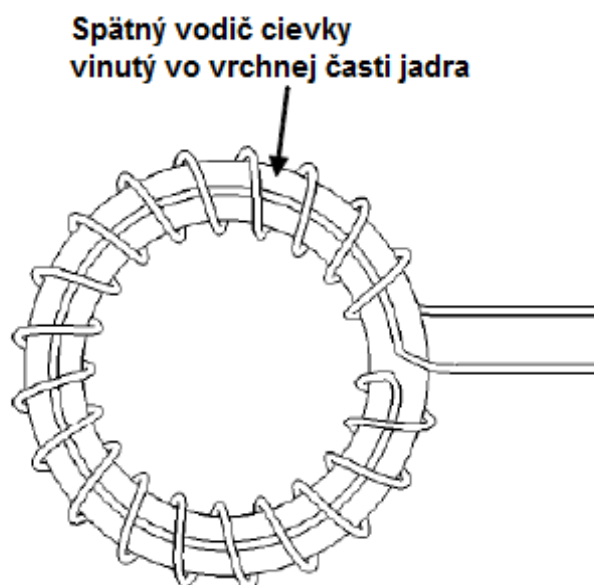
Pretože je induktívna väzba medzi primárnym vodičom a rogowského cievkou slabá, je potrebné pre splnenie druhej podmienky minimalizovať vplyvy blízkych vodičov, ktoré by značnou mierou ovplyvňovali výstupný signál. To je z časti docielené samotnou konštrukciou, no napriek tomu je potrebné dbať na dodržiavanie vhodných vzdialeností ďalších vodičov. Splnením týchto zásad sa značne obmedzia vplyvy okolitých elektromagnetických polí a na výstupných svorkách sa výrazne prejaví len pole tvorené vodičmi prechádzajúcimi priestorom uzavretým rogowského cievkou. [1]

2.5.2 Rôzne spôsoby delenia rogowského cievok

V praxi určite existuje z rôznych technologických pohľadov veľké množstvo spôsobov delenia rogowského cievok. V nasledovnom texte sú rozobrané len niektoré z najzákladnejších.

2.5.2.1 Delenie podľa počtu vrstiev vinutia

Rogowského cievka môže mať vinutú jednu, alebo viac cievok. Ak je vinutá iba jedna cievka, druhá je tvorená spätným vodičom prechádzajúcim stredom prvej cievky, alebo v blízkosti tejto cievky. V takomto prípade sa hovorí o jednovrstvej cievke. Charakteristická je pre ňu nižšia hodnota výstupného napätia. Jednovrstvé cievky majú nízke hodnoty vzájomnej indukčnosti, vlastnej sériovej indukčnosti, odporu a vlastnej kapacity. Vďaka jednoduchosti konštrukcie je jej cena pomerne nízka. Cievka so spätným vodičom je na **Obr. 2.4**. [1]



Obr. 2.4 Príklad jednovrstvej cievky so spätňým vodičom [1]

Ak sú dve, alebo iný párny počet cievok, konštruované ako vinutia, musia byť páry vinuté v elektricky opačných smeroch. V tomto prípade sa hovorí o viacvrstvých cievkach. Je potrebné brať na vedomie, že pri takejto rogowského cievke je výstupné napätie (v prípade, že sú vinutia rovnaké) násobkom počtu vrstiev oproti jednovrstvej cievke. Viacvrstvé cievky sú v dnešnej dobe s obľubou používané práve pre navýšenie výstupného napätia. Na druhej strane však vyššia spotreba materiálu a času pri výrobe zvyšujú jej cenu oproti jednovrstvým cievkam. Narozdiel od jednovrstvých cievok vykazujú vyššie hodnoty vzájomnej indukčnosti, vlastnej sériovej indukčnosti, odporu a vlastnej kapacity. Tieto parametre by mali byť brané do úvahy pri vykonávaní i vysokých frekvencií a malých fázových posunov. Kapacita vinutí viacvrstvej cievky sa zvyšuje približne lineárne s počtom závitov. Tieto parametre ovplyvňujú frekvenčnú odozvu cievky. [1]

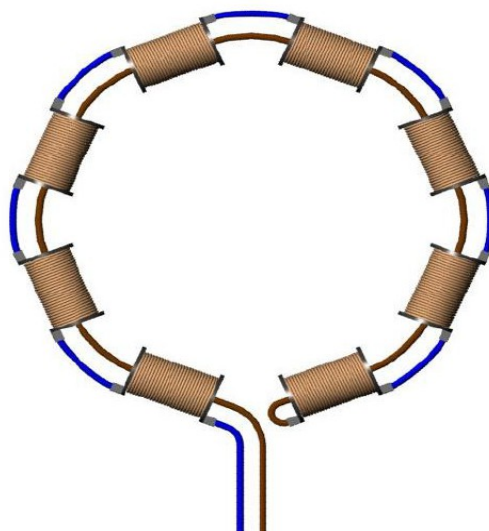
2.5.2.2 Delenie podľa kontinuity vinutia

Tým známejším typom je toroidne vinutá cievka zobrazená na **Obr. 2.5**. Cievka je konštantne vinutá po celom svojom obvode. Výhodou tohoto kontinuálneho vinutia je jeho menšia náchylnosť na rušenia vonkajších elektromagnetických polí. Jeho prvotnými nevýhodami bolo zložitejšie navíjanie, no s rozvojom technológií v tejto oblasti už nepredstavuje problém. Vinutie je možné navinúť ako jednovrstvé, alebo viacvrstvé. [1]



Obr. 2.5 Príklad toroidnej rogowského cievky

Ďalším typom je diskretná rogowského cievka pozostávajúca z viacerých, menších samostatných cievok (elementov) rozložených po obvode meraného objektu (najčastejšie tvoria kruh) a spojených do série. Každý z elementov môže mať niekoľko vrstiev, aby bolo možné dosiahnuť dostatočne veľké výstupné napätie. V porovnaní s klasickou rogowského cievkou je diskretná rogowského cievka menšia, a preto je vhodná pre aplikácie, kde je v okolí vodičov prúdu málo miesta. Výroba takýchto delených rogowského cievok je jednoduchšia. Na rozdiel od toroidného vinutia, jednotlivé elementy diskretnej cievky sú vinuté ako priame. Za nevýhodu však môžeme považovať fakt, že počet závitov na jednotku dĺžky nie je konštantný po celom obvode meracieho zariadenia. Štrukturálna diskontinuita cievky je spôsobená tým, že posledný závit jedného elementu je spojený s prvým závitom nasledujúceho elementu pomocou vodiča. Koeficient vzájomnej indukčnosti medzi zariadením a externými obvodmi nie je nulová, čoho dôsledkom je vyšší vplyv vonkajších elektromagnetických polí než je u spojitých vinutí. Obmedzovanie tohoto vplyvu je riešené zaradením väčšieho počtu jednotlivých cievok do obvodu. Príklad diskretnej rogowského cievky je na Obr. 2.6. [1]



Obr. 2.6 Príklad diskkrétnej rogowského cievky [1]

2.5.2.3 Delenie cievok podľa konštrukcie

Prvou skupinou sú pevné rogowského cievky. Vyrábajú sa s použitím toroidného, či diskkrétneho vinutia. Rovnako tak existujú prevedenia s rôznym počtom vrstiev vzhľadom na požiadavky pre výstupný signál, prípadne charakter aplikácie. Samotné cievky sú vinuté okolo pevného, nemagnetického jadra. Tieto jadrá môžu byť vyrobené z plastu, epoxidu, alebo iného pevného izolačného materiálu s vhodnou permeabilitou blížiacou sa vákuu. Následne sú uložené do prípravkov (púzdiar), ktoré fixujú ich polohu a mechanicky ich chránia. Následne môžu byť zaliate epoxidom čo ich fixáciu a ochranu ešte navýši. Obvykle sa inštalujú na pevné podložky, alebo do káblových priechodiek a primárny vodič sa nimi následne prevlieka. Púzdro býva často vybavené montážnymi prvkami, takže je možné v konečnej aplikácii takúto cievku vycentrovať. Príklad pevnej rogowského cievky v púzdre je na **Obr. 2.7**. [1]



Obr. 2.7 Pevná rogowského cievka s vyvedeným káblom [1]

Flexibilné rogowského cievky sú zväčša toroidné a môžu byť navinuté napríklad na jadre zo silikónovej gumy, či iného pružného materiálu. Vo väčšine prípadov je prevedenie flexibilnej cievky jednovrstvové. Vodič z konca cievky sa vracia po celej dĺžke cievky jej stredom (po osi cievky) naspäť, ako je vidieť na Obr. 2.3. Toto usporiadanie znižuje vplyv okolitých magnetických polí a zaisťuje, že obe vývodové svorky sú na rovnakom konci cievky. Ohybné rogowského cievky sú vhodné pre pohodlné i.e. prúdov na veľkých, či nezvyčajne tvarovaných vodičoch, kde priestor v okolí je obmedzený, alebo sa vyžaduje použitie ľahkého prevodníku zaveseného na vodiči. Posun spojovacích čiel rozpojiteľnej rogowského cievky má len nepatrný vplyv na amplitúdu a fázu meraného prúdu neovplyvňuje vôbec. Obvykle sú tieto cievky dodávané s integrátorom, ktorý integruje ich výstupný signál. Flexibilné rogowského cievky sú vo väčšine prípadov vyhotovené ako rozpojiteľné a môžu byť inštalované bez akejkoľvek potreby mechanického, alebo elektrického rozpojenia primárneho vodiča prúdu, pričom sami zaisťujú galvanické oddelenie (izoláciu). Ich používanie je preto veľmi jednoduché. Presnosť flexibilných rogowského cievok nie je tak vysoká, ako je tomu u pevných cievok, no môže byť vylepšená správnou pozíciou primárneho vodiča v priestore cievky. Príklad flexibilnej rogowského cievky je na Obr. 2.8. [1]



Obr. 2.8 Flexibilná rogowského cievka

2.6 Magnetické vlastnosti látok

Na rozdiel od elektrických obvodov, kde napätie slúži ako hnacia sila pre prúd tečúci cez elektrický odpor, magnetické obvody využívajú závit pretekané prúdom na vytvorenie magnetického napätia, ktoré tlačí magnetický indukčný tok cez prostredie s určitým magnetickým odporom. Analogicky sa potom rozlišuje magnetickú vodivosť, prípadne odpor, rôznych materiálov.

2.6.1 Magnetická merná vodivosť

Magnetická merná vodivosť, tiež nazývaná permeabilita, je obdobou mernej vodivosti elektrickej s jednotkou Hm^{-1} (Henry na meter) a sú ňou vyjadrené vlastnosti materiálu vo vzťahu k magnetickému poľu. Pri tomto určení sa obvykle používa súčin permeability vákua μ_0 a relatívnej permeability μ_r .

Relatívna permeabilita určuje pomer permeability konkrétneho materiálu k permeabilite vákua. Na základe tejto hodnoty sú látky rozdelené do skupín:

- Diamagnetické ($\mu_r < 1$)
- Vákuum ($\mu_r = 1$)
- Paramagnetické ($\mu_r > 1$)
- Feromagnetické ($\mu_r \gg 1$)

V lineárnom materiáli je permeabilita rovná pomeru magnetickej indukcie a intenzity magnetického poľa. S rastúcou permeabilitou klesá intenzita magnetického poľa potrebná na pretlačenie rovnakého magnetického toku materiálom. Rovnako je tomu u všetkých nemagnetických materiálov.

Feromagnetické materiály môžu mať naopak relatívnu permeabilitu aj niekoľko desiatok tisíc. Permeabilita je v týchto materiáloch funkciou intenzity magnetického poľa. To je hlavnou podstatou magnetickej saturácie.

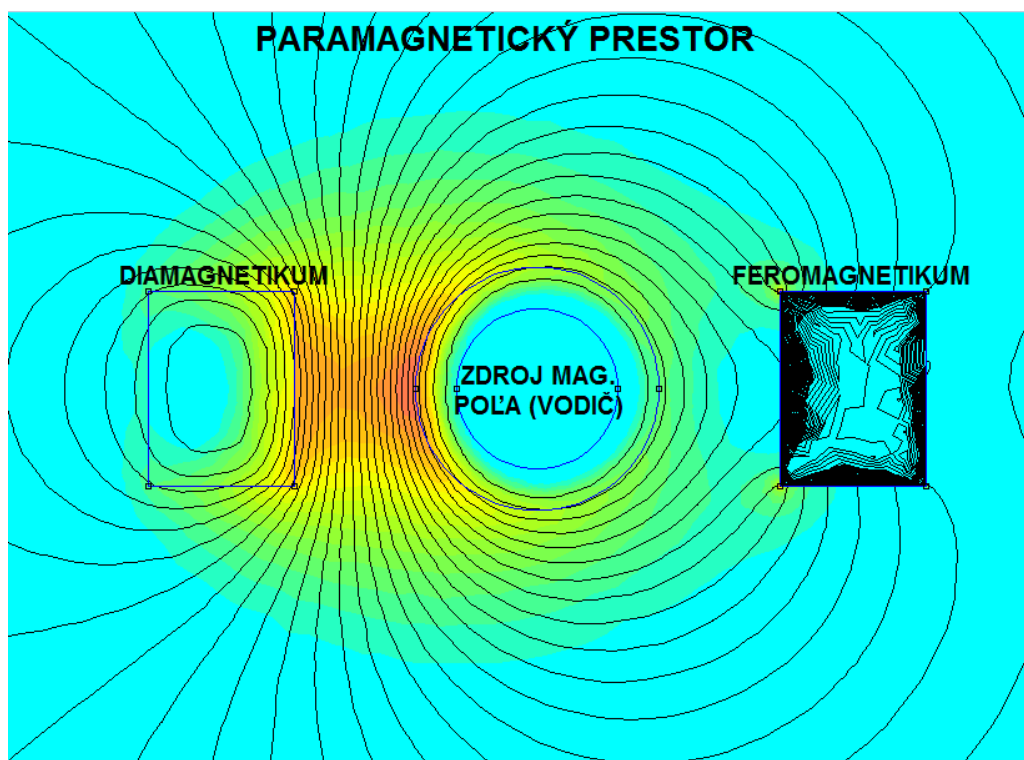
2.6.2 Magnetický odpor

Pre zhodnotenie rozloženia magnetického poľa v nehomogénnom prostredí (látkach) je potrebné definovať veličinu zvanú reluktancia, alebo magnetický odpor R_m . Ten je v magnetickom obvode, prípadne jeho časti, analógiou odporu elektrického.

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} \quad (2.14)$$

Kde l je dĺžka magnetického obvodu, μ_0 je permeabilita vákua, μ_r relatívna permeabilita a A je plocha.

Magnetický tok si obdobne ako je tomu u elektrického prúdu vyberá cestu menšieho odporu. Príklad rozloženia siločiar, generovaných vodičom prúdu, v nehomogénnom prostredí je na **Obr. 2.9**. Jedná sa rozhranie paramagnetického materiálu (vzduch) a feromagnetického materiálu.



Obr. 2.9 Rozloženie magnetického poľa v nehomogénnom prostredí

3 VLASTNÝ TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU

V tejto časti práce popisujem vlastné úvahy na základe získaných teoretických poznatkov z oblasti magnetizmu, magnetických vlastností látok a princípov funkcie rogowského cievok. Následne je na základe teoretických predpokladov o správaní sa magnetických polí v okolí látok s rôznymi magnetickými vlastnosťami zostavený súbor praktických testov, ktoré majú za úlohu potvrdiť, alebo vyvrátiť teoretické predpoklady.

3.1 Magnetické pole v okolí priameho vodiča

Je všeobecne známe, že nekonečne dlhý, tenký vodič pretekaný prúdom I vytvára vo svojom okolí magnetické pole, ktoré je priamo úmerné prúdu a nepriamo úmerné vzdialenosti od vodiča. Veľkosť intenzity magnetického poľa H potom klesá so vzdialenosťou od zdroja r podľa vzťahu (3.1).

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (3.1)$$

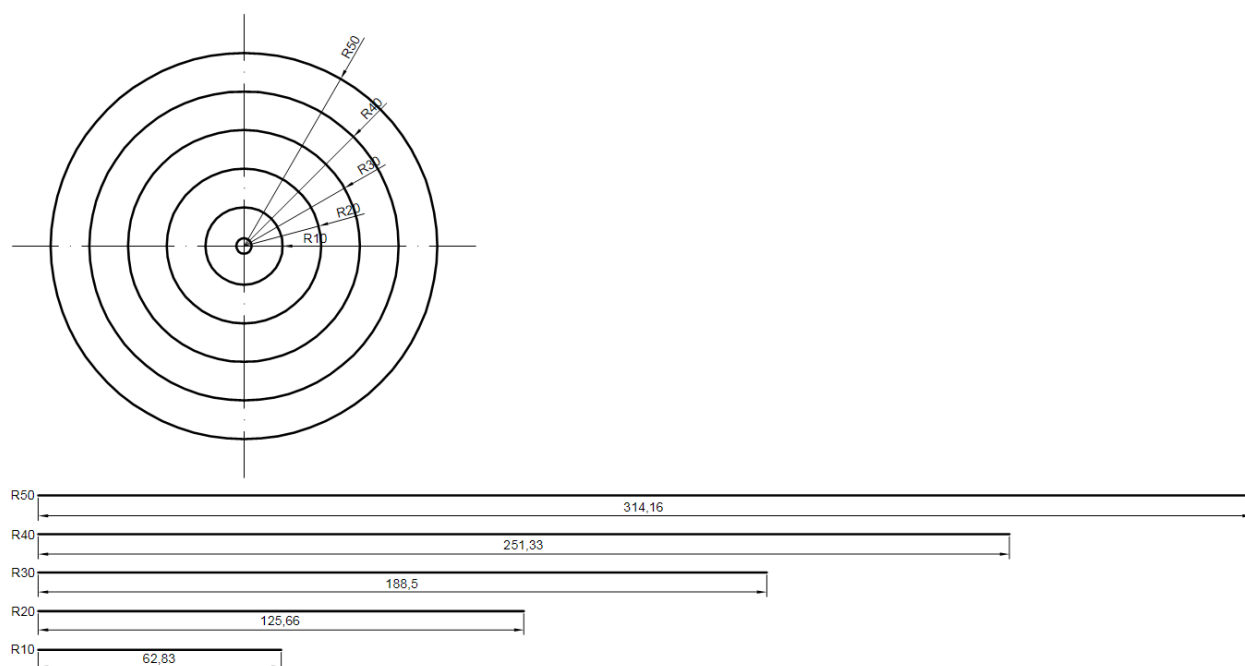
V homogénnom prostredí obdobne so vzdialenosťou od vodiča klesá aj veľkosť magnetickej indukcie B . Príčinou tohto poklesu je nárast magnetickej reluktancie jednotlivých kruhových dráh magnetického toku Φ .

Pre lepšie pochopenie je vhodné si plochu okolo prierezu vodiča predstaviť ako nekonečne veľký počet kružníc s narastajúcim polomerom. S rastúcim polomerom teda rastie aj obvod kružnice. Každá kružnica predstavuje dráhu pre časť magnetického toku. Tento magnetický tok je na jednotlivé dráhy prerozdelený podľa veľkosti ich reluktancie, ktorá je daná vzorcom (2.14). V tomto prípade je plocha A pre všetky kružnice konštantná a nekonečne malá. Preto je možné povedať, že reluktancia po jednej kružnici je funkciou dĺžky.

$$R_{m\Delta S} = f(l) \quad (3.2)$$

Obdobne ako prúd v elektrických obvodoch si aj magnetický tok v obvodoch magnetických si vyberá cestu menšieho odporu. Jednotlivé kružnice predstavujú paralelné cesty pre magnetický tok. Reluktancie týchto ciest sú však rozdielne. Pre zistenie rozdelenia magnetického toku v jednotlivých kružniciach je možné použiť obdobné rovnice ako pre paralelné radenie odporov a výpočet rozdelenia elektrického prúdu jednotlivými vetvami.

Ručné výpočty magnetických polí týmto spôsobom sú samozrejme nemysliteľné. Ani zďaleka by som nemohol dosiahnuť požadovanú presnosť. Napriek tomu však pre lepšiu názornosť uvádzam ukážky výpočtu rozloženia magnetického toku v konečnom priestore s piatimi hladinami. Na **Obr. 3.1** je znázornených päť hladín v okolí vodiča. Hladiny sú následne rozvinuté, aby bolo možné porovnať ich dráhy.



Obr. 3.1 Znáznornenie rozdielov v dráhach magnetických siločiar v okolí vodiča

3.2 Rozloženie magnetického poľa v homogénnom prostredí

Povedzme, že prostredie okolo vodiča je homogénne (pre výpočet je použité vákuum) a vodičom tečie prúd $I = 100$ A. Priamy vodič predstavuje jediný závit. Magnetické napätie je potom

$$U_m = I \cdot N = 100 \cdot 1 = 100 \text{ A} \quad (3.3)$$

kde N predstavuje počet závitov. Aby som mohol vypočítať celkový magnetický tok v priestore, potrebujem poznať reluktanciu prostredia. Tú vypočítam ako paralelnú kombináciu všetkých piatich reluktancií.

$$\frac{1}{R_m} = \frac{1}{R_{10}} + \frac{1}{R_{20}} + \frac{1}{R_{30}} + \frac{1}{R_{40}} + \frac{1}{R_{50}} \quad (3.4)$$

Pre jednoduchší výpočet dielčích reluktancií si zavediem ďalšie zjednodušenie, a to že každá z piatich vrstiev má plochu rezu $A=1 \text{ m}^2$. Použitím vzťahu (2.14) a jeho dosadením do (3.4) dostanem

$$\frac{1}{R_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{0,06283} + \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{0,12566} + \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{0,1885} + \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{0,25133} + \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{0,31416} \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{R_m} = \frac{1}{5 \cdot 10^4} + \frac{1}{9,9997 \cdot 10^4} + \frac{1}{1,5 \cdot 10^5} + \frac{1}{2 \cdot 10^5} + \frac{1}{2,5 \cdot 10^5} \quad (3.6)$$

$$R_m = 2,1898 \cdot 10^4 \text{ H}^{-1} \quad (3.7)$$

Magnetický tok celým priestorom je potom

$$\Phi = \frac{U_m}{R_m} = \frac{100}{2,1898 \cdot 10^4} = 4,5667 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (3.8)$$

a dielčie toky jednotlivými vrstvami

$$\Phi_{10} = \frac{U_m}{R_{10}} = \frac{100}{5 \cdot 10^4} = 2,0001 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (3.9)$$

$$\Phi_{20} = \frac{U_m}{R_{20}} = \frac{100}{9,9997 \cdot 10^4} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (3.10)$$

$$\Phi_{30} = \frac{U_m}{R_{30}} = \frac{100}{1,5 \cdot 10^5} = 6,6665 \cdot 10^{-4} \text{ Wb} \quad (3.11)$$

$$\Phi_{40} = \frac{U_m}{R_{40}} = \frac{100}{2 \cdot 10^5} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Wb} \quad (3.12)$$

$$\Phi_{50} = \frac{U_m}{R_{50}} = \frac{100}{2,5 \cdot 10^5} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Wb} \quad (3.13)$$

Z uvedených výsledkov jasne vyplýva lineárna závislosť veľkosti magnetického toku v homogénnom a lineárnom prostredí na vzdialenosti od jeho zdroja (nekonečne dlhého vodiča). Hoci som v tejto časti riešil stacionárny problém, rovnaké závislosti rozloženia magnetického toku platia aj pre okamžité hodnoty časovo premenných polí.

V tomto prípade sa jedná o silne idealizované prostredie. Reálne prostredie obsahuje veľké množstvo rôznych rušivých vplyvov. Jedným z nich je nehomogenita prostredia.

3.3 Rozloženie magnetického poľa v nehomogénnom prostredí

Nasledovný text je venovaný vplyvu feromagnetických a diamagnetických látok na rozloženie magnetického poľa. Tieto látky v okolí spôsobujú nehomogenitu prostredia a deformácie magnetického poľa. V krátkosti ich možný vplyv priblížim na rovnakom modeli ako tomu bolo pri homogénnom prostredí.

3.3.1 Vplyv feromagnetických látok

V praxi sa najčastejšie ako rušivý vplyv prostredia na magnetické polia uplatňuje prítomnosť feromagnetických látok. Je to najmä z dôvodu používania konštrukčných materiálov na báze železa s feromagnetickými vlastnosťami. To môže pri nedodržaní potrebných vzdialeností nepriaznivo vplývať na presnosť prúdových senzorov na princípe rogowského cievky.

Tak ako v kapitole 3.2 použijem rovnaký model prostredia (*Obr. 3.1*). Ak by som vložil feromagnetický materiál do prostredia magnetického poľa v okolí vodiča, spôsobil by som zmenu reluktancií v prostredí. Toky, pre ktoré by ich pôvodná dráha predstavovala väčší odpor ako dráha vedená cez feromagnetický materiál by sa vychýlili a našli si novú cestu najmenšieho odporu, aj za cenu predĺženia pôvodnej dráhy. Napríklad pre vrstvu s polomerom 40 mm by stačilo zvýšenie relatívnej permeability na $\mu_r=2$, aby sa jej reluktancia znížila pod hodnotu reluktancie vrstvy 30 mm.

Feromagnetický materiál na seba naviaže časť magnetického toku z okolitého prostredia. Tým sa stane okolitý magnetický tok redším a pre rogowského cievku to znamená zníženie výstupného napätia. Toto zníženie nie je spôsobené iba samotným obtečením cievky, ale aj zmenou smeru magnetického toku, ktorý nebude rovnobežný s normálou plochy závitú, čo vyjadruje vzťah (2.8). Na druhej strane môžu vzrásť magnetické toky, ktorým sa znížil odpor ich dráhy, ale stále prechádzajú rogowského cievkou. V tomto prípade jej výstupné napätie narastie.

3.3.2 Vplyv diamagnetických látok

Diamagnetické materiály predstavujú pre magnetické pole väčší magnetický odpor ako paramagnetiká. To znamená, že vloženie diamagnetika do magnetického poľa sa pole zľahka zdeformuje. Dôvodom je zvýšenie reluktancie pôvodnej dráhy magnetického toku. Ten bude mať tendenciu obtečť paramagnetický materiál aj za cenu predĺženia pôvodnej dráhy, ak to vo výsledku bude znamenať celkovo nižšiu reluktanciu dráhy.

3.4 Návrh testov

V pôvodnom zadaní diplomovej práce bolo spomínané iba testovanie vplyvu feromagnetických látok na presnosť rogowského cievky a diamagnetické materiály boli pridané až následne. Z tohoto dôvodu som plánoval postaviť väčšinu práce práve na testovaní vplyvu blízkyh feromagnetických látok, ktoré sa s ohľadom na množstvo dostupných informácií zdajú byť na prvý pohľad vhodnejšie pre rozsah práce. Už pri práci na teoretickom rozbere som však zistil, že je to práve množstvo dostupných informácií o feromagnetických látkach a správaní sa magnetického poľa v ich okolí, čo môže komplikovať snahu o dosiahnutie rozumnej, vlastnej, pridanej hodnoty práce. Následne som čím ďalej, tým viac inklinoval k názoru, že diamagnetické látky, môžu mať značný význam pri vývoji nových a presnejších koncepcií senzorov pracujúcich na princípe rogowského cievky.

Skôr ako bolo možné zahájiť akékoľvek testovanie, musel som si určiť, aspoň rámcovo, hranice, v ktorých sa chcem pohybovať. Možnosti, ktoré mi ponúkajú vplyvy feromagnetických a diamagnetických materiálov na rogowského cievku, značne presahujú požiadavky a rozsah tohto textu. Sústredil som sa preto hlavne na magnetické tienenie senzorov diamagnetickým materiálom. Ako bude možné sledovať, toto tienenie nemusí znamenať len ochranu senzoru od vonkajších vplyvov, ale aj zlepšenie výstupných parametrov rogowského cievky.

Samotné testovanie som sa rozhodol obmedziť na vonkajší obvod cievky, kolmý k normálu jej plochy. Pre tieto testy som si najprv vytvoril virtuálne modely troch rôznych cievok, pričom som sa inšpiroval reálnymi senzormi. Dve z cievok sú konštruované ako diskkrétne a jedna je vinutá toroidne. Pre každý model som navrhol diamagnetické tienenie. Ako vhodný a dostupný materiál s relatívne silnými diamagnetickými účinkami som zvolil med', konkrétne 1,5 mm hrubý medený plech. Z pohľadu technológie výroby je jednoduchšia výroba kruhového tienenia, a preto som s týmto typom testoval všetky cievky. Z pohľadu teoretického, by som ale mal lepšie výsledky pre diskkrétne cievky dosiahnuť s polygonálnym tienením, ktoré by malo deformovať magnetické pole podľa vlastného zakrivenia. Tým by sa dosiahol lineárnejší prechod magnetického toku lineárne vinutými elementami. Z teórie následne vyplýva väčšie indukované napätie Preto pre diskkrétne cievky bola navrhnutá aj polygonálna varianta diamagnetického tienenia.

Pre všetky modely cievok som pri simuláciách použil rovnaký rozsah prúdov, aby bolo možné ich vlastnosti porovnávať. Pri porovnaní je samozrejme potrebné rešpektovať fakt, že každá z cievok má rozdielny vnútorný polomer, a teda pracuje s inou intenzitou magnetického poľa.

Vo virtuálnych testoch využívam ako hodnotiacu veličinu energiu magnetického poľa v priestore vinutia rogowského cievky. Je to hlavne z dôvodu, že nie je vektorovou veličinou. Jej prepočty na lineárne závislé hodnoty sú uvedené pri výsledkoch testov.

Pre virtuálne testovanie som si stanovil tieto testy:

- Testovanie závislosti energie magnetického poľa v priestore vinutia rogowského cievok pre prúdy 0-1200 A s krokom 100 A.
- Testovanie zmeny závislosti energie magnetického poľa v priestore vinutia rogowského cievok, pri použití diamagnetického tienenia s kruhovým profilom, pre prúdy 0-1200 A s krokom 100 A.
- Testovanie zmeny závislosti energie magnetického poľa v priestore vinutia diskretných rogowského cievok, pri použití diamagnetického tienenia s kruhovým profilom, pre prúdy 0-1200 A s krokom 100 A.
- Testovanie závislosti energie magnetického poľa v priestore vinutia rogowského cievok od vzdialenosti feromagnetického materiálu pri konštantnom prúde 630 A. Krok posunu 5 mm pre 5-45 mm od okraju cievky.
- Testovanie závislosti energie magnetického poľa v priestore vinutia rogowského cievok od vzdialenosti feromagnetického materiálu pri konštantnom prúde 630 A a použití diamagnetického tienenia s kruhovým profilom. Krok posunu 5 mm pre 5-50 mm od okraju cievky.
- Testovanie závislosti energie magnetického poľa v priestore vinutia diskretných rogowského cievok od vzdialenosti feromagnetického materiálu pri konštantnom prúde 630 A a použití diamagnetického tienenia s polygonálnym profilom. Krok posunu 5 mm pre 5-45 mm od okraju cievky.
- Testovanie vplyvu crosstalku na energiu magnetického poľa v priestore vinutia rogowského cievok pri konštantnom prúde 1200 A. Krok posunu 5 mm pre 5-45 mm od okraju cievky.
- Testovanie vplyvu crosstalku na energiu magnetického poľa v priestore vinutia rogowského cievok pri konštantnom prúde 1200 A a použití diamagnetického tienenia s kruhovým profilom. Krok posunu 5 mm pre 5-45 mm od okraju cievky.
- Testovanie vplyvu crosstalku na energiu magnetického poľa v priestore vinutia diskretných rogowského cievok pri konštantnom prúde 1200 A a použití diamagnetického tienenia s polygonálnym profilom. Krok posunu 5 mm pre 5-45 mm od okraju cievky.

4 PRAKTICKÉ TESTOVANIE

Pre overovanie svojich teoretických úvah som použil virtuálne, a následne reálne testy, pričom každý spôsob má svoje špecifiká, výhody a nevýhody. Preto práve kombináciou týchto spôsobov je možné nájsť komplexnejší pohľad na problematiku, než by tomu bolo pri použití iba jednej metódy. Nasledujúci text popisuje jednotlivé metódy spolu s jednotlivými testami a ich výsledkami.

4.1 Virtuálne testovanie pomocou programu FEMM 2.2

Inými slovami ide o počítačovú simuláciu problému. Simulácii magnetických polí sa venuje dostatočné množstvo rôznych počítačových programov (Amperes, Qickfield, MaxFEM, Ansys, a pod.). Za spoločný menovateľ sa dá označiť fakt, že všetky tieto programy pracujú na princípe MKP – Metódy Konečných Prvkov (FEM - Finite Elements Method). To znamená, že riešený priestor je rozdelený na veľké množstvo menších prvkov, ktoré môžu mať rôzny tvar a hustotu. Tento priestor musí byť jasne ohraničený, pričom v nastavení hraníc sa obvykle určujú podmienky správania sa poľa za nimi. Následne program zisťuje neznáme parametre v uzloch elementov pomocou výpočtu sústavy veľkého množstva parciálnych diferenciálnych rovníc. Ďalej tieto programy ponúkajú rôzne doplnkové funkcie a možnosti zobrazenia výsledkov (2D/3D modelovanie, integrovaný grafický editor, exporty výsledkov, časové priebehy, a pod.)

Pre vlastné testy som si zvolil voľne šíriteľný program FEMM 4.2, s ktorým už mám skúsenosti, a ktorý sa práve pre svoju jednoduchosť a absenciu potreby platenia licencií teší pomerne veľkej obľube pri riešení menej náročných problémov.

FEMM je skratkou pre Finite Elements Method Magnetics. Zadanie a riešenie problému je zobrazované v dvojrozmernom priestore. Program však ponúka možnosť stanoviť hĺbku riešeného problému a získať tak výsledky vzťahnuté aj na plochy definované týmto rozmerom. Možnosti tvorby objektov sú veľmi obmedzené a na väčšinu problémov zabudovaný editor nestačí. Vhodnejším postupom je importovanie objektu z externého súboru vo formáte *.dxf.

Samotný program ponúka riešenie štyroch možných problémov:

- **Magnetics Problem** (riešenie magnetických polí)
- **Electrostatics Problem** (riešenie elektrostatických polí)
- **Heat Flow Problem** (riešenie toku tepla)
- **Current Flow Problem** (riešenie toku prúdov)

Pre svoje testy som pochopiteľne použil výpočet magnetického problému, a preto sa v ďalšom texte budem zaoberať len týmto výpočtom. Po samotnom výpočte ponúka program zobrazenie výsledkov v numerickej, ako aj grafickej forme, čo je pre analýzu magnetických polí veľmi dôležité.

4.1.1 Postup tvorby virtuálneho problému

V nasledujúcej časti uvádzam stručný popis príprav a tvorby modelov. Rovnako popisujem niektoré zjednodušenia, ktoré som modely použil pre svoje modely.

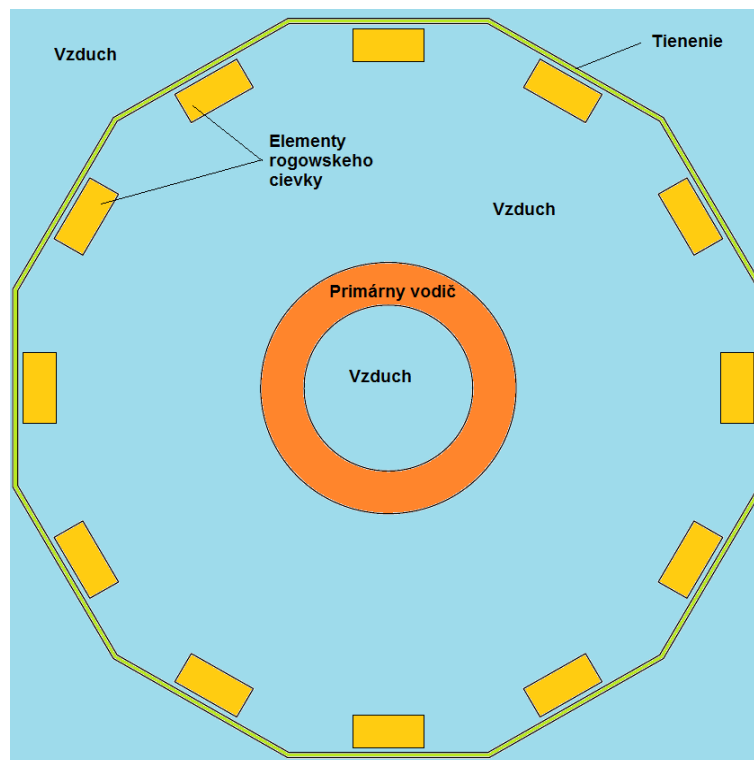
4.1.1.1 Vytvorenie výkresov

Ako už bolo spomenuté, grafický editor programu FEMM slúži skôr pre kreslenie jednoduchých objektov, alebo upravovanie importovaných zostáv. Pre väčšinu problémov je grafický náčrt importovaný z *.dxf súborov vytvorených v inom grafickom prostredí. Z tohto dôvodu bol mojím prvým krokom grafický návrh v programe AutoCAD pričom som použil niektoré zjednodušenia a korekcie.

Obr. 4.1 popisuje model diskkrétnej cievky s polygonálnym tienením. Pre tento model boli prijaté nasledovné zjednodušenia (rovnaké zjednodušenia platia aj pre model diskkrétnej cievky z kruhovým tienením):

- **Absencia dielov nepodielajúcich sa na tvorbe, tienení, či využívaní generovaného magnetického poľa.** V reálnom prostredí nie je rogowského cievka umiestnená vo voľnom priestore. Jednotlivé elementy diskkrétnej rogowského cievky sú umiestnené v plastovom prípravku, ktorý fixuje ich presnú polohu, a zároveň ich mechanicky chráni. Rovnako samotné tienenie má v reálnej situácii svoj nosník, ktorý fixuje jeho polohu.
- **Absencia prírodných a prepojovacích a uzemňovacích vodičov.** Vo virtuálnom návrhu som neuvažoval vodiče použité na prepojenie jednotlivých elementov diskkrétnej rogowského cievky, prípadné vodiče uzemňujúce tienenie, alebo spätné vodiče, pretože ich indukčnosť je oproti indukčnosti rogowského cievky zanedbateľná.
- **Uvažovanie geometrického stredy vinutia.** Pre získanie lepších výstupných napätí je vinutie elementov cievky zhotovené vo viacerých vrstvách. Každá vrstva tak má rozdielnu vnútornú plochu, ktorú ohraničuje. V simulácii som ako aktívny prierez použil priestor ohraničený geometrickým stredom vrstiev vinutí.

- **Zanedbanie vplyvu vinutia.** Vinutie elementu je v reálnom prostredí zhotovené z medeného drôtu navinutého na plastovom jadre. V testoch boli vinutia a ich vplyvy zanedbané a nahradené voľným priestorom vyplneným vzduchom.

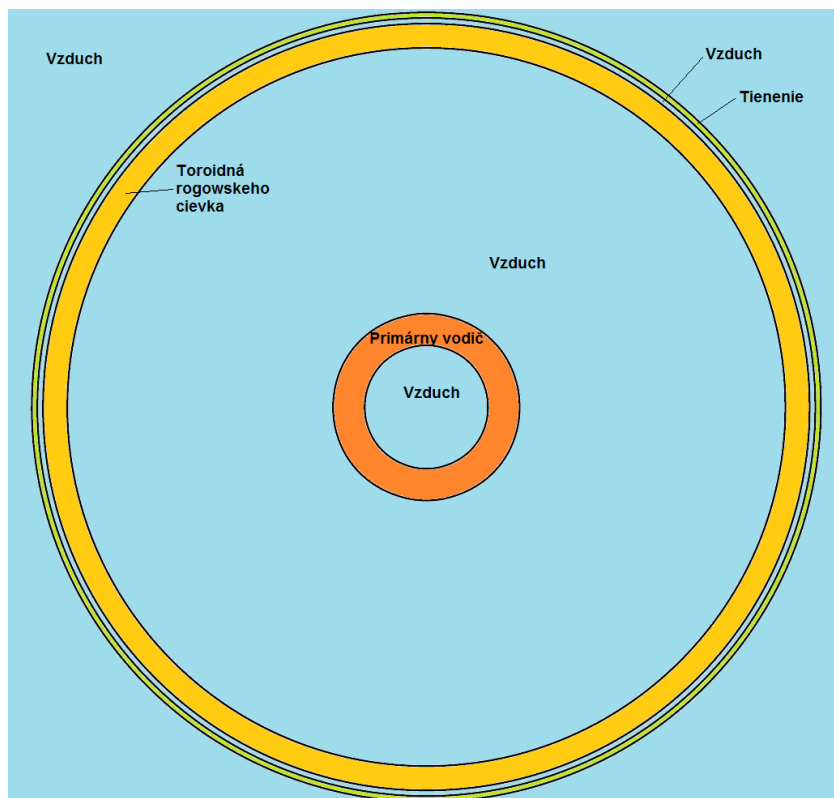


Obr. 4.1 Model diskkrétnej cievky s polygonálnym tienením

Obr. 4.2 popisuje model toroidnej cievky s kruhovým tienením. Pre tento druh cievky nebolo navrhované polygonálne tienenie a boli prijaté nasledovné zjednodušenia:

- **Absencia dielov nepodielajúcich sa na tvorbe, tienení, či využívaní generovaného magnetického poľa.** Toroidná cievka je uložená v plastovom prípravku, ktorý fixuje jej polohu a mechanicky ju chráni.
- **Absencia prívodných a uzemňovacích vodičov.** Indukčnosť vodičov uzemňujúcich tienenie a spätných vodičov je zanedbateľná oproti indukčnosti rogowského cievky.
- **Zanedbanie vyvedenia koncov vodičov.** Toroidná rogowského cievka je spojená v uhle 360° . Neuvažoval som prípadné porušenie konštantného rozloženia závitov kvôli vyvedeniu koncov vinutia.
- **Uvažovanie geometrického stredu vinutia.** Aj pri toroidnom vinutí je pre dosiahnutie lepších výstupných parametrov vinutie zhotovené vo viacerých vrstvách. Preto bol ako aktívny prierez použitý geometrický stred vrstiev vinutí.

- **Zanedbanie vplyvu vinutia.** Vinutie toroidnej cievky je v reálnom prostredí zhotovené z medeného drôtu navinutého na skelete. V testoch bolo vinutie a jeho vplyv zanedbané. Nahradené bolo voľným priestorom vyplneným vzduchom.



Obr. 4.2 Model toroidnej cievky s kruhovým tienením

S uvažovaním vyššie uvedených zjednodušení pre konkrétne druhy rogowského cievok som zostrojil tri virtuálne modely s prihliadnutím na rozmery reálnych prúdových senzorov:

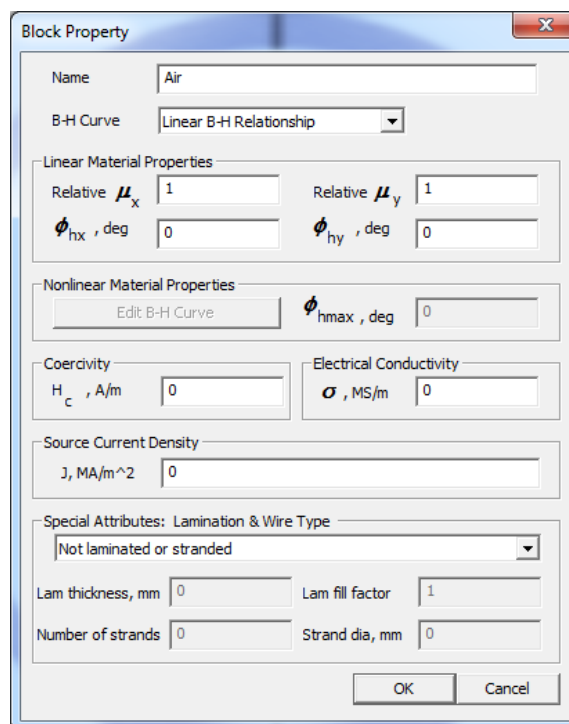
- **Diskrétna rogowského cievka zložená z 12 rovnakých elementov**
- **Diskrétna rogowského cievka zložená z 12+4 rovnakých elementov**
- **Toroidná rogowského cievka**

4.1.1.2 Výber vhodných materiálov

Po importovaní výkresu do prostredia FEMM som musel špecifikovať jednotlivé materiály. Vďaka zjednodušeniam som si vystačil pre všetky simulácie iba s tromi rôznymi materiálmi:

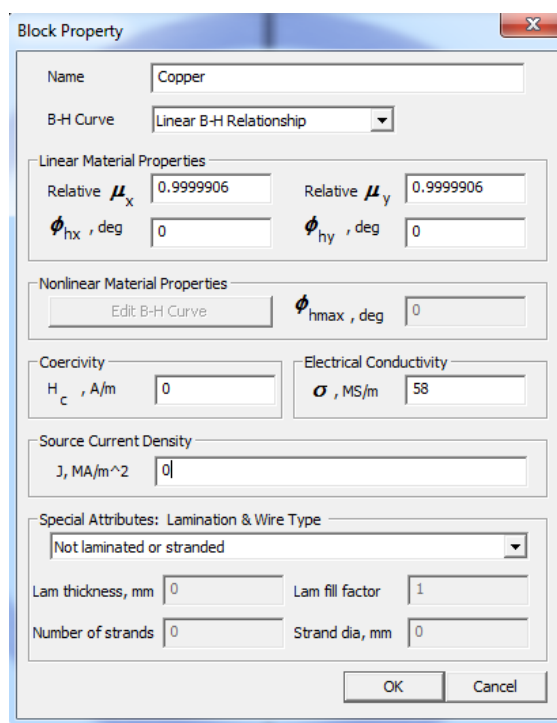
- Vzduch – V samotných testoch som ho používal ako látku pre okolité prostredie a výplň cievok. Vzduch je látka paramagnetická a pri väčšine výpočtov je za hodnotu jeho relatívnej permeability dosadzovaná jednotka. Jeho reálna relatívna permeabilita je približne 1,00000037 [4] a môže sa nepatrne meniť v závislosti na jeho zložení. Pre moje

testy bola hodnota relatívnej permeability vzduchu ponechaná na hodnote jedna. Na **Obr. 4.3** sú zobrazené materiálové nastavenia vzduchu priamo z knižnice materiálov. Pre moje testy som ponechal tieto nastavenia bez zmeny.



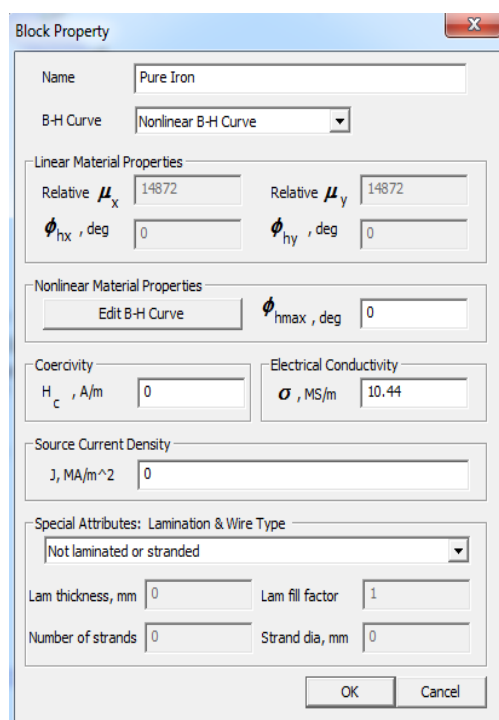
Obr. 4.3 Nastavenia materiálu „Air“ (vzduch)

- Med’ – Použil som ju ako materiál pre primárny vodič, a zároveň ako materiál tienenia. Musím spomenúť, že program FEMM bol v prvom rade navrhnutý pre riešenie problémov rozloženia magnetického poľa vo feromagnetických a paramagnetických látkach, prípadne na ich rozhraní. Rozdiely v relatívnej permeabilite medzi diamagnetickými a paramagnetickými látkami sú zanedbateľné oproti rozdielom medzi paramagnetikami a feromagnetikami. Pravdepodobne z tohto dôvodu majú v programe FEMM všetky látky, ktorých relatívna permeabilita sa blíži jednej, stanovenú relatívnu permeabilitu práve na hodnotu jedna. S takouto hodnotou by však moje testy nemohli priniesť požadované výsledky, a tak bolo potrebné pozmeniť vlastnosti materiálu. Pri hľadaní konkrétnej hodnoty relatívnej permeability medi som narazil na niekoľko rôznych hodnôt, miestami sa líšiacich aj v ráde 10^{-5} , čo je pri diamagnetickom materiáli veľký rozdiel. Nakoniec som prebral hodnotu $\mu_r=0,9999906$ [5]. Výsledné nastavenie pre materiál je zobrazené na **Obr. 4.4**.



Obr. 4.4 Nastavenia materiálu „Copper“ (med')

- Čisté železo – Použil som ho ako materiál pre približujúce sa feromagnetikum. V praxi sa čisté železo takmer nepoužíva no napriek tomu je základom väčšiny konštrukčných kovov. Pre svoje testy som ho použil z dôvodu, že jeho relatívna permeabilita je blízka bežne používaným zliatinám železa s feromagnetickými vlastnosťami. Nastavenia tohto materiálu je možné vidieť na **Obr. 4.5**.

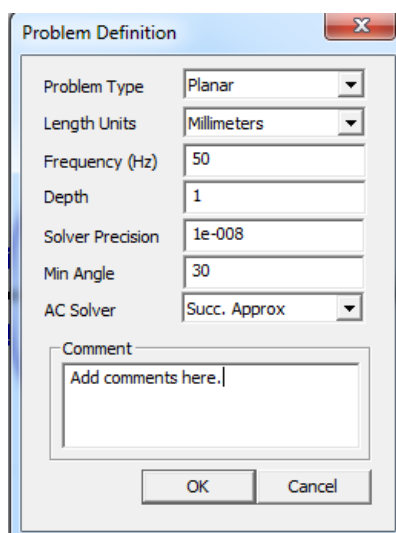


Obr. 4.5 Nastavenia materiálu „Pure Iron“ (čisté železo)

4.1.1.3 Definícia problému

Ďalším dôležitým nastavením je definícia problému, ktorej nastavenie je na **Obr. 4.6**. Vo svojej podstate ide o súbor nastavení, ktoré definujú podmienky, pri ktorých prebieha výpočet. Pre všetky simulácie som použil nasledovné nastavenia:

- **Problem Type: Planar** – Tento parameter určuje, akým spôsobom je vnímaná dvojrozmerná grafika, s ktorou v programe pracujeme. **Planar** (rovinný) dáva grafike význam profilu nekonečnej dĺžky a hĺbka pre výpočty je ďalej definovaná. Druhou možnosťou je **Axisymmetric** (osová súmernosť). Táto hodnota dáva grafike rezu rotovaného v definovanom uhle okolo špecifikovanej osi.
- **Lenght Units: Millimeters** – Tento parameter určuje použité jednotky. Importovaním *.dxf súboru dostaneme do programu akúsi mapu, ktorá udáva relatívne vzdialenosti medzi jednotlivými bodmi, alebo prvkami. Týmto parametrom udávame a meníme význam relatívnych vzdialeností. To znamená, že ak importujeme výkres zostrojený v milimetroch, ale nadefinujeme metre ako dĺžkové jednotky, budeme počítať objekt v mierke 1000:1. Pre zachovanie správnosti výpočtu je potrebné dbať na použitie zhodných jednotiek v programe FEMM a externom grafickom editore.
- **Frequency (Hz): 50** – Udáva frekvenciu akou harmonicky kmitajú nastavované veličiny v obvodoch. V prípade zvolenia nuly by sa jednalo o statický problém.
- **Depth: 1** – jedná sa o vyšpecifikovanie hĺbky problému a využíva rovnaké jednotky ako celý problém (v mojom prípade milimetre). Následne sú výsledné veličiny vzťahnuté na priestor definovaný vykreslenou plochou a nastavenou hĺbkou. Toto pole je prístupné len v prípade, že je **Problem type** na hodnote **Planar**.
- **Solver Precision: 1e-008** – Špecifikuje maximálnu chybu pri aproximácii výsledku.
- **Min Angle: 30** – udáva minimálny uhol vrcholu pri generovaní siete konečných prvkov. Konečné prvky sú trojuholníkového tvaru. Väčší minimálny uhol znamená vyššiu presnosť. Na druhej strane však môže pri generácii siete dôjsť k zlyhaniu.
- **AC Solver: Succ. Approx** – Určuje typ použitého algoritmu pre výpočet. Druhou možnosťou je **Newton**.



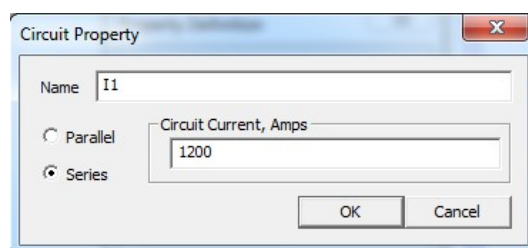
Obr. 4.6 Nastavenia pre definíciu problému

4.1.1.4 Nastavenie prúdu

Pre testovanie závislostí je potrebné okrem nastavení materiálov aj nastavenie prúdu, ktorý bude tiecť primárnym vodičom. Jeho nastavenie je veľmi jednoduché, čo je vítané, keďže ho budem meniť takmer pred každou simuláciou. Príklad nastavenia je na **Obr. 4.7**.

Okno pre nastavenie prúdu obsahuje:

- **Name: I1** – Názov slúži pre identifikáciu prúdu, pretože v rôznych simuláciách sa môže objavovať väčšie množstvo rozdielnych prúdov. V mojom prípade si ale vystačím iba s jedným.
- **Parallel/Series: Series** – Využíva sa hlavne pri simulovaní solenoidov alebo vinutí motorov. Rozhoduje o tom, či nastavená hodnota prúdu bude v označených vodičoch rozdelená paralelne, alebo nimi bude prechádzať v sérii. Moje simulácie obsahujú iba jeden vodič, preto na tomto parametre nezáleží a ponechal som ho na hodnote **Series**.
- **Circuit Current, Amps: 1200** – Slúži pre nastavovanie prúdu tečúceho obvodom s jednotkou ampér. V mojom prípade budem používať hodnoty od 0 do 1200 A.

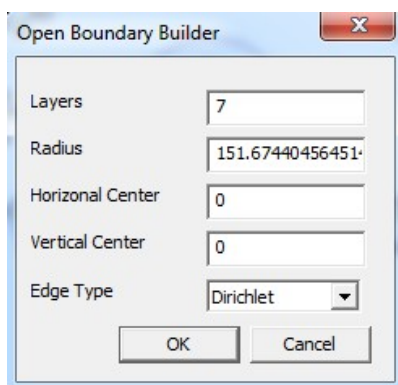


Obr. 4.7 Nastavenie prúdu primárnym vodičom na hodnote 1200 A

4.1.1.5 Tvorba hraníc problému

V programe FEMM je možné hranice manuálne zakresliť a nastaviť ich parametre, prípadne závislosti. Pre účely mojich testov a pravdepodobne aj pre účely väčšiny testov je vhodné, aby sa hranice nachádzali v nekonečnej vzdialenosti. Nekonečná hranica by znamenala neohraničený priestor, ale pre aplikáciu metódy konečných prvkov musí byť priestor jasne ohraničený. Ohraničenie vo veľkej vzdialenosti by sa preto mohlo javiť ako riešenie. Tu však stále narážame na problematiku spojenú s veľkým priestorom, ktorý logicky znamená veľké množstvo prvkov a, teda aj neznámych. To by viedlo k zložitému a zdĺhavému výpočtu za cenu minimálneho zvýšenia presnosti. Preto ponúka program FEMM alternatívu v podobe funkcie **Open Boundary Builder**. Tá sa nachádza na nástrojovej lište a je schopná vytvoriť štruktúru hraničných priestorov napodobujúcu svojimi parametrami hranice v nekonečne. Zároveň však vytvorené hranice ohraničujú relatívne malý priestor, a tak uľahčujú celkový výpočet.

Pre všetky moje testy boli využité hranice navrhnuté funkciou **Open Boundary Builder**. Vo všetkých prípadoch pozostávali zo siedmich vrstiev s centrálnymi súradnicami [0,0], čo zodpovedá centrálnym súradniciam dvojrozmerných modelov cievok v programe AutoCAD. **Edge Type** určuje vlastnosti hranice a bol prijatý navrhnutý parameter **Dirichlet**. Jediným, pre moje testy premenlivým, navrhovaným parameterom bol **Radius** (polomer), ktorý závisel na veľkosti modelovanej rogowského cievky. Pre zachovanie zhody podmienok som hranice vytváral pri modeli bez tienenia, a následne som do tých istých hraníc vkladal modely rovnakej cievky s jednotlivými tieneniami. Príklad navrhovaných parametrov pre prvý model diskretnej cievky s 12 elementami je na **Obr. 4.8**.

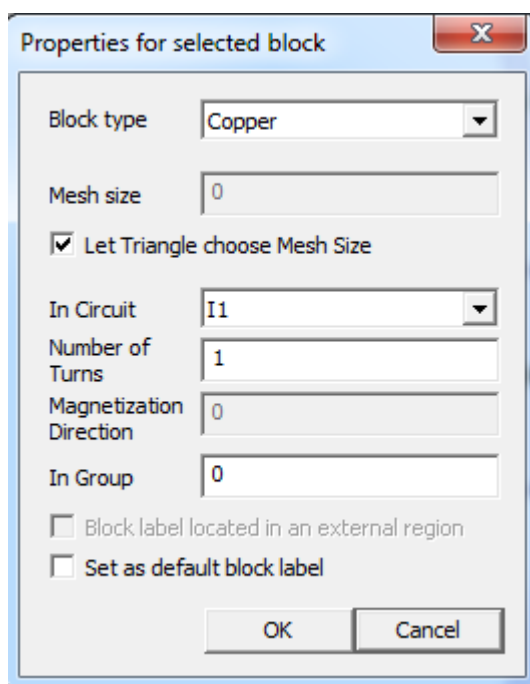


Obr. 4.8 Príklad nastavenia funkcie „Open boundary builder“

4.1.1.6 Nastavenie bloku

V programe FEMM 4.2 musí byť každý priestor s odlišnými vlastnosťami jednoznačne ohraničený. Následne môžu byť takému priestoru priradené požadované vlastnosti. Ich nastavovanie prebieha v okne **Properties for selected block**. Prehľad nastavení pre primárny vodič je na *Obr. 4.9*.

- **Block type: Copper** – Priradí bloku názvom definovaný materiál z knižnice. Tým blok získa nastavené vlastnosti tohto materiálu.
- **Mesh size** – Využíva sa, ak chce užívateľ sám nadefinovať veľkosť elementov siete v danom bloku. V mojom prípade je však nižšie označené políčko **Let Triangle choose Mesh Size. Triangle** je jednou zo súčastí programu FEMM 4.2, zodpovednou za vytvorenie siete. Keďže Programom navrhnutá sieť mi prišla dostatočná, nechával som toto políčko vždy aktivované.
- **In Circuit: I1** – v tomto výbere definujeme bloku jeho podiel na vedení určitého prúdu. Keďže *Obr. 4.8* definuje oblasť primárneho vodiča, je hodnota nastavená na **I1**.
- **Number of Turns: 1** – Bloky v programe FEMM môžu predstavovať celé zväzky závitov, čo sa často využíva pri simulácii vinutia v drážkach motorov. V mojom prípade ide o priamy vodič, a preto je počet závitov 1.
- **Magnetization direction** – využíva sa len v prípade kedy je materiálom permanentný magnet.
- **In group: 0** – dáva možnosť definovať skupinu objektov, s ktorú je možné následne označovať a pracovať s ňou ako s celkom. Predstavuje veľmi užitočné nastavenie pri potrebe posunov feromagnetika v rámci testov.
- **Block label located in external region** – Používa sa pri axisymetrických problémoch, kde existuje odlišný materiál za skúmaným prvkom.
- **Set as default block label** – označením tohto políčka všetky bloky bez nastavených parametrov preberú nastavenia tohto bloku. Osobne túto možnosť nepoužívam preto, aby som pri nezadefinovaní materiálu dostal chybovú hlášku. Znižuje to riziko chybyne zadaného materiálu a nutnosť opakovať simuláciu.



Obr. 4.9 Príklad nastavenia vlastností bloku primárneho vodiča

4.1.2 Priebeh a výsledky testov

V nasledovnom texte stručne popisujem priebeh testov a zobrazujem výsledky jednotlivých virtuálnych testov na modeloch prúdových senzorov na báze rogowského cievky.

4.1.2.1 Závislosť energie mag. poľa v oblasti cievok na primárnom prúde

Prvým testovaným objektom bola diskretná rogowského cievka zložená z 12 rovnakých elementov. Podľa popisu predošlých podkapitol som pri zmene prúdu zisťoval súčet integrálov energie magnetického poľa v elementoch rogowského cievky. Ako je už na prvý pohľad možné pozorovať z hodnôt v **Tab. 4-1**, nárast energie magnetického poľa s prúdom má exponenciálny charakter. Lineárny charakter by som vyjadril napríklad prepočítaním energie na veľkosť magnetického toku podľa vzťahu

$$\Phi = \sqrt{\frac{2 \cdot E_m}{L}} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_m}{\frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l}{2\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2l}{r}\right) - 1 \right]}} \quad [6] \quad (4.1)$$

kde E_m je energia magnetického poľa, L vlastná indukčnosť vodiča l je dĺžka vodiča a r je jeho polomer. Pri mojich testoch však ide predovšetkým o názornosť, a nie o získavanie presných hodnôt. Preto som sa nezaoberal prepočítavaním energie magnetického poľa na magnetický tok,

ale sústredil som sa len na zmeny výstupných veličín pri použití diamagnetického tienenia. Preto rozdiely, ktoré sú v tabuľkách uvedené, platia pre magnetický tok. Príklad ich výpočtu je v rovnici (4.1).

Ako je možné si všimnúť, pri použití kruhového tienenia sa síce nepatrne zvýšili hodnoty energie magnetického poľa, ale toto nepatrné zvýšenie energie predstavuje navýšenie magnetického toku v ráde tisícín percenta a nemá praktický význam.

Inak tomu, ale je pri použití tienenia polygonálneho. V tomto prípade narástla energia magnetického poľa znateľne a magnetický tok tak dosiahol nárast 2% oproti netienenej cievke. Nepredpokladám, že by sa v reálnej situácii podarilo dosiahnuť podobné hodnoty, ale aj ich zlomky by mohli mať priaznivý efekt na presnosť senzoru. Navyiac sa zdá byť percentuálny nárast toku konštantný, čo znamená, že lineárna charakteristika rogowského cievky by nebola narušená.

Tab. 4-1 Výsledky testov závislosti na prim. prúde pre diskretnú cievku s 12 elementami

Prúd [A]	Energia magnetického poľa [J]			Rozdiel v mag. toku [%]	
	Bez tienenia	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením
0	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00
100	1,8623E-08	1,8624E-08	1,9401E-08	1,3424E-03	2,0663E+00
200	7,4494E-08	7,4496E-08	7,7604E-08	1,3424E-03	2,0661E+00
300	1,6761E-07	1,6762E-07	1,7461E-07	1,1932E-03	2,0662E+00
400	2,9798E-07	2,9798E-07	3,1042E-07	1,3424E-03	2,0662E+00
500	4,6559E-07	4,6560E-07	4,8503E-07	1,2887E-03	2,0662E+00
600	6,7044E-07	6,7046E-07	6,9844E-07	1,3424E-03	2,0662E+00
700	9,1255E-07	9,1257E-07	9,5065E-07	1,3150E-03	2,0662E+00
800	1,1919E-06	1,1919E-06	1,2417E-06	1,2585E-03	2,0661E+00
900	1,5085E-06	1,5085E-06	1,5715E-06	1,3258E-03	2,0662E+00
1000	1,8623E-06	1,8624E-06	1,9401E-06	1,3424E-03	2,0663E+00
1100	2,2534E-06	2,2535E-06	2,3475E-06	1,3313E-03	2,0661E+00
1200	2,6818E-06	2,6819E-06	2,7937E-06	1,3051E-03	2,0661E+00

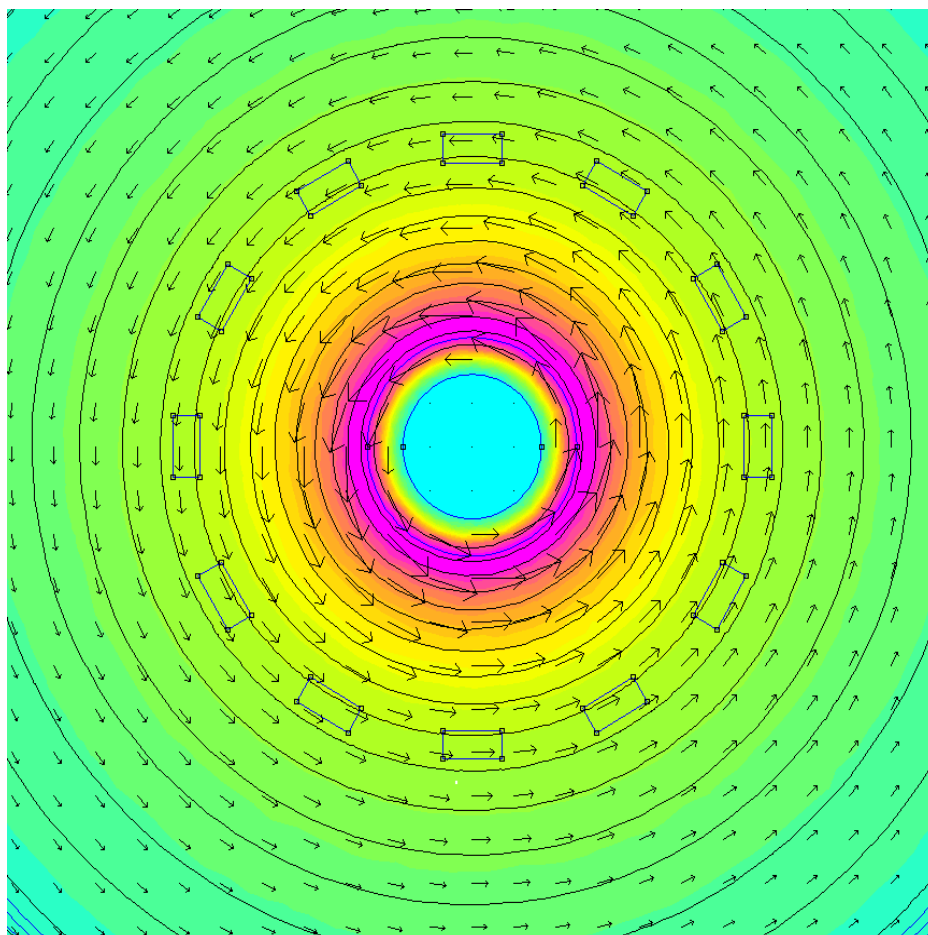
Pre názornosť uvádzam tiež príklad výpočtu pre percentuálny rozdiel v magnetickom toku pri 1200 A medzi cievkou bez použitia tienenia a cievkou s polygonálnym tienením.

$$\Delta = \frac{\sqrt{E_{mp}} - \sqrt{E_{m0}}}{\sqrt{E_{m0}}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{2,7937 \cdot 10^{-6}} - \sqrt{2,6818 \cdot 10^{-6}}}{\sqrt{2,6818 \cdot 10^{-6}}} \cdot 100 = 2,0661\% \quad (4.2)$$

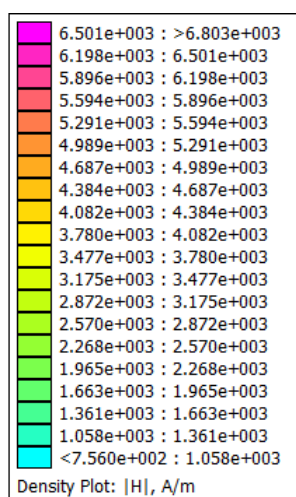
kde E_{mp} je energia poľa s polygonálnym tienením a E_{m0} je energia poľa bez tienenia. Rovnaký výpočet používam aj pre ostatné tabuľky.

Príklad rozloženia intenzity magnetického poľa v okolí vodiča pri 1200 A je na **Obr. 4.10**. Ako je možné pozorovať, magnetické pole je rozložené rovnomerne v kruhových hladinách a vektory intenzity smerom od stredu slabnú.

Legenda farebnej stupnice uvádzam na **Obr. 4.11**. Rovnakú stupnicu budem pre možnosť porovnania používať pre celú podkapitolu.

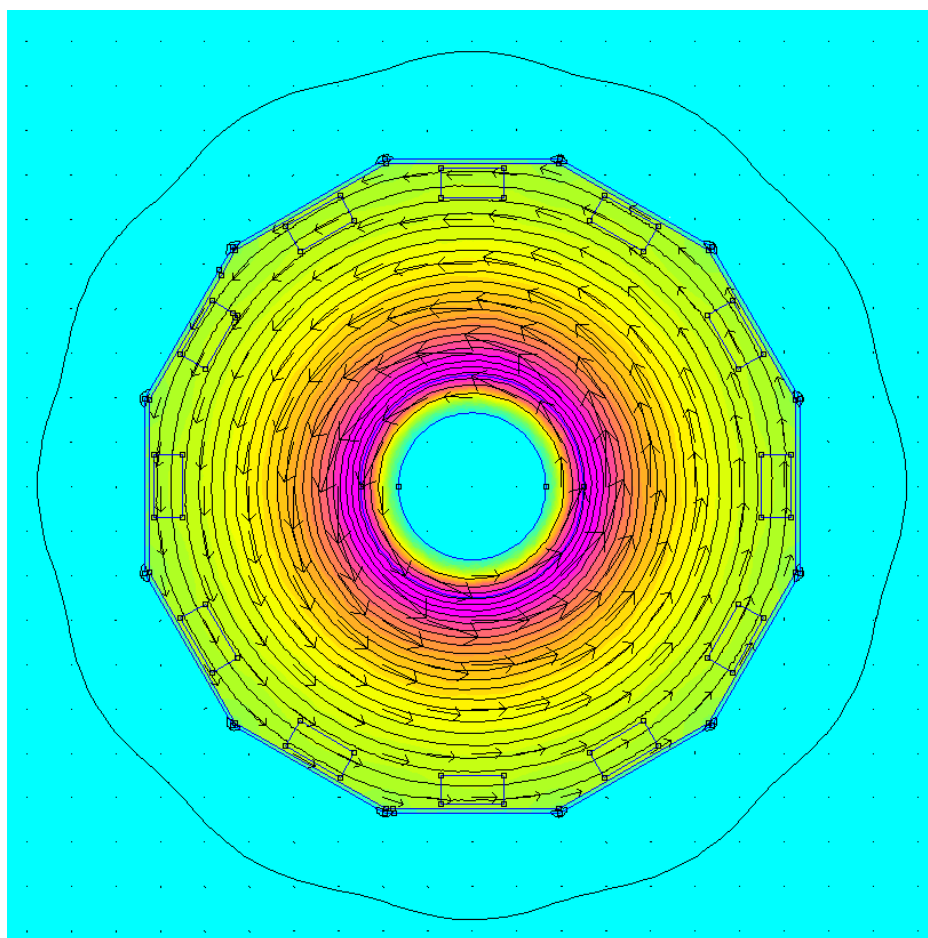


Obr. 4.10 Rozloženie mag. poľa v okolí vodiča prúdu pre cievku s 12 elementami



Obr. 4.11 Legenda pre farebné mapy intenzity mag. poľa platná pre podkapitolu 4.1.2.1

Druhým príkladom na **Obr. 4.12** je rozloženie intenzity magnetického poľa pre rovnaký primárny prúd a použitie polygonálneho tienenia. Väčšia časť magnetického poľa zostala uzavretá v priestore ohraničenom diamagnetickým tienením. Magnetické siločiarly sa v tomto priestore zhustili pričom sa zdá, že si zachovali lineárne stúpanie. Navyiac sa ich tvar zľahka deformoval vplyvom tvaru diamagnetického tienenia. V blízkosti tienenia sa tak siločiarly snažia kopírovať tvar tienenia. To je výhodný jav z pohľadu prechodu magnetického toku elementom rogowského cievky, ktorý je vinutý ako lineárny.



Obr. 4.12 Rozloženie mag. poľa pre cievku s 12 elementami a polygonálnym tienením

Kruhové tienenie nevykazovalo výraznejšie zmeny v energii napriek tomu, že podobne ako pri polygonálnom tienení došlo ku zhutneniu poľa v priestore uzavretom diamagnetickým tienením s kruhovým profilom. Z tohoto dôvodu príklad pre rozloženie magnetického poľa v priestore pri použití kruhového diamagnetického tienenia neuvádzam.

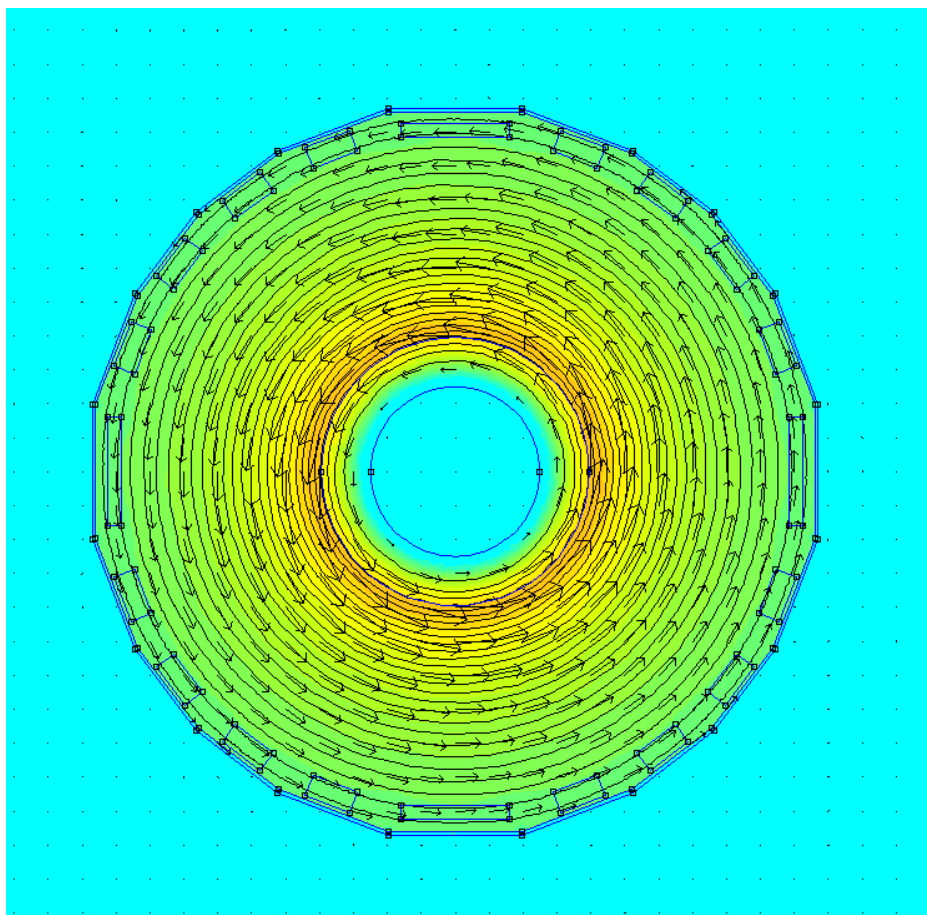
Obdobne ako pre prvú cievku som testy spracoval aj pre druhú diskretnú cievku a toroidnú cievku.

Druhá diskretná cievka (12+4 elementy) vykazovala podobné závislosti, ako tomu bolo v prvom prípade (12 elementov). Vzhľadom na to, že jej vnútorný priemer je asi o polovicu väčší než je tomu u prvej cievky, sú aj hodnoty v energii elektromagnetického poľa rozdielne. Analogicky klesol aj možný zisk magnetického toku použitím polygonálneho diamagnetického tienenia. Napriek tomu dosahuje takmer jedno percento, čo je stále priaznivý výsledok. Viditeľné je to na porovnaní hodnôt v **Tab. 4-2**.

Tab. 4-2 Výsledky testov závislosti na prim. prúde pre diskretnú cievku s 12+4 elementami

Prúd [A]	Energia magnetického poľa [J]			Rozdiel v mag. toku [%]	
	Bez tienenia	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením
0	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00
100	1,5182E-08	1,5182E-08	1,5459E-08	0,0000E+00	9,0879E-01
200	6,0728E-08	6,0728E-08	6,1837E-08	8,2334E-05	9,0879E-01
300	1,3664E-07	1,3664E-07	1,3913E-07	0,0000E+00	9,0886E-01
400	2,4291E-07	2,4291E-07	2,4735E-07	2,0583E-04	9,0895E-01
500	3,7955E-07	3,7955E-07	3,8648E-07	0,0000E+00	9,0879E-01
600	5,4656E-07	5,4656E-07	5,5653E-07	9,1482E-05	9,0877E-01
700	7,4392E-07	7,4392E-07	7,5751E-07	6,7211E-05	9,0880E-01
800	9,7165E-07	9,7165E-07	9,8939E-07	5,1459E-05	9,0880E-01
900	1,2298E-06	1,2298E-06	1,2522E-06	0,0000E+00	9,0866E-01
1000	1,5182E-06	1,5182E-06	1,5459E-06	0,0000E+00	9,0879E-01
1100	1,8370E-06	1,8370E-06	1,8706E-06	0,0000E+00	9,0876E-01
1200	2,1862E-06	2,1862E-06	2,2261E-06	0,0000E+00	9,0886E-01

Ďalší rozdiel je spôsobený použitím väčšieho počtu elementov, pričom 12 je rovnakých ako v prvom prípade a 4 sú užšie, ale dlhšie. Tomu zodpovedalo aj navrhnuté polygonálne tienenie, ktoré je spolu s výsledným magnetickým poľom možné vidieť na **Obr. 4.13**. Legenda pre intenzitu magnetického poľa je rovnaká ako v predošlom prípade. Je preto jasne vidieť, že magnetické pole je rozložené vo väčšom priestore a jeho intenzita v oblasti rozloženia rogowského cievky je nižšia.



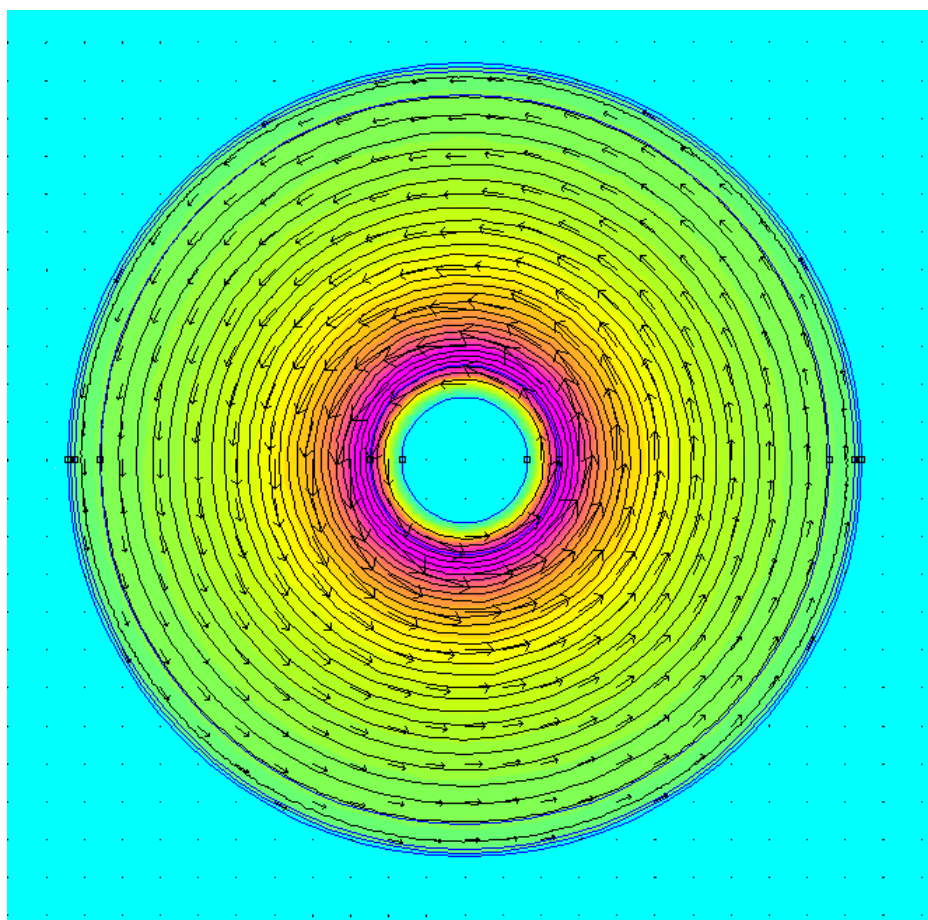
Obr. 4.13 Rozloženie mag. poľa pre cievku s 12+4 elementami a polygonálnym tiením

Tab. 4-3 ukazuje súpis výsledkov testov pre toroidnú rogowského cievku. Táto má zo všetkých najväčší vnútorný priemer (takmer dvojnásobný oproti prvej cievke), a preto pracuje s najslabším poľom. Jej výhodou je však kontinuita vinutia, ktorá sa prejavuje väčším pokrytým priestorom, a teda aj väčším ziskom. Z výsledkov je patrné, že energia magnetického poľa toroidnej cievky bola vyššia než energia diskretnej cievky s polovičným priemerom. Zisk použitím tienenia je asi pol percenta. Jeho pokles zodpovedá nárastu vzdialenosti.

Tab. 4-3 Výsledky testov závislosti na prim. prúde pre toroidnú cievku

Prúd [A]	Energia magnetického poľa [J]		Rozdiel v mag. toku [%]
	Bez tienenia	S kruhovým tienením	S kruhovým tienením
0	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00
100	3,2725E-08	3,2755E-08	4,5673E-02
200	1,3090E-07	1,3102E-07	4,5444E-02
300	2,9453E-07	2,9479E-07	4,5656E-02
400	5,2360E-07	5,2408E-07	4,5635E-02
500	8,1812E-07	8,1887E-07	4,5643E-02
600	1,1781E-06	1,1792E-06	4,5402E-02
700	1,6035E-06	1,6050E-06	4,5826E-02
800	2,0944E-06	2,0963E-06	4,5587E-02
900	2,6507E-06	2,6531E-06	4,5638E-02
1000	3,2725E-06	3,2755E-06	4,5673E-02
1100	3,9597E-06	3,9633E-06	4,5700E-02
1200	4,7124E-06	4,7167E-06	4,5614E-02

Magnetické pole simulácie s toroidnou cievkou a kruhovým tienením je možné pozorovať na **Obr. 4.14**. Obdobne ako pri predošlých prípadoch bola pre farebnú mapu použitá rovnaká mierka. Keďže tienenie je v tomto prípade kruhového profilu, magnetické pole sa tvarovo nedeformuje.



Obr. 4.14 Rozloženie mag. poľa pre toroidnú cievku s kruhovým tienením

4.1.2.2 Závislosť energie mag. poľa v oblasti cievok na vzdialenosti feromagnetika

V nasledovných testoch som simuloval približujúci sa železný plech o hrúbke 5 mm. Vlastnosti tohoto materiálu je možné nájsť v predošlom texte. Približovanie prebiehalo pre všetky modely s krokom 5 mm vo vzdialenostiach 5-45 milimetrov od okraju cievky. Prúd v primárnom vodiči je zhodný pre celý rozsah testov a má hodnotou 1200 A.

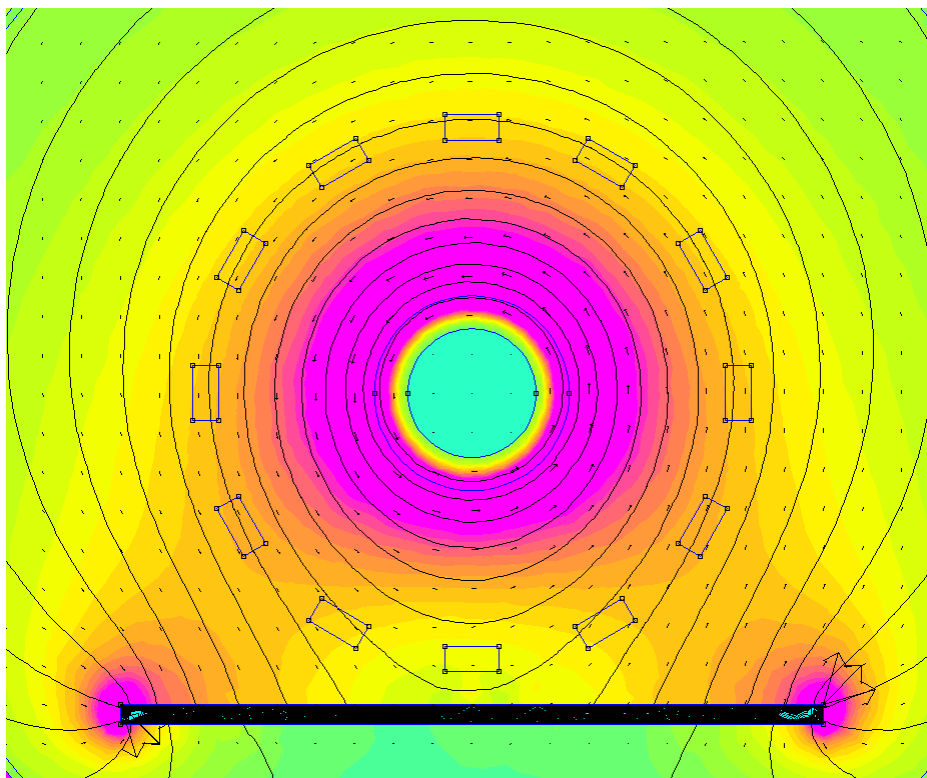
Výsledky testov pre diskretnú cievku s 12 elementami je možné vidieť v **Tab. 4-4**. Už na prvý pohľad je patrný vplyv diamagnetického tienenia, aj keď nepredpokladám, že by malo reálne tak veľký vplyv. U obidvoch tienení sa účinok s približujúcim materiálom zväčšoval.

Tab. 4-4 Výsledky testov blízkeho feromagnetika pre diskretnú cievku s 12 elementami

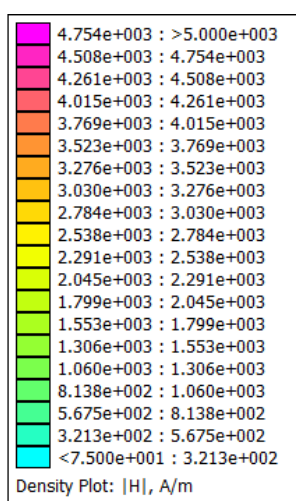
Vzdialenosť od okraja cievky [mm]	Energia magnetického poľa [J]			Rozdiel v mag. toku [%]	
	Bez tienenia	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením
5	3,1770E-06	2,6921E-06	2,7899E-06	-7,9470E+00	-6,2909E+00
10	3,1026E-06	2,6888E-06	2,7928E-06	-6,9070E+00	-5,1242E+00
15	2,9928E-06	2,6875E-06	2,7926E-06	-5,2374E+00	-3,4033E+00
20	2,9928E-06	2,6868E-06	2,7910E-06	-5,2501E+00	-3,4301E+00
25	2,9493E-06	2,6876E-06	2,7904E-06	-4,5394E+00	-2,7315E+00
30	2,9134E-06	2,6878E-06	2,7899E-06	-3,9500E+00	-2,1418E+00
35	2,8931E-06	2,6872E-06	2,7893E-06	-3,6238E+00	-1,8098E+00
40	2,8695E-06	2,6868E-06	2,7893E-06	-3,2350E+00	-1,4058E+00
45	2,8482E-06	2,6857E-06	2,7892E-06	-2,8942E+00	-1,0415E+00

Na **Obr. 4.15** je ukážka testu pre vzdialenosť 10 mm od okraja cievky bez použitia tienenia. Je možné si na ňom všimnúť výrazné deformácie magnetického poľa. Táto deformácia môže spôsobovať nepresnosti vo virtuálnych testoch, pretože energia magnetického poľa, ktorú používam ako výstupnú veličinu je skalárna veličina. Na výstupe cievky sa však prejaví iba účinky poľa, ktoré je rovnobežné s normálami plôch závitov cievky.

Legenda farebnej mapy intenzity magnetického poľa je na **Obr. 4.16** a je spoločná pre všetky príklady testov na prítomnosť feromagnetika. Je tak možné výsledky porovnávať.

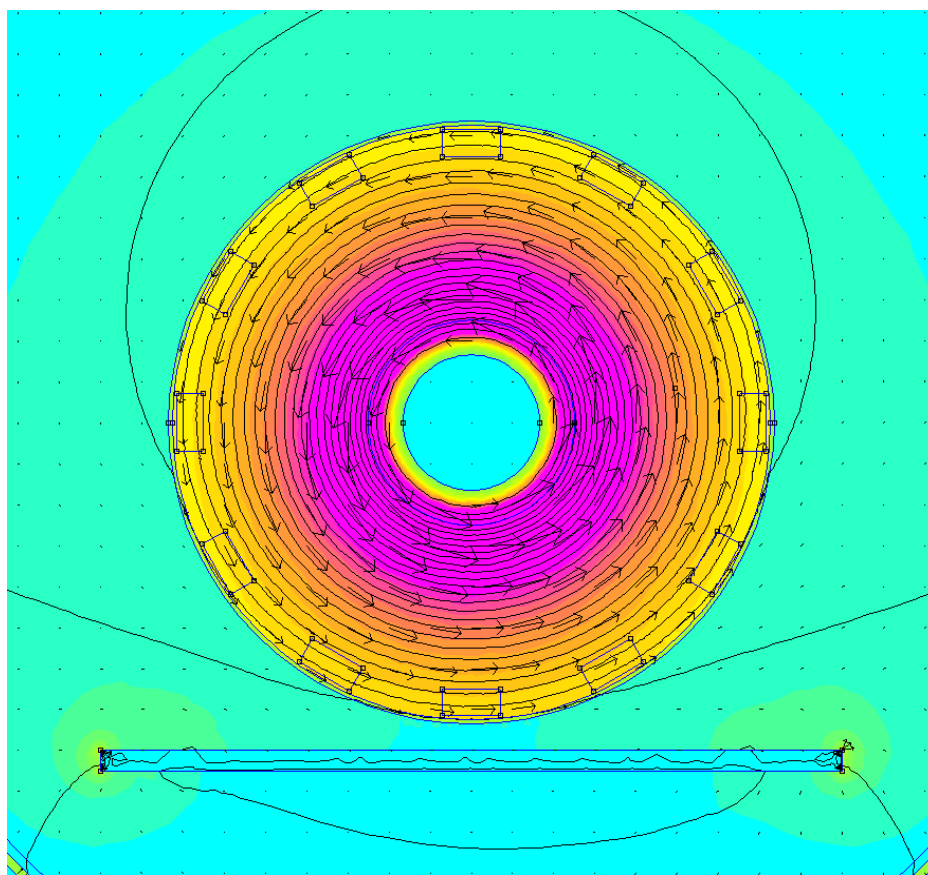


Obr. 4.15 Vplyv blízkeho feromagnetika na cievku s 12 elementami



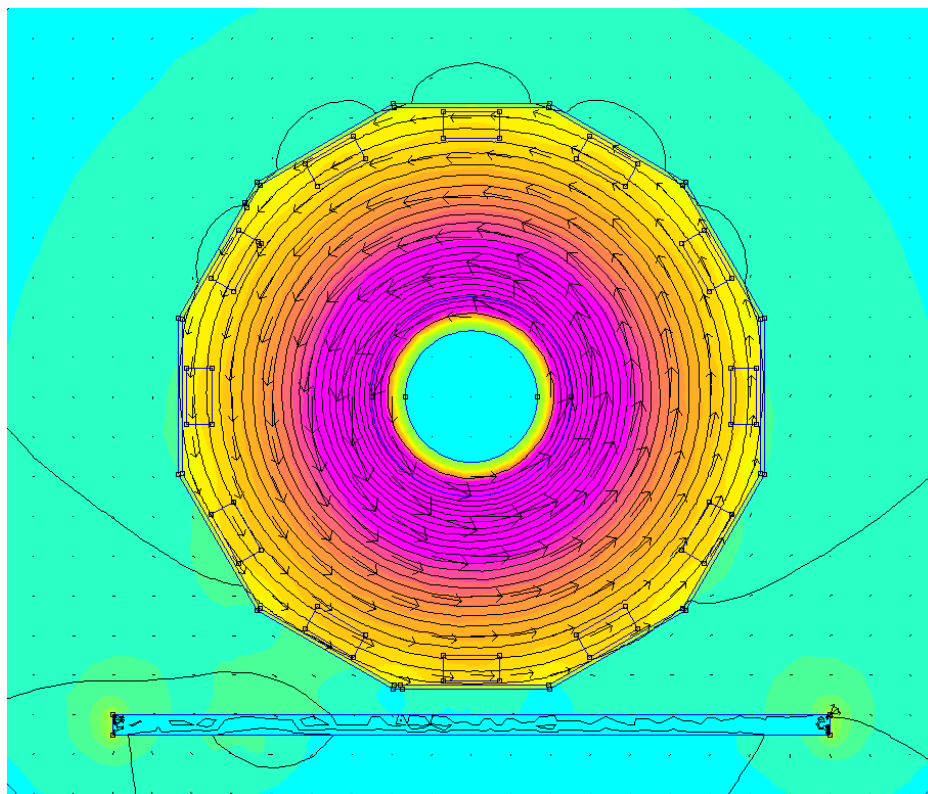
Obr. 4.16 Legenda pre farebné mapy intenzity mag. poľa platná pre podkapitolu 4.1.2.2

Obr. 4.17 ukazuje rozloženie magnetického poľa v prítomnosti feromagnetického materiálu a použítí kruhového diamagnetického tienenia. Na základe výsledkov testu sa zdá, že kruhové tienenie je najlepšie pre potlačenie vplyvov blízkych feromagnetických materiálov, no polygonálne tienenie za ním nijak výrazne nezaostáva.



Obr. 4.17 Vplyv blízkeho feromagnetika na cievku s 12 elementami a kruhovým tienením

Príklad polygonálneho diamagnetického tienenia v kombinácii s blízkym feromagnetickým materiálom je uvedené na **Obr. 4.18**. Jeho zľahka horšie vlastnosti možno pripísať rovným plochám mnohoúhelníku, kde je väčšia šanca, že niektorá zo siločiar prestúpi von pod uhlom 90° bez väčšej zmeny pôvodnej dráhy.



Obr. 4.18 Vplyv blízkeho feromagnetika na cievku s 12 elementami a polygonálnym tienením

Pre diskretnú cievku s 12+4 elementami udáva výsledky testov **Tab. 4-5**. Rozloženie magnetických polí bolo obdobné ako v predošlom prípade, a preto uvádzanie konkrétnych grafických výstupov nepovažujem za nutné. Percentuálne rozdiely v priepustnosti tienenia len mierne stúpili. Rovnako ako v predošlom prípade sa účinok tienenia zväčšuje s približujúcim sa feromagnetikom.

Tab. 4.5 Výsledky testov blízkeho feromagnetika pre diskretnú cievku s 12+4 elementami

Vzdialenosť od okraja cievky [mm]	Energia magnetického poľa [J]			Rozdiel v mag. toku [%]	
	Bez tienenia	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením
5	2,7207E-06	2,1946E-06	2,2311E-06	-1,0188E+01	-9,4436E+00
10	2,6030E-06	2,1945E-06	2,2295E-06	-8,1808E+00	-7,4529E+00
15	2,5192E-06	2,1915E-06	2,2269E-06	-6,7306E+00	-5,9807E+00
20	2,4899E-06	2,1912E-06	2,2266E-06	-6,1906E+00	-5,4367E+00
25	2,4692E-06	2,1908E-06	2,2265E-06	-5,8054E+00	-5,0414E+00
30	2,4515E-06	2,1906E-06	2,2263E-06	-5,4719E+00	-4,7050E+00
35	2,4353E-06	2,1904E-06	2,2261E-06	-5,1607E+00	-4,3909E+00
40	2,4227E-06	2,1902E-06	2,2260E-06	-4,9208E+00	-4,1456E+00
45	2,4097E-06	2,1901E-06	2,2259E-06	-4,6657E+00	-3,8903E+00

Tab. 4-6 obsahuje výsledky pre testy na modeli toroidnej cievky. Kruhové diamagnetické tienenie ovplyvňovalo magnetické pole obdobne ako v predošlých prípadoch, a preto grafické znázornenie neuvádzam. Rovnako ako v predošlom prípade sa účinok tienenia zväčšuje s približujúcim sa feromagnetikom.

Tab. 4.6 Výsledky testov blízkeho feromagnetika pre toroidnú cievku

Vzdialenosť od okraja cievky [mm]	Energia magnetického poľa [J]		Rozdiel v mag. toku [%]
	Bez tienenia	S kruhovým tienením	S kruhovým tienením
5	5,6352E-06	4,7354E-06	-8,3304E+00
10	5,4037E-06	4,7315E-06	-6,4261E+00
15	5,3487E-06	4,7285E-06	-5,9759E+00
20	5,3026E-06	4,7274E-06	-5,5794E+00
25	5,2812E-06	4,7267E-06	-5,3956E+00
30	5,2459E-06	4,7261E-06	-5,0829E+00
35	5,2063E-06	4,7256E-06	-4,7284E+00
40	5,1713E-06	4,7251E-06	-4,4114E+00
45	5,1599E-06	4,7247E-06	-4,3107E+00

Výsledky virtuálnych testov na približujúce sa feromagnetikum potvrdzujú výhody použitia diamagnetického tienenia. V tomto prípade sa však, bez ohľadu na usporiadanie rogowského cievok, lepšie prejavuje kruhové diamagnetické tienenie. Ich rozdiely sú však minimálne.

4.1.2.3 Závislosť energie mag. poľa v oblasti cievok na cudzieho vodiča prúdu

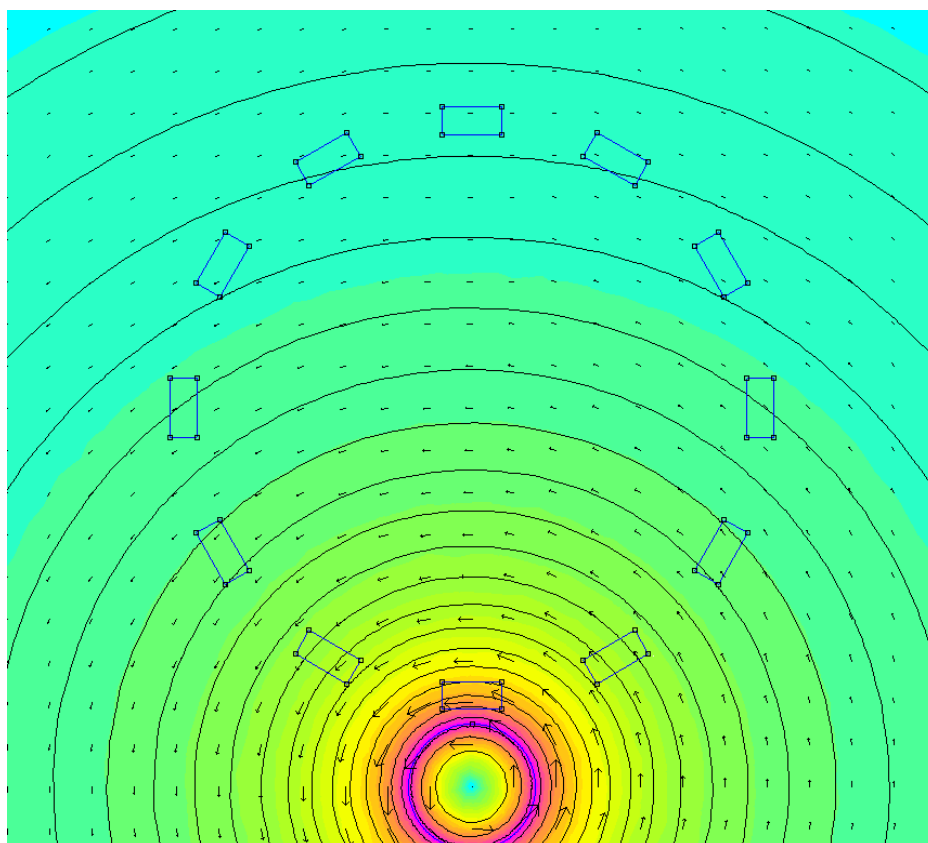
Poslednou sériou virtuálnych testov je posudzovanie vplyvu crosstalku, alebo vplyvu pôsobenia cudzieho magnetického poľa na rogowského cievku. Obdobne ako v predošlom prípade, môže byť použitie energie magnetického poľa ako referenčnej veličiny trochu zavádzajúce z pohľadu samotnej presnosti cievky, pretože nerešpektuje v smer, v ktorom cudzie magnetické pole pretína závitov rogowského cievky. Spolu s grafickými riešeniami však je možné získať prehľad o skutočnom význame vplyvu. Krok cudzieho vodiča je opäť pre všetky testy 5 mm v rozmedzí 5-45 mm. Prúd tečúci vodičom je 1200 A.

Prvým súborom výsledkov testov je **Tab. 4-7**, v ktorej sú zapísané hodnoty pre diskretnú cievku s 12 elementami. Ani v tomto prípade nie je medzi použitím kruhového a polygonálneho tienenia výrazný rozdiel. Z čiste tabuľkových hodnôt sa zdá byť polygonálne tienenie o niečo lepšie. V oboch prípadoch vplyv tienenia s približujúcim sa vodičom jemne klesá.

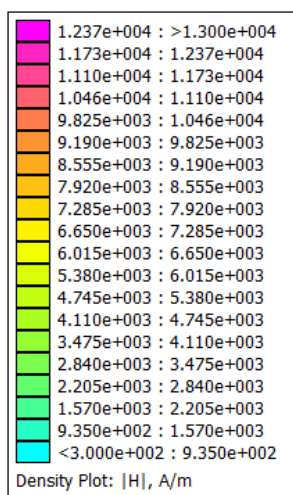
Tab. 4-7 Výsledky testov blízkeho vodiča pre diskretnú cievku s 12 elementami

Vzdialenosť od okraja cievky [mm]	Energia magnetického poľa [J]			Rozdiel v mag. toku [%]	
	Bez tienenia	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením
5	3,8951E-06	3,0590E-06	3,0178E-06	-1,1380E+01	-1,1978E+01
10	2,9743E-06	2,2757E-06	2,2458E-06	-1,2528E+01	-1,3105E+01
15	2,3946E-06	1,7861E-06	1,7618E-06	-1,3635E+01	-1,4224E+01
20	1,9918E-06	1,4541E-06	1,4341E-06	-1,4557E+01	-1,5147E+01
25	1,6970E-06	1,2140E-06	1,1979E-06	-1,5420E+01	-1,5983E+01
30	1,4704E-06	1,0344E-06	1,0213E-06	-1,6126E+01	-1,6658E+01
35	1,2912E-06	8,9460E-07	8,8330E-07	-1,6762E+01	-1,7289E+01
40	1,1459E-06	7,8389E-07	7,7364E-07	-1,7292E+01	-1,7835E+01
45	1,0257E-06	6,9389E-07	6,8523E-07	-1,7751E+01	-1,8265E+01

Na **Obr. 4.19** je ukážka testu pre umiestnenie cudzieho vodiča 10 mm od okraja cievky bez použitia tienenia. K farebnej mape pre grafické zobrazenia testov v tejto podkapitole náleží legenda na **Obr. 4.20**. Magnetické pole tohto vodiča je kruhového tvaru a jeho siločiarly prestupujú jednotlivými elementami rogowského cievky velektricky rôznych smeroch. Smer prestupu sa mení so vzdialenosťou od vodiča. V reálnej aplikácii by sa pôsobenie týchto (z pohľadu cievky) opačne orientovaných polí na výstupnom napätí cievky vzájomne odčítavalo. Pre skalárnu energiu magnetického poľa však toto neplatí. Preto sa viac zameriavam na vplyv diamagnetického tienenia. Podľa výsledkov z testov mal byť jeho vplyv značný.

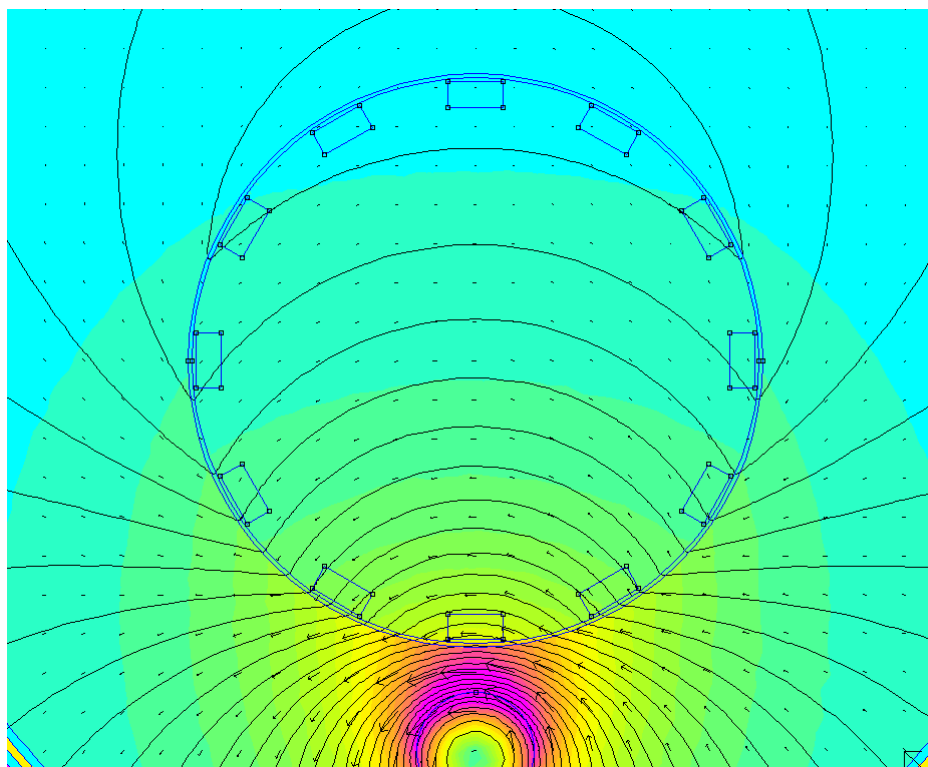


Obr. 4.19 Vplyv blízkeho vodiča prúdu na cievku s 12 elementami



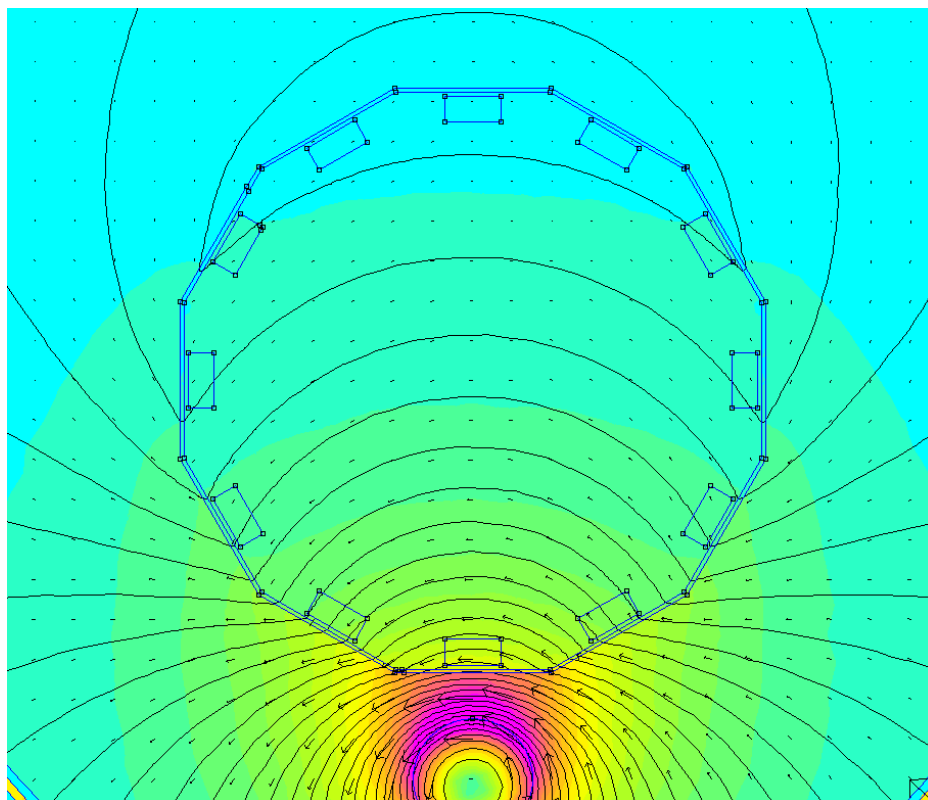
Obr. 4.20 Legenda pre farebné mapy intenzity mag. poľa platná pre podkapitulu 4.1.2.3

Na **Obr. 4.21** je grafické znázornenie vplyvu kruhového tienenia na magnetické pole cudzieho vodiča. Je na ňom vidieť oslabenie magnetického poľa v priestore uzatvorenom kruhovým diamagnetickým tienením, pričom tvar tohto poľa sa výrazne zmenil iba mimo tienenie. V priestore tienenia došlo len k ľahkým deformáciám. Tým sa zachová podobný pomer magnetických tokov cievkou v elektricky opačných smeroch.



Obr. 4.21 Vplyv blízkeho vodiča prúdu na cievku s 12 elementami a kruhovým tienením

Posledným grafickým znázornením je rozloženie magnetického poľa na **Obr. 4.22** pri použití polygonálneho tienenia. Jeho deformácia v priestore tienenia je o niečo väčšia ako tomu bolo pri kruhovom tienení, no tiež je patrné jeho väčšie oslabenie.



Obr. 4.22 Vplyv blízkeho vodiča prúdu na cievku s 12 elementami a polygonálnym tienením

Tab. 4-8 zobrazuje výsledky testov pre diskretnú cievku s 12+4 elementami. Znovu je možné u tejto cievky pozorovať vyššie vplyvy diamagnetického tienenia než u cievky s menším vnútorným priemerom. Ostatné závislosti, ako aj ľahká prevaha výhod polygonálneho tienenia sú obdobné. Obdobné sú aj zmeny v rozložení magnetického poľa, a preto grafické závislosti znovu neuvádzam.

Tab. 4-8 Výsledky testov blízkeho vodiča pre diskretnú cievku s 12+4 elementami

Vzdialenosť od okraja cievky [mm]	Energia magnetického poľa [J]			Rozdiel v mag. toku [%]	
	Bez tienenia	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením
5	5,4259E-06	2,9298E-06	2,9096E-06	-2,6517E+01	-2,6771E+01
10	4,1510E-06	2,2638E-06	2,2483E-06	-2,6151E+01	-2,6405E+01
15	3,3427E-06	1,8155E-06	1,8033E-06	-2,6302E+01	-2,6551E+01
20	2,7851E-06	1,4974E-06	1,4873E-06	-2,6676E+01	-2,6925E+01
25	2,3776E-06	1,2616E-06	1,2536E-06	-2,7157E+01	-2,7390E+01
30	2,0671E-06	1,0804E-06	1,0738E-06	-2,7705E+01	-2,7925E+01
35	1,8210E-06	9,3927E-07	9,3313E-07	-2,8180E+01	-2,8415E+01
40	1,6212E-06	8,2480E-07	8,1919E-07	-2,8672E+01	-2,8915E+01
45	1,4565E-06	7,3167E-07	7,2685E-07	-2,9124E+01	-2,9358E+01

Tab. 4-9 zobrazuje výsledky testov pre toroidne vinutú cievku. Rovnako pre ňu platia obdobné závislosti a rozloženie polí ako pri predošlých testoch.

Tab. 4-9 Výsledky testov blízkeho cudzieho vodiča pre toroidnú cievku

Vzdialenosť od okraja cievky [mm]	Energia magnetického poľa [J]		Rozdiel v mag. toku [%]
	Bez tienenia	S kruhovým tienením	S kruhovým tienením
5	1,0197E-05	7,4944E-06	-1,4270E+01
10	8,0226E-06	5,6334E-06	-1,6203E+01
15	6,5713E-06	4,4259E-06	-1,7931E+01
20	5,5352E-06	3,5910E-06	-1,9454E+01
25	4,7572E-06	2,9876E-06	-2,0753E+01
30	4,1512E-06	2,5309E-06	-2,1917E+01
35	3,6681E-06	2,1791E-06	-2,2924E+01
40	3,2743E-06	1,8995E-06	-2,3835E+01
45	2,9450E-06	1,6745E-06	-2,4595E+01

Z výsledkov virtuálnych testov pre crosstalking vyplýva pomerne výrazný vplyv diamagnetického tienenia. Ak by sa tento vplyv podarilo dosiahnuť aj pri reálnych testoch, mohlo by to v praxi znamenať nižšie nároky na rozostupy medzi susednými vodičmi.

4.1.3 Zhrnutie a záver virtuálnych testov

Z virtuálnych testov vyplynulo, že použitie diamagnetického tienenia je vo väčšej, či menšej miere výhodné pri každom z uvedených problémov. Grafické výsledky navyše poskytnú orientačný náhľad na správanie sa magnetických polí v priestore s paramagnetickými a diamagnetickými materiálmi.

Je však potrebné pripomenúť, že program FEMM 4.2 tvorí výpočty pre nekonečne dlhý modelovaný profil. To znamená, že program neberie do úvahy len nekonečne dlhý vodič, ale aj nekonečne dlhé tienenie. V reálnej situácii však bude vodič dlhší, ako prípadné tienenie senzoru, a preto budú mať magnetické polia tendenciu obtekať toto tienenie. Aj preto nie je možné tvoriť jednoznačné závery len z výsledkov simulácií.

Na základe simulácii je možné vyjadriť istú podobnosť v správaní sa polí v reakcii na diamagnetické a paramagnetické látky, nezávisle na použítom type cievky. Rovnako existuje podobnosť vplyvu na zisťované referenčné hodnoty a ich zmeny. Na základe tejto podobnosti som sa rozhodol vykonať reálne testy iba na modeli diskretnej cievky s 12 elementami. Výsledky tohto testovania by mali obdobne platiť aj pre ostatné cievky.

Po zjednodušení reálnych testov postačovalo vyrobiť samotnú diskretnú cievku a 2 kusy diamagnetického tienenia (kruhovú a polygonálnu). Rovnako sa na tretinu skrátil čas potrebný pre laboratórne testy. Vďaka virtuálnym testom bola teda dosiahnutá časová aj finančná úspora.

Pre reálne testovanie som stanovil obdobné úlohy ako pre virtuálne testy. Rozdiel bol v počte hodnôt pre jednotlivé testy. Pred samotným testovaním boli, s ohľadom na laboratórne vybavenie, upravené hodnoty prúdov a veľkosti vzdialeností pri testoch na prítomnosť feromagnetika a cudzieho vodiča.

4.2 Reálne testovanie v laboratórnych podmienkach

V nasledovnej podkapitole uvediem podmienky a výsledky reálnych testov na rogowského cievke, spolu s ich stručným zhodnotením. Samotného testovania som sa osobne zúčastnil a v prípade potreby ho korigoval. Predpisy firmy však nedovoľujú obsluhu laboratórnej techniky iným, než povolaným osobám, a tak bola obsluha meracích prístrojov ponechaná zamestnancom skúšobne.

4.2.1 Príprava na testy

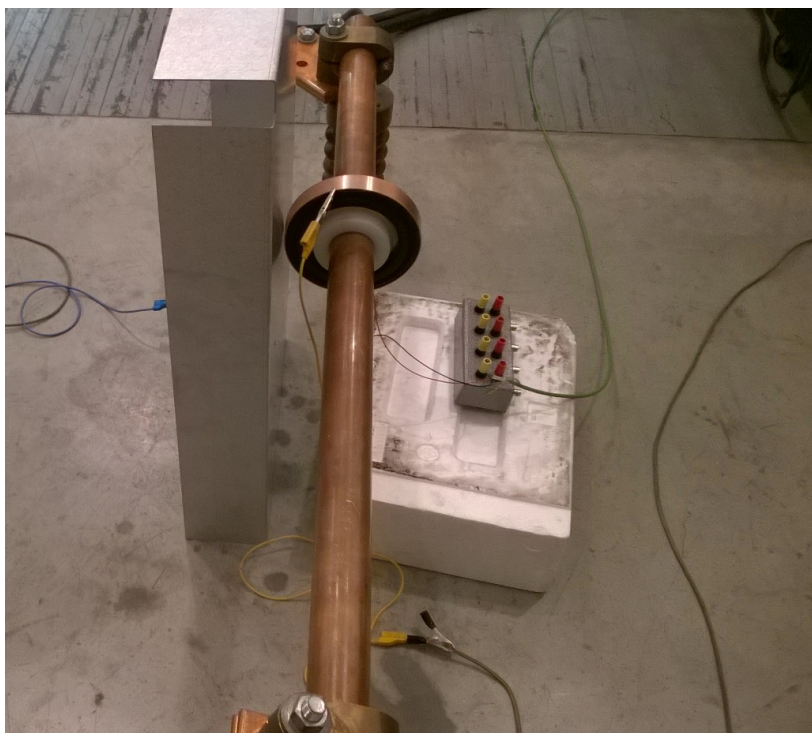
Testy prebiehali na prúdovodnej dráhe napájanej z výkonového transformátora. Dodávaný prúd je ý referenčným senzorom. Výstupné napätie testovaného senzoru je porovnávané s referenčným, a ako výsledná hodnota je zobrazený percentuálny rozdiel výstupných hodnôt. Pre samotné testovanie sa nastavovala percentuálna hodnota nominálneho prúdu $I_n = 1000$ A. Tieto percentuálne hodnoty nie je možné nastaviť tak, aby s dokonalou presnosťou zodpovedali hodnotám požadovaným. Pre posúdenie vplyvu však postačujú.

Použité prístroje:

- Systém ZERA 10 MOhm, 0.150 V
- Prúdový normál Tettex 4724 1000/1 A
- Zdroj 250 V, 50 A, 50 Hz

4.2.2 Priebeh a výsledky testov

Následne bolo možné pristúpiť k samotnému testovaniu. Pre názornosť uvádzam ešte aspoň jeden snímok (Obr. 4.23) zo zapojenia laboratórnej techniky pri í. Konkrétne ide o testovanie vplyvu blízkeho feromagnetického materiálu pri použití kruhového diamagnetického tienenia.



Obr. 4.23 Rozmiestnenie úlohy pri testovaní vplyvu feromagnetika na cievku s kruhovým tienením

4.2.2.1 Závislosť rozdielu výst. signálu na primárnom prúde

Výsledky testu závislosti výstupného signálu na primárnom prúde sú zobrazené v **Tab. 4-10**. Pri zvyšovaní primárneho prúdu rozdiel výstupného signálu cievky bez tienenia rôzne kolísal, a preto nie je možné určiť jeho závislosť. Pri použití kruhového tienenia je znateľný nárast rozdielu výstupného signálu do záporných hodnôt. Navyiac bol menší, ako pôvodný signál bez tienenia. To nesúhlasí s virtuálnym testom, podľa ktorého malo dôjsť k zosilneniu.

Zaujímavé sú však hodnoty pri použití polygonálneho diamagnetického tienenia, s ktorým sa rozdiel výstupných hodnôt signálu dostal až do kladného rozdielu oproti referenčnej hodnote. Následne síce spadol ľahko pod nulu, stále si však zachoval svoj kladný charakter oproti signálu nameranému bez tienenia. V tomto prípade by sa mohlo jednať o hľadaný jav deformácie magnetického poľa podľa tvaru rogowského cievky.

Tab. 4-10 Výsledky laboratórnych testov prúdovej závislosti cievky

Požadovaný prúd [A]	Percentuálna hodnota nominálneho prúdu [%]			Percentuálny rozdiel oproti ref. hodnote [%]		
	Bez tienenia	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením	Bez tienenia	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením
0	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000
40	4,04	3,93	4,10	-0,051	-0,164	0,027
80	8,00	7,98	8,03	-0,048	-0,188	0,013
160	16,03	15,85	16,12	-0,043	-0,217	0,008
320	31,96	31,97	32,15	-0,049	-0,270	-0,006
640	64,03	64,07	63,86	-0,045	-0,347	-0,015
1250	124,95	125,40	125,10	-0,020	-0,368	-0,007

4.2.2.2 Závislosť rozdielu výst. signálu na vzdialenosti feromagnetika

Výsledky testu závislosti výstupného signálu na primárnom prúde sú zobrazené v **Tab. 4-11**. Pre reálny test bola nastavovaná hodnota prúdu $I=640$ A a feromagnetickým materiálom bol 2 mm hrubý aluzinkovaný plech. Test rogowského cievky bez tienenia vykazuje podobnosť s virtuálnym testom. Feromagnetický materiál znížil reluktanciu prostredia, ktorým následne tiekol väčší magnetický tok. Ten pretekal aj závitmi cievky a konečné výstupné napätie vzrástlo. So vzdľaňovaním feromagnetika reluktancia prostredia stúpala a výstupný signál klesal.

Obdobným poklesom sa v reálnom teste prejavil aj simulovaný priebeh cievky s kruhovým tienením. Tu však zase došlo k oslabeniu výstupného signálu oproti variante bez použitia tienenia.

Pri použití polygonálneho tienenia sme rovnako zaznamenali pokles výstupného signálu so vzdialenosťou feromagnetika. Tento pokles bol však strmější ako pri testovaní samostatnej cievky, čo sa so simuláciou nezhoduje.

Tab. 4-11 Výsledky laboratórnych testov závislosti cievky na vzdialenosti feromagnetika

Vzdialenosť feromagnetika [mm]	Percentuálna hodnota nominálneho prúdu [%]			Percentuálny rozdiel oproti ref. hodnote [%]		
	Bez tienenia	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením	Bez tienenia	S kruhovým tienením	S polygonálnym tienením
0	63,96	63,87	64,02	0,086	-0,423	0,112
4	63,94	64,08	63,80	0,078	-0,456	0,108
20	63,96	63,96	64,15	0,047	-0,547	0,058
72	63,93	63,84	63,99	0,040	-0,592	0,002
160	63,92	63,92	64,01	-0,007	-0,652	-0,042

4.2.2.3 Závislosť rozdielu výst. signálu na vzdialenosti cudzieho vodiča prúdu

Výsledky testu závislosti výstupného signálu na primárnom prúde sú zobrazené v **Tab. 4-12**. Pre reálny test bola nastavovaná hodnota prúdu cudzím vodičom $I=640$ A.

V prvom prípade sa opäť samostatná cievka správala podľa predpokladov a virtuálnych testov. Rozdiel jej výstupného napätia oproti referenčnej hodnote so vzdľaňujúcim sa vodičom stúpala. To znamená, že klesal výstupný výkon testovanej cievky, keďže bola vystavovaná postupne stále slabšiemu magnetickému poľu.

Pri použití kruhového a polygonálneho tienenia sa objavili zvláštne kolísania hodnôt (pretrvali pri pokuse o zopakovanie), a preto ich výsledky nepovažujem za relevantné.

ie vplyvu blízkeho vodiča pretekaného prúdom bolo najnáchylnejším im na rušenie. V laboratóriu sa nepodarilo nájsť prípravok, ktorý by dokázal fixovať vodič a rogowského cievku tak, aby bola simulované rovnobežná vzájomná poloha vodičov.

Tab. 4-12 Výsledky laboratórných testov závislosti cievky na crosstalking

Vzdialenosť feromagnetika [mm]	Percentuálna hodnota nominálneho prúdu [%]			Percentuálny rozdiel oproti ref. hodnote [%]		
	Bez tienenia	S kruhovým tinením	S polygonálnym tinením	Bez tienenia	S kruhovým tinením	S polygonálnym tinením
4	63,90	64,02	64,12	-99,458	-99,310	-99,904
20	63,98	63,97	64,01	-99,789	-99,935	-99,594
72	63,72	64,20	64,05	-99,902	-99,856	-99,602
160	63,83	64,03	64,03	-99,931	-99,852	-99,673

4.2.3 Zhrnutie reálnych testov

Počas reálnych testov sa podarilo overiť niektoré závislosti vyjadrené teoretickými úvahami a virtuálnymi testami. Ďalšie závislosti si síce udržali rovnaký charakter (stúpajúci/klesajúci), ale ich hodnoty sa pohybovali v iných pomeroch než predpokladali virtuálne testy.

Použitím čistejších materiálov s overenými diamagnetickými vlastnosťami pre výrobu tienenia a meraním za použitia presnejšej laboratórnej techniky by sa však ďalšie testy mohli priblížiť virtuálnym testom.

5 ZÁVER

V práci boli objasnené základné teoretické poznatky o princípoch fungovania prúdových senzorov na báze rogowského cievok. Rovnako tak boli stručne predstavené ich výhody ako aj nevýhody a možné ekonomické dopady na prevádzku energetických zariadení. Ďalej boli uvedené niektoré zo základných spôsobov členenia rogowského cievok z pohľadu technologického prevedenia, alebo použitia. Nasledoval stručný úvod do problematiky magnetických vlastností materiálov, spolu s popisom niektorých kľúčových hodnotiacich veličín.

V druhej časti práce som sa zamerlal na vlastné teoretické zhodnotenie účinkov magnetického poľa v okolí vodiča pretekaného prúdom. Na stacionárnom probléme som popísal význam reluktancie prostredia a vplyv feromagnetických a diamagnetických materiálov na zmenu vlastností prostredia s možnými dopadmi na presnosť rogowského cievky. Na základe teoretických poznatkov som sa rozhodol zamerať na použitie diamagnetických materiálov pre účely magnetického tienenia a zlepšovania parametrov výstupného signálu rogowského cievky.

„Uzavretie“ magnetického poľa generovaného vodičom prúdu, za pomoci diamagnetického materiálu, by malo priniesť zvýšenie hustoty magnetického toku v oblasti umiestnenia rogowského cievky. Toto pole by si malo naďalej zachovať svoju linearitu. Tým by bola dosiahnutá silnejšia väzba medzi primárnym vodičom a prúdovým sensorom. Z toho vyplýva zvýšenie výstupného napätia rogowského cievky. Zároveň by sa malo prejaviť aj odtienenie rušivých (vonkajších) magnetických pol, čím by bol dosiahnutý väčší odstup signálu od šumu.

Špeciálne pre diskkrétne cievky, zložené z lineárne vinutých elementov som navrhol polygonálne tienenia (príklad na **Obr. 4.1**), ktoré svojim tvarom deformujú magnetické pole tak, aby prechádzalo jednotlivými elementami v smere približujúcom sa smeru normály plochy závitov a tým sa $\cos \alpha$ z rovnice (2.8) blížil jednej. V súčasne používaných cievkach toto nie je nijako riešené, a preto rovnica (2.9) platí len pre cievky, ktorých tvar osi je zhodný s tvarom magnetického poľa vodiča.

Následne som navrhol systém testov, ktoré by potvrdili alebo, vyvrátili moje predpoklady. Testy boli zamerané na zisťovanie odozvy rogowského cievky v závislosti od prúdu primárnym vodičom, od vzdialenosti feromagnetického materiálu a od vzdialenosti cudzieho vodiča pretekaného prúdom. Tieto závislosti som testoval so všetkými navrhnutými tieneniami, ako aj bez ich použitia. Testy som sa rozhodol najprv spracovať virtuálne a následne laboratórne.

Virtuálne testy boli spracované v dvojrozmernom priestore pomocou programu FEMM 4.2. Podrobnejší popis a výsledky jednotlivých testov sú popísané v podkapitole 4.1. Pri testoch som sa potýkal s problémom výberu vhodnej výstupnej veličiny. Nakoniec som si

zvolil energiu magnetického poľa, ktorá má síce radu nevýhod, no pre účel testov dostačovala. Výsledky virtuálnych testov síce potvrdili väčšinu mojich predpokladov, ale zároveň však musím uznať, že obsahujú radu zjednodušení a idealizovaných podmienok.

Hodnotným výstupom virtuálnych testov však bol nález podobnosti vlastností, a odozvy všetkých testovaných modelov rogowského cievok. Práve z tohto dôvodu som sa následne rozhodol pre obmedzenie laboratórnych testov na jeden model rogowského cievky. Vybral som model diskkrétnej cievky s 12 lineárnymi elementami. Na túto cievku som nechal vyrobiť kruhové a polygonálne tienenie z medeného plechu o šírke 1,5 mm pre laboratórne testy obdobné testom virtuálnym.

V podkapitole 4.2 sa nachádza podrobnejší popis laboratórnych testov a ich výsledkov. Výstupnou hodnotou laboratórneho testovania bola percentuálna odchýlka výstupného napätia od hodnoty získavanej z referenčného senzoru. Konkrétne pre testovanie crosstalku by viac vyhovovalo priame meranie výstupného napätia, nemali sme však k dispozícii merací prístroj s dostatočne veľkým vstupným odporom.

Vo väčšine prípadov výsledky laboratórnych testov potvrdili zmeny výstupných parametrov rogowského cievky v testovaných závislostiach, zhodovali as však len v charaktere zmeny (nárast, alebo pokles výstupného signálu). V prevažnej väčšine prípadov sa však nepodarilo overiť priaznivý účinok diamagnetického tienenia na výstupné napätie, ktoré bolo najmä použitím kruhového tienenia znižované.

Priaznivý výsledok som však dosiahol s polygonálnym tienením pri zisťovaní závislosti odozvy na primárnom prúde (**Tab. 4-10**). V tomto prípade bolo zaznamenané zvýšenie výstupného napätia oproti verzii bez tienenia o 0,2-0,3 %. Pri testoch na crosstalk vykazovalo drobné zhoršenie parametrov. Pri teste závislosti od vzdialenosti feromagnetika bola strmosť poklesu výstupného napätia senzoru väčšia, čo je tiež nepriaznivý jav.

Výsledky laboratórnych testov síce vo veľkej väčšine nepotvrdili moje teoretické úvahy a virtuálne testy, nemôžem však ani povedať, že by ich vyvrátili. Do laboratórnych testov mohla byť zavlečená chyba hneď z niekoľkých strán. Tienenia boli zostrojené z materiálu, ktorý bol k dispozícii, no neboli u neho overené diamagnetické účinky (permeabilita). Magnetické vlastnosti materiálov silne závisia na množstve prímiesí a nečistôt, ale aj na technológii spracovania. Ďalej muselo byť tienenie zvnútra vystužené 5 mm širokým kusom novoduru, ktorý určite tiež vykazuje určité paramagnetické, alebo diamagnetické vlastnosti. Následne musíme brať do úvahy chybu merania, odpočtu hodnôt a charakteristiku referenčného senzoru.

Pre budúce testy by som preto navrhol priame meranie výstupného napätia (ideálne osciloskopicky), použitie materiálov tienenia s overenými diamagnetickými vlastnosťami a výrobu tienenia bez potreby výstuhu.

POUŽITÁ LITERATÚRA A SOFTWARE

- [1] Ljubomir A. KOJOVIC, Robert BERESH, Martin T. BISHOP, Radek JAVORA, Bruce MAGRUDER, Peter McLAREN, Brian MUGALIAN, Arnold OFFNER: Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying. In: *PSRC - IEEE PES Committees* [online]. IEEE PSRC Special Report, 2010 [vid. 2015_04_13]. Dostupné z: http://www.pes-psrc.org/Reports/Practical%20Aspects%20of%20Rogowski%20Coil%20Applications%20to%20Relaying_Final.pdf
- [2] M. ARGEÜESO, G. ROBLES, J. SANZ: Measurement of high frequency currents with a rogowski coil. In: *AEDIE* [online]. Department of Electrical Engineering E.P.S. Universidad Carlos III de Madrid [vid. 2015_04_14]. Dostupné z: <http://www.aedie.org/9CHLIE-paper-send/252-argueso.pdf>
- [3] David E. SHEPARD, Donald W. YAUCH: An overview of rogowski coil current sensing technology. In: *DynAmp* [online]. LEM DynAMP Inc. 3735 Gantz Road [vid. 2015_04_13]. Dostupné z: [http://www.dynamp.com/ldadocum.nsf/c2270fbdd892ac3e86256e75000ad88a/e710af6d3e0f6255862565d7004b19db/\\$FILE/Report.pdf](http://www.dynamp.com/ldadocum.nsf/c2270fbdd892ac3e86256e75000ad88a/e710af6d3e0f6255862565d7004b19db/$FILE/Report.pdf)
- [4] B. D. CULLITY, C.D. GRAHAM: *Introduction to magnetic materials*. 2nd ed. Piscataway: IEEE Press, c2008. ISBN 978-0-471-47741-9. str. 16
- [5] Sarhan M. MUSA: *Nanoscale Spectroscopy with Applications* [online]. illustrated ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 978-4-66-56853-2 [vid. 20.4.2015], str. 533
Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=QWxmAQAAQBAJ&pg=PA533&lpg=PA533&dq=permeability+diamagnetic+copper+0.9999906&source=bl&ots=IV0m_GCNA7&sig=nkZe8MZMy9eKKoCoKho07_PuA8g&hl=cs&sa=X&ei=7N1FVfzHDYLaU_frgPAM&ved=0CCkQ6AEwAg#v=snippet&q=%200.9999906&f=false
- [6] Záhlava, V. Metodika návrhu plošných spojů. FEL ČVUT, Praha, 2000, 1. vyd., 81 s., ISBN 80-010-2193-9.
- [7] *FMFI UK Department of Radiophysics* [online]. doc. RNDr. Andrej Jarošević, Csc. <http://www.drpf.fmph.uniba.sk/~mahel/FCH/Fyzikalne%20polia.pdf>. Dostupná
- [8] *Finite Element Method Magnetics: HomePage* [online]. David MEEKER, Ph.D.. z: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. Dostupná
- [9] ABB, s.r.o [online]. *KECA80 C104; KECA80 C165* Indoor current sensor. c2014 [vid. 25.4.2015]. Dostupné z:

https://library.e.abb.com/public/45a77813ab272f3ec1257c3c003e645d/KECA%2080%20C104_C165_1VLC000715%20Rev%20-%20en%202013%2010.pdf?filename=KECA%2080%20C104_C165_1VLC000715%20Rev%20-%20en%202013%2010.pdf

- [10] David MEEKER. *FEMM 4.2* [software]. 15.11.2013. [prístup 28.3.2015]. Dostupné z: <http://www.femm.info/wiki/Download>
- [11] Autodesk Inc., *AutoCAD 2012* [software]. © Copyright 2011 [prístup 2012] Dostupné z: <http://www.autodesk.com/education/free-software/all>. Požiadavky na systém: Microsoft Windows 7 Enterprise, Ultimate, Professional, or Home Premium ([compare Windows 7 versions](#)); Microsoft Windows Vista Enterprise, Business, Ultimate, or Home Premium (SP2 or later) ([compare Windows Vista versions](#)); or Microsoft Windows XP Professional (SP2 or later), AMD Athlon 64 with SSE2 technology, AMD Opteron® processor with SSE2 technology, Intel® Xeon® processor with Intel EM64T support and SSE2 technology, or Intel Pentium 4 with Intel EM64T support and SSE2 technology, 2 GB RAM, 2 GB free space for installation, 1,024 x 768 display resolution with true color, Internet Explorer 7.0 or later, Install from download or DVD