

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

FEM analýza součtového transformátoru
FEM Analysis of Differential Current Transformer

2014

Martin Suhaj

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Suhaj**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **FEM analýza součtového transformátoru**
FEM Analysis of Differential Current Transformer

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Rozbor činnosti součtového transformátoru, základní princip funkce
3. Vytvořte FEM model součtového transformátoru
4. Proveďte elektromagnetickou analýzu FEM modelu
5. Vyhodnocení
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje, Praha, 1985, SNTL
- CIGÁNEK, Ladislav. Elektrické přístroje, Praha, 1956, SNTL
- ARTBAUER, Otto. Tepelný výpočet elektrických přístrojů, SVTL Bratislava, 1963, SVŠT Bratislava
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

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

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

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

Dne: 7.5.2014

Martin Suhaj
.....
Martin Suhaj

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za poskytnuté rady, informace a pomoc. Dále bych chtěl poděkovat partnerce a rodině za podporu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na FEM analýzu. Tato analýza byla provedena na součtovém transformátoru. Jelikož se bude hovořit o transformátoru, je potřeba také uvést základy elektrických strojů, historie transformátorů a jejich funkce, princip součtových transformátorů a jejich aplikace v proudových chráničích. Pro analýzu byl zde použit program Ansof Maxwell. Program je založen na metodě konečných prvků. V tomto programu byl vytvořen celý model a provedena analýza. Jednotlivé výsledky byly uvedeny, popřípadě srovnány.

Klíčová slova

FEM analýza, součtový transformátor, transformátory, proudové chrániče, analýza modelu, historie transformátorů, elektrické stroje

Abstract

This bachelor work focuses on the FEM analysis. This analysis was performed on differential current transformer. As will be discussed on the transformer is also required to state the basics of electrical machines, history of transformers and their functions, principle differential current transformer and their application in residual current device. For analysis was used here program Ansof Maxwell. The program is based on the finite element method. In this program was created entire model and performed analysis. Individual results were shown optionally compared.

Key words

FEM analysis, differential current transformer, transformer, residual current device, analysis model, history of transformers, electrical machines

Seznam použitých symbolů a zkratek

t	Čas	s
l	Délka vodiče	m
N	Počet závitů	
U	Elektrické napětí	V
R	Elektrický odpor	Ω
I	Elektrický proud	A
f	Frekvence	Hz
H	Intenzita magnetického pole	$A \cdot m^{-1}$
B	Magnetická indukce	T
Φ	Magnetický tok	Wb
u	Okamžitá hodnota napětí	V
i	Okamžitá hodnota proudu	A
F_m	Magnetomotorické napětí	A
μ	Permeabilita prostředí	$H \cdot m^{-1}$
S	Plocha	m^2
X	Reaktance	Ω
p	Převod transformátoru	
FEM	Finite element method	
MKP	Metoda konečných prvků	
Δt	Rozdíl času	s
$\Delta \Phi$	Rozdíl magnetického toku	Wb
v	Rychlost	$m \cdot s^{-1}$
α	Úhel	rad
ω	Úhlová rychlost	$rad \cdot s^{-1}$

Seznam obrázků

- Obr. 2.1 Vznik indukovaného napětí
- Obr. 2.2 Směr a smysl intenzity magnetického pole přímého vodiče, kterým prochází proud
- Obr. 2.3 Indukční čáry magnetického pole cívky, magnetický tok cívky s toroidním jádrem
- Obr. 3.1 Faradayův první transformátor, dvě cívky navinuté na železném toroidu
- Obr. 3.2 Princip činnosti transformátoru
- Obr. 3.3 Úplné náhradní schéma transformátoru
- Obr. 3.4 Náhradní schéma transformátoru naprázdno, fázorový diagram transformátoru naprázdno
- Obr. 3.5 Náhradní schéma transformátoru nakrátko, fázorový diagram transformátoru nakrátko
- Obr. 4.1 Funkce součtového transformátoru
- Obr. 4.2 Vznik reziduálního proudu
- Obr. 4.3 Sčítací transformátor proudu pro zemní jištění s děleným magnetickým obvodem pro montáž na kabel, typ AEK – 80b, 60/1 A (Siemens & Halske).
- Obr. 4.4 Součtová zapojení.
- Obr. 4.5 Součtový transformátor proudu SIO – 3.0
- Obr. 5.1 Schématická značka proudového chrániče
- Obr. 5.2 Konstrukce proudového chrániče – blokově
- Obr. 5.3 Vypínací časy proudových chráničů
- Obr. 5.4 Blokové schéma proudového chrániče reagující na všechny druhy reziduálních proudů
- Obr. 6.1 Zde je zobrazený proudový chránič, ze kterého bude vymontován součtový transformátor
- Obr. 6.2 Součtový transformátor vyjmutý z proudového chrániče
- Obr. 6.3 Rozložený součtový transformátor, vlevo na obrázku je obal jádra a na pravé straně je jádro
- Obr. 6.4 Rozměry jádra a obalu
- Obr. 7.1 Tvorba jádra
- Obr. 7.2 Popis jednotlivých částí neúplného modelu
- Obr. 7.3 Ukázka pomocného polygonu pro vymezení části sekundární cívky
- Obr. 7.4 Volba materiálu pro sekundární cívku a průchozí vodiče
- Obr. 7.5 Vložení externích dat zvolených druhů materiálů
- Obr. 7.6 Zobrazení volby okrajových podmínek
- Obr. 7.7 Volba elektrických vlastností
- Obr. 7.8 Vložení externího obvodu
- Obr. 7.9 Vložení externího obvodu
- Obr. 7.10 Volba grafů pro vykreslení proudu a napětí
- Obr. 7.11 Zvolení hustoty elementů
- Obr. 7.12 Zobrazení výpočetních sítí v modelu
- Obr. 7.13 Schéma externího obvodu
- Obr. 8.1 Stav před poruchou
- Obr. 8.2 Stav po vzniku poruchy
- Obr. 8.3 Průběh proudu a indukovaného napětí

- Obr. 8.4 Průběh proudu a indukovaného napětí v $t=15,6\text{ms}$
- Obr. 8.5 Průběh proudu a indukovaného napětí v $t=12,6\text{ms}$
- Obr. 8.6 Průběh proudu a indukovaného napětí v $t=9,6\text{ms}$
- Obr. 8.7 Ultraperm 10
- Obr. 8.8 Ultraperm 200
- Obr. 8.9 Ultraperm 200

Seznam tabulek

Tab. 5.1 Rozmezí vybavovacích proudů pro proudové chrániče podle ČSN IEC 755

Tab. 7.1 Materiály pro typ AC

Tab. 7.2 Materiál pro typ A

Tab. 8.1 Výsledky porovnání

Obsah

1	Úvod	1
2	Základy elektrických strojů.....	2
2.1	Indukční zákon.....	2
2.1.1	Časová změna magnetického toku.....	2
2.1.2	Pohyb vodiče v magnetickém poli.....	3
2.2	Magnetické pole okolo vodiče.....	3
2.3	Vznik střídavého sinusového napětí.....	4
3	Transformátory	5
3.1	Historie.....	5
3.2	Rozdělení	6
3.3	Konstrukční uspořádání	6
3.4	Princip činnosti	7
3.5	Indukované napětí.....	7
3.6	Převod transformátoru	8
3.7	Náhradní schéma.....	8
3.7.1	Transformátor naprázdno	9
3.7.2	Transformátor nakrátko.....	9
4	Součtový transformátor.....	10
4.1	Princip.....	10
4.2	Použití	11
5	Proudový chránič	13
5.1	Konstrukce	13
5.2	Princip.....	14
5.3	Rozdělení	15
5.3.1	Z hlediska předmětových norem.....	15
5.3.2	Z hlediska citlivosti.....	15
5.4	Druhy reziduálních proudů	15
5.4.1	Stejnoseměrné reziduální proudy.....	16
5.4.2	Proudový chránič reagující na všechny druhy reziduálních proudů	16
6	Uvedení do problematiky analýzy	17
6.1	Co je FEM analýza? (FINITE ELEMENT METHOD).....	17
6.2	Historie.....	17
6.3	Software ANSOFT Maxwell 16.0	17

6.4 Předloha pro model	17
7 Tvorba FEM modelu součtového transformátoru	20
7.1 Tvorba modelu	20
7.2 Popis externího obvodu.....	27
8 Analýza FEM modelu	28
9 Závěr	33
10 Literatura.....	34

1 Úvod

V první kapitole se zabývám základy elektrických strojů a základními zákony. Bude zde výklad indukčního zákona, vznik magnetického pole a vznik střídavého napětí.

Druhá kapitola nás uvede do transformátorů, jejich historie, princip funkce, rozdělení a základní stavy.

Třetí kapitola popisuje princip vybraného druhu transformátoru a to součtového transformátoru.

Čtvrtá a pátá kapitola uvádí nejčastější použití součtových transformátorů a to v proudových chráničích. Zde se probere i základní princip proudového chrániče, rozdělení, druhy reziduálních proudů.

Ve zbývajících kapitolách se budu zabývat tvorbou modelu a jeho následnou analýzou.

2 Základy elektrických strojů

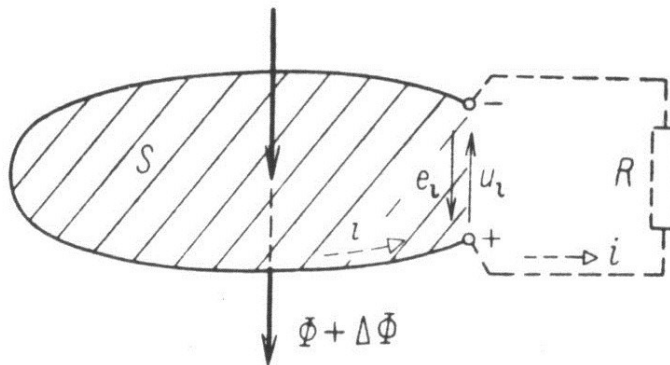
2.1 Indukční zákon

Pro funkčnost všech elektrických strojů je důležitým fyzikálním jevem elektromagnetická indukce. Aby vznikla elektromagnetická indukce, je zapotřebí časová změna magnetického toku nebo pohyb vodiče v magnetickém poli. Tyto dva jevy způsobují indukci napětí ve vodiči nebo obvodu. Tomuto jevu říkáme indukční zákon nebo také Faradayův zákon.

2.1.1 Časová změna magnetického toku

Je-li závit o ploše S umístěný v magnetickém toku Φ , který zvětšíme nebo zmenšíme o $\Delta\Phi$, zavlní to, že se v závitě bude indukovat proud i . Velikost okamžitého proudu ovlivňují odpor vodiče a rychlost změny magnetického toku.

$$u_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.1)$$



Obr. 2.1 Vznik indukovaného napětí [1]

Vyvolaný indukovaný proud v závitě působí proti měnící se síle magnetického toku. Směr indukovaného proudu určí směr indukční čáry magnetického pole vznikající kolem vodiče. Směr indukčních čar je dán Ampérovým pravidlem pravé ruky.

Faradayův zákon můžeme vyjádřit jako:

$$R_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.2)$$

A pro cívku s N závitů:

$$u_i = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.3)$$

2.1.2 Pohyb vodiče v magnetickém poli

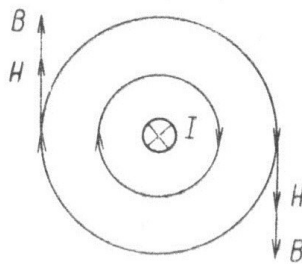
V příčném a časově neměnném magnetickém poli o indukci B se nachází vodič o délce l a o rychlosti v , dochází v něm k indukci napětí a toto napětí je dáno vztahem:

$$u_i = Blv \sin\alpha \quad (2.4)$$

2.2 Magnetické pole okolo vodiče

Protéká-li proud vodičem, vzniká kolem něj magnetické pole. Časově proměnné magnetické pole může indukovat proud ve vodiči. Projevem magnetického pole je také silové působení na feromagnetické předměty, dále na vodič, kterým protéká proud a také na pohybující se nabitě částice.

Stejnoseměrný proud v ustáleném stavu generuje magnetické pole okolo vodiče a smysl a směr tohoto pole je dán Ampérovým pravidlem pravé ruky, viz obr.



Obr. 2.2 Směr a smysl intenzity magnetického pole přímého vodiče, kterým prochází proud [1]

Citace ampérového pravidla: Položíme-li pravou ruku dlaní na vodič tak, aby palec ukazoval směr proudu ve vodiči, ukazují ohnuté prsty směr indukčních čar magnetického pole.

Magnetické pole je definováno intenzitou magnetického pole H a magnetickou indukcí B . Toto můžeme vyjádřit vztahem:

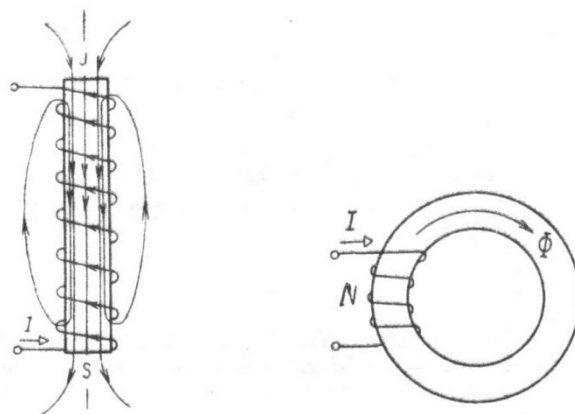
$$B = \mu H \quad (2.5)$$

Kde μ je permeabilita prostředí.

Magnetická indukce je definována jako hustota magnetického toku Φ , postupující určitou plochou. V homogenním magnetickém platí vztah:

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (2.6)$$

kde S je plocha kolmá ke směru indukčních čar.



Obr. 2.3 Indukční čáry magnetického pole cívky, magnetický tok cívky s toroidním jádrem [1]

Cívka s N počtem závitů utváří kolem sebe magnetické pole definované také magnetickým tokem Φ . Cívka je zdroj tzv. magnetomotorického napětí F_m , pro které platí:

$$F_m = NI \quad (2.7)$$

2.3 Vznik střídavého sinusového napětí

Je-li umístěn závit do magnetického pole s indukcí B otáčející se rychlostí v_0 , začne se v něm indukovat okamžité napětí, které lze vyjádřit rovnicí:

$$u_i = Blv \quad (2.8)$$

Nesmíme zapomenout, že musí být vektor rychlosti kolmý na směr indukčních čar.

$$v = v_0 \sin \alpha \quad (2.9)$$

dosadíme

$$u_i = Blv_0 \sin \alpha \quad (2.10)$$

kde je B , l , v_0 konstantní, tudíž můžeme napsat

$$U_{max} = Blv_0 \quad (2.11)$$

dále:

$$u_i = U_{max} \sin \alpha \quad (2.12)$$

V elektrotechnice používáme místo α časový úhel ωt . Kde platí vztah:

$$\alpha = \omega t \quad (2.13)$$

ω = úhlový kmitočet [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

t = čas [s]

[1]

3 Transformátory

Transformátory se řadí do elektrických strojů netočivých dle ČSN 345 125. Transformátory mění elektrickou energii na elektrickou energii a to buď z vyšší napěťové hladiny na nižší nebo naopak. Dále mohou být použity jako galvanické oddělení obvodu.

3.1 Historie

S prvním transformátorem experimentoval už v roce 1831 Michael Faraday. Snažil se demonstrovat princip elektromagnetické indukce.



Obr. 3.1 Faradayův první transformátor, dvě cívky navinuté na železném toroidu [8]

Toto zařízení Faraday navrhl ke studiu stejnosměrného proudu a magnetického pole. Do konce 19. století bylo hlavním cílem pro stavitele transformátorů:

- Aby magnetický obvod byl celý ze železa
- Zmenšit magnetický obvod, jak jen je to možné
- Zvětšit průřez co nejvíce v závislosti na váze
- Využití železa s největší magnetickou permeabilitou
- Dále bylo jejich úsilí zaměřeno na zdokonalení izolace a účinného chlazení
- Rozvoj transformátoru s uzavřeným železným jádrem

Na začátku roku 1885 byl ukázán transformátor pány Karoly Zipernowski a Mika Deri. Tento transformátor byl z elektrické části správný, ale po mechanické části hlučný.

Wiliam Staley vyvíjel transformátory, první počátky lze ukázat na tomto obrázku..

Dále Dick a Kennedy v roce 1886 představili transformátor, který byl zásadním zlepšením od dob Faradaye. Na konci 19. století už dosahovali účinnosti téměř 100%.

3.2 Rozdělení

Z hlediska směru toku energie

- Zvyšovací
- Snižovací

Podle počtu fází

- 1 fázový
- 3 fázový
- Speciální(měniče fází)

Podle konstrukce magnetického obvodu

- Plášťový
- Jádrový
- Toroidní

Podle použití

- Měřicí (proudové, napěťové, kombinované)
- Svařovací
- Energetické
- Pecové
- Měníčové
- Regulační
- Oddělovací (galvanické oddělení obvodu)

3.3 Konstrukční uspořádání

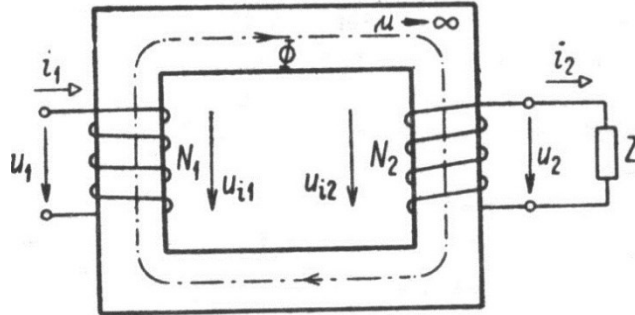
Transformátor je z pohledu stavby nejjednodušším ze střídavých strojů. Oproti točivým střídavým strojům nedochází u něho k mechanickým ztrátám.

Hlavní části jsou:

- Magnetický obvod
- Vinutí
- Chlazení
- Mechanické, konstrukční a izolační části

3.4 Princip činnosti

Pro popis činnosti budeme uvažovat, že máme jednoduchý a idealizovaný transformátor s převodem 1:1. Tento transformátor má uzavřený magnetický obvod s nekonečně velkou permeabilitou. Na tomto jádře jsou umístěny dvě vinutí primární(vstupní) a sekundární(výstupní).



Obr. 3.2 Princip činnosti transformátoru [1]

Přivedením střídavého napětí u_1 na primární cívku a počtu závitů N_1 se začne indukovat na vinutí magnetické pole, které se pomocí magnetického toku Φ dostane až na sekundární vinutí o počtu závitů N_2 , kde se následně magnetické pole indukuje střídavé napětí u_2 a proud i_2 . Indukované napětí může být větší, nižší nebo stejné(galvanické oddělení) a také záleží na převodu transformátoru.

3.5 Indukované napětí

Okamžitá hodnota napětí, které se indukuje, je dané indukčním zákonem ve tvaru:

$$u_i = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Okamžitá hodnota magnetického toku, za předpokladu že se mění sinusově, je ve tvaru

$$\Phi = \Phi_{max} \sin\omega t \quad (3.2)$$

Po dosazení:

$$u_i = N \frac{\Delta(\Phi_{max} \sin\omega t)}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Po následné úpravě dostáváme

$$u_i = \omega N \Phi_{max} \cos\omega t \quad (3.4)$$

Maximální hodnota indukovaného napětí pro $\cos\omega t=1$ je:

$$U_{imax} = \omega N \Phi_{max} \quad (3.5)$$

Po dosazení $\omega=2\pi f$ a za $U_{imax}=\sqrt{2}U$ vznikne známější vztah

$$U_i = 4,44 \Phi_{max} f N \quad (3.6)$$

3.6 Převod transformátoru

Máme-li ideální transformátor platí pro něj, že indukované napětí mají stejný smysl i velikost. Takže lze napsat

$$U_1 = U_{i1} = 4,44\Phi_{max}fN_1 \quad (3.7)$$

$$U_2 = U_{i2} = 4,44\Phi_{max}fN_2 \quad (3.8)$$

Podělením rovnic dostaneme převod p

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3.9)$$

Toto nám říká, že napětí je přímo úměrné počtu závitů a také z rovnosti výkonů $P_1=P_2$, že proudy jsou obráceně vzhledem k napětí.

Rozdělení dle převodu

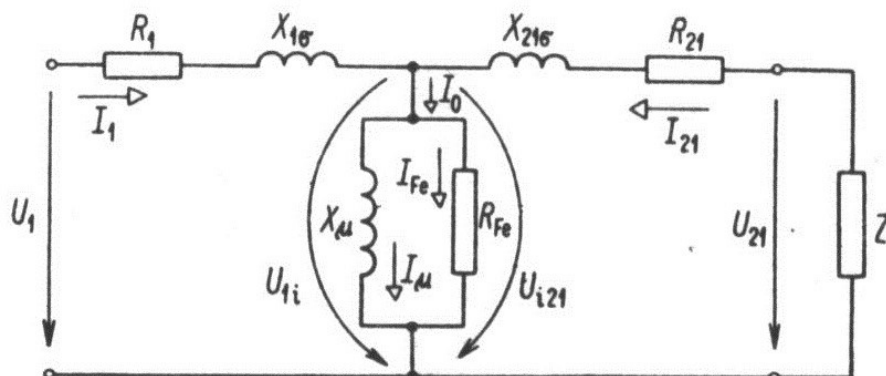
- Snižovací $p>1$
- Oddělovací $p=1$
- Zvyšovací $p<1$

3.7 Náhradní schéma

Transformátor lze vyjádřit a analyzovat pomocí náhradního schématu. V tomto schématu musí být zařazeny všechny vlivy, které mohou ovlivnit hodnoty transformátoru. Toto slouží k rozboru provozních stavů transformátoru.

Parametry náhradního schéma:

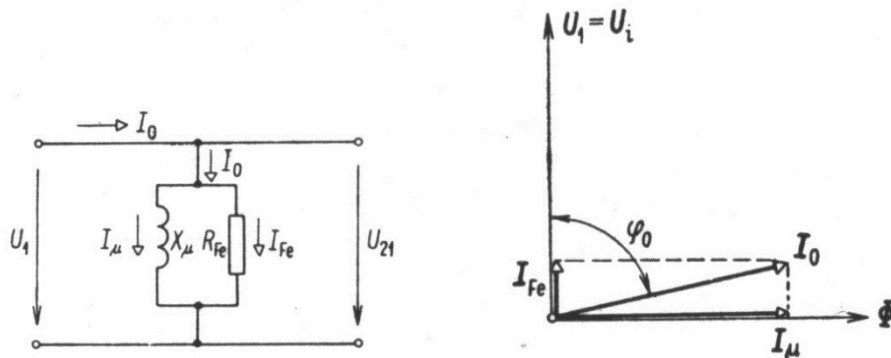
- vinutí (podélné parametry)
 - činný odpor vstupního R_1 a výstupního R_{21} vinutí
 - rozptylové reaktance vstupního $X_{1\sigma}$ a výstupního $X_{21\sigma}$ vinutí
- magnetický obvod (příčné parametry)
 - magnetizační reaktance X_μ
 - odpor, jež respektuje ztráty v železe R_{Fe} , také zahrnuje ztráty výřivými proudy a hysterezní ztráty



Obr. 3.3 Úplné náhradní schéma transformátoru [1]

3.7.1 Transformátor naprázdno

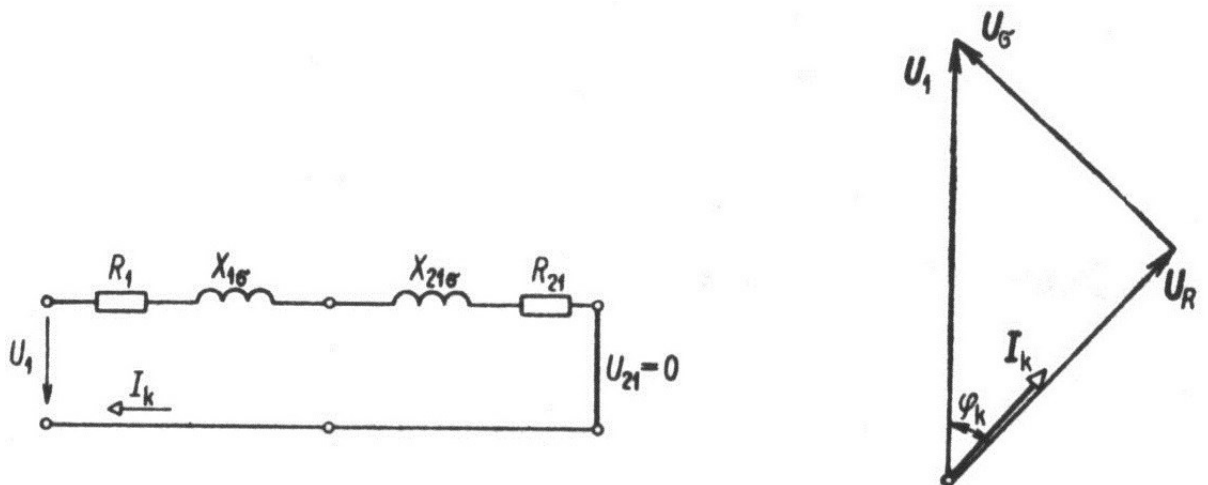
V tomto stavu je $I_2=0$ a transformátor odebírá ze sítě proud naprázdno I_0 . U dnešních transformátorů se pohybuje asi (3 až 10)% jmenovitého proudu. Hlavní složkou proudu naprázdno je magnetizační proud I_μ a proud I_{Fe} , který představuje ztráty v železe, je velmi malý díky kvalitním transformátorovým plechům.



Obr. 3.4 Náhradní schéma transformátoru naprázdno, fázorový diagram transformátoru naprázdno [1]

3.7.2 Transformátor nakrátko

Při tomto stavu jsou vstupní svorky spojeny nakrátko. Jelikož máme výstupní svorky nakrátko, můžeme zanedbat příčnou větev, takže dojde k zjednodušení schématu.



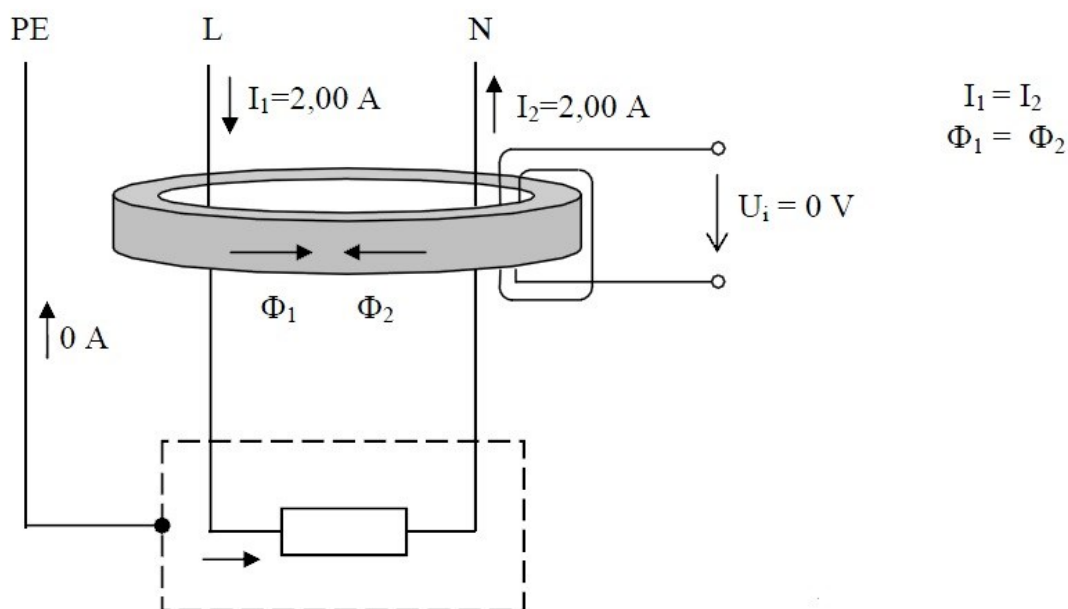
Obr. 3.5 Náhradní schéma transformátoru nakrátko, fázorový diagram transformátoru nakrátko [1]

4 Součtový transformátor

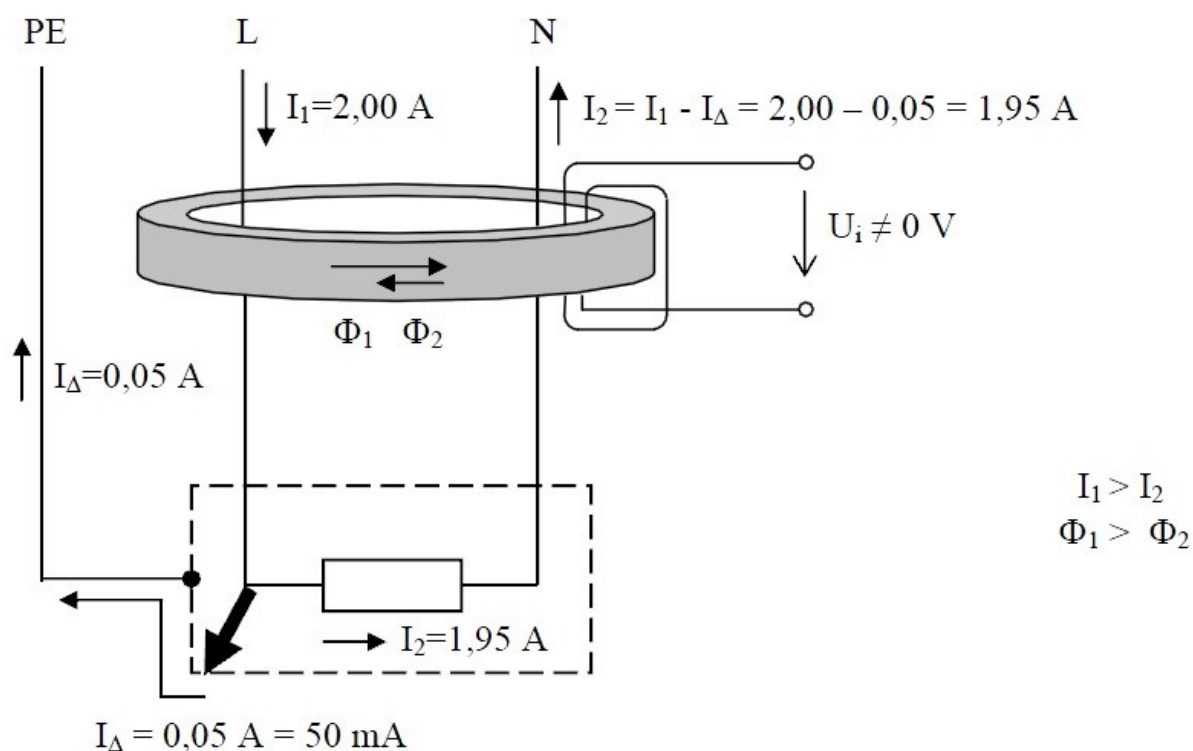
Řadí se mezi měřicí transformátory. V elektrických obvodech je potřeba někdy měřit součet proudů, výkonů, práce ve dvou a více obvodech. Pro tyto účely jsou vhodné sčítací transformátory o různých zapojeních. Dále se využívá u proudových chráničů.

4.1 Princip

Jeho funkce spočívá v porovnávání proudu protékající ve vodičích procházející vnitřkem transformátoru. Tím vodiče utvoří primární vinutí součtového transformátoru. A na sekundárním vinutí se poté sleduje indukované napětí. Při správných okolnostech je vektorový součet okamžitých hodnot proudu ve všech pracovních vodičích roven nule. Takže magnetický tok, který vzniká v pracovních vodičích, je roven také nule a tím pádem v sekundárním vinutí se neindukuje žádné napětí. V případě rozdílu proudu ve vodičích dojde k tomu, že se v sekundárním vinutí naindukují napětí.



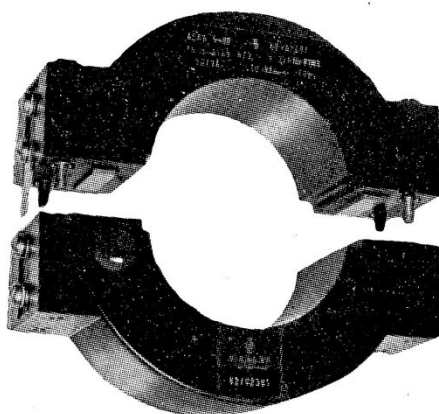
Obr. 4.1 Funkce součtového transformátoru [10]



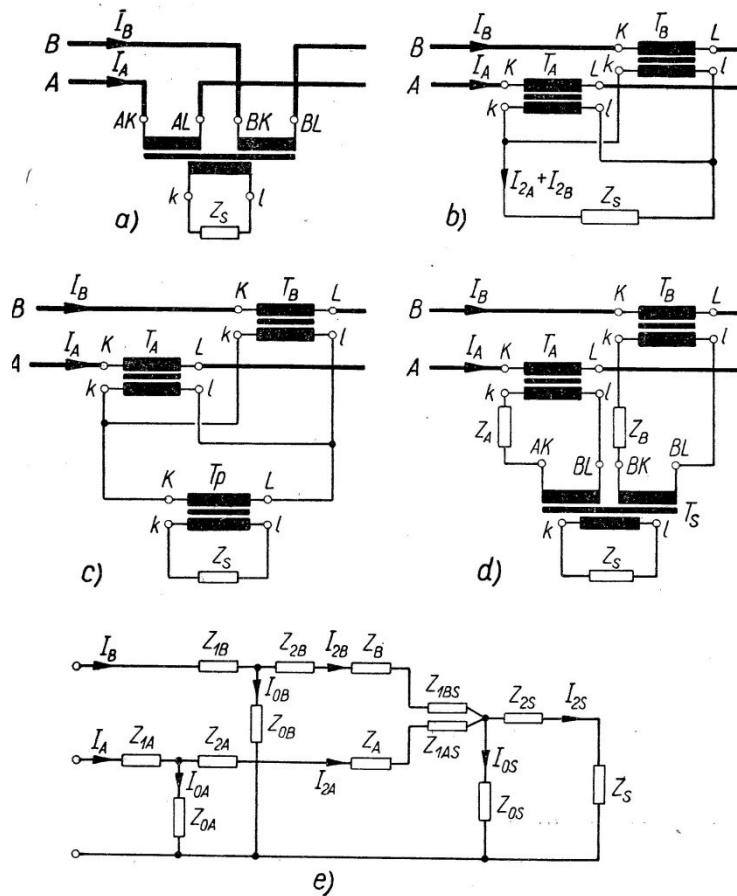
Obr. 4.2 Vznik reziduálního proudu [10]

4.2 Použití

- v proudových chráničích
- zemní jištění
- snímání nulové složky proudu na vn kabelech (ZDROJ SIO-30-CZ)
- pomocí sekundárního vinutí lze napájet proudové vstupy indikátorů nebo nulových proudových článků ochran (ZDROJ SIO-30-CZ)



Obr. 4.3 Sčítací transformátor proudu pro zemní jištění s děleným magnetickým obvodem pro montáž na kabel, typ AEK – 80b, 60/1 A (Siemens & Halske). [2]



Obr. 4.4 Součtová zapojení. [2]

sčítací transformátor proudu s dvěma primárními vinutími, b) součtové zapojení dvou transformátorů T_A a T_B , c) součtové zapojení dvou transformátorů T_A a T_B s pomocným transformátorem T_P , d) součtové zapojení dvou transformátorů T_A a T_B se sčítacím transformátorem T_S , e) náhradní schéma zapojení dvou transformátorů se sčítacím transformátorem.



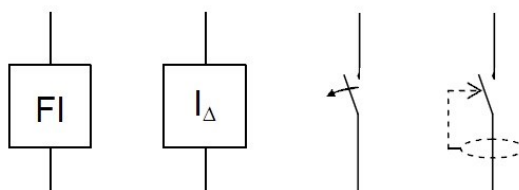
Obr. 4.5 Součtový transformátor proudu SIO – 3.0 [11]

5 Proudový chránič

V roce 1928 byl přihlášen na patentovém úřadě německo-říšský patent na přístroj pod názvem FELERSTORM SCHUTZSCHALTER, zkráceně FI v překladu ochranný spínač poruchového proudu. Dnes jej známe jako proudový chránič.

Tento elektrický přístroj má za úkol chránit člověka před nebezpečným dotykovým napětím na neživé nebo na živé části. Proudový chránič nemá hlavní úkol chránit zařízení před zkratem. Toto má na starosti jistič nebo pojistka.

Schématická značení proudových chráničů:

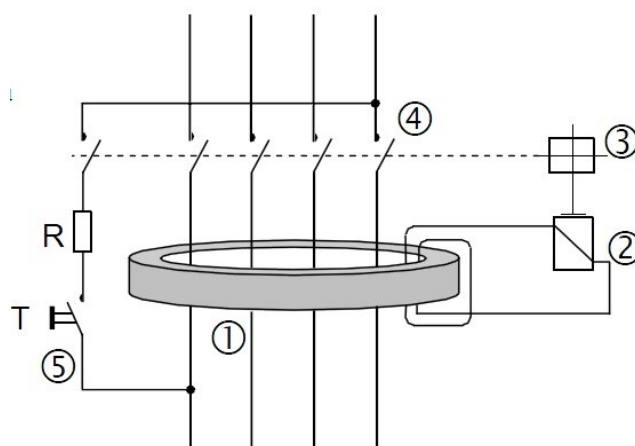


Obr. 5.1 Schématická značka proudového chráničce [10]

5.1 Konstrukce

- základní části proudového chráničce

- 1) součtový transformátor
- 2) vybavovací zařízení
- 3) volnoběžka
- 4) silové spínací kontakty
- 5) testovací obvod

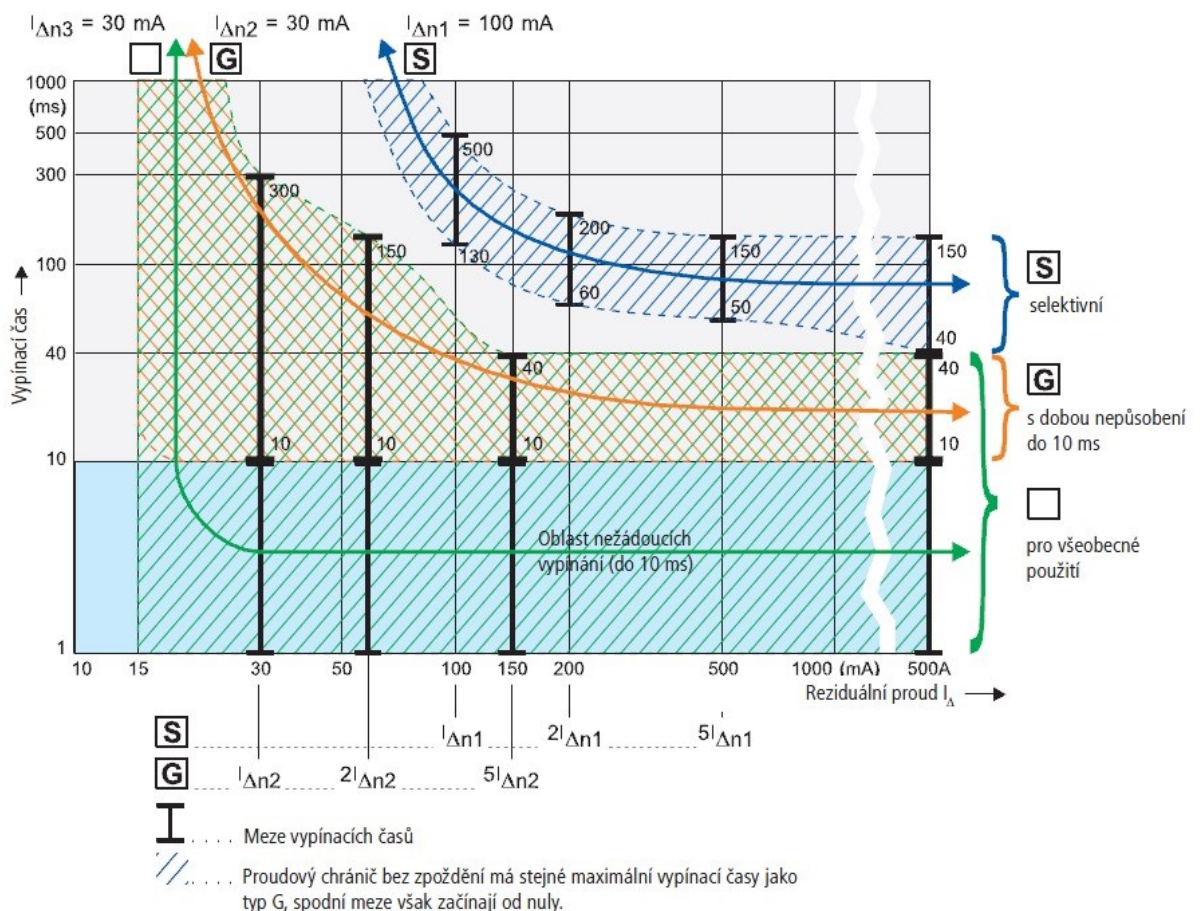


Obr. 5.2 Konstrukce proudového chráničce – blokově [10]

5.2 Princip

Princip je založen na porovnávání rozdílového proudu ve vodičích procházející do zařízení a zpátky. Nastane-li rozdíl větší než je dána mez, dojde k vybavení proudového chrániče. Hlavní částí je součtový transformátor, skrze něj prochází všechny vodiče kromě ochranného vodiče, ten nesmí procházet vnitřkem součtového transformátoru. Součtový transformátor porovnává vektorový součet proudů všemi vodiči, které prochází transformátorem. Vzniklá hodnota reziduálního proudu je přivedena do vyhodnocovacího obvodu. Vyhodnocovací obvod je diferenciální relé s permanentním magnetem. Ve stavu zapnuto je kotva relé přitažena působením permanentního magnetu. Nastane-li stav, že bude rozdílový proud mezi proudem vstupujícím a vystupujícím proudem, tak tento reziduální proud vyvolá v magnetickém obvodu magnetický tok $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ a ten bude indukovat napětí v sekundárním vinutí. Vytvořené magnetické pole je odečítáno od magnetického pole permanentního magnetu. Po překročení citlivosti dojde pomocí diferenciálního relé, které uvede v činnost volnoběžku, rozpojí kontakty a vypne obvod.

Proudový chránič by měl dokázat ochránit osoby při přímém dotyku živých částí. Důležitá pro bezpečnost je rychlost vybavení ochrany. Pro TN síť dle ČSN 332 000-4-41 je čas vypnutí do 0,4s. Vypínací časy můžeme poukázat v následném grafu.



Obr. 5.3 Vypínací časy proudových chráničů [5]

5.3 Rozdělení

5.3.1 Z hlediska předmětových norem

- 1) chrániče s přímým vypínáním
 - jsou to standartní proudové chrániče instalované v bytech
- 2) chrániče s nepřímým vypínáním
 - složení – součtový proudový transformátor
 - chráničové relé
 - řídicí cívky výkonového stykače
- 3) monitorovací relé reziduálního proudu

5.3.2 Z hlediska citlivosti

- 1) vysoká citlivost: 6 – 10 – 30 mA (ochrana proti přímému dotyku)
- 2) střední citlivost: 100 – 300 – 500 – 1000 mA (proti požární)
- 3) nízká citlivost: 3 – 10 – 30 A (ochrany strojů)

5.4 Druhy reziduálních proudů

V sítích se používá mnoho přístrojů, ve kterých je obsaženo značné množství elektronických součástí. Tyto přístroje jsou připojeny také někdy přes ochranný vodič. Takže při poruše může dojít, k tomu že protékající reziduální proudy nemusí mít sinusový průběh. Normy pro proudové chrániče uvádějí spoustu dalších požadavků a zkušebních podmínek pro reziduální proudy, které se během jedné periody při frekvenci 50Hz rovnají nebo blíží nule.

Typ	Druh proudu	Značení	Rozmezí vybavovacích proudů
AC	Střídavé reziduální proudy		$0,5 - 1I_{\Delta n}$
A	Pulsující stejnosměrné reziduální proudy pulsující proudy (kladné a záporné půlvlny)		$0,35 - 1,4I_{\Delta n}$ nebo $2I_{\Delta n}$ *
	Fázově řízené pulsující proudy časové zpoždění 90°el. nebo 135°el.		$0,25 - 1,4I_{\Delta n}$ nebo $2I_{\Delta n}$ * $0,11 - 1,4I_{\Delta n}$ nebo $2I_{\Delta n}$ *
B	Pulsující stejnosměrný reziduální proud superponovaný na hladký stejnosměrný proud 6 mA		max. $1,4I_{\Delta n} + 6$ mA

* platí pro proudové chrániče typu B

Tab. 5.1 Rozmezí vybavovacích proudů pro proudové chrániče podle ČSN IEC 755 [5]

5.4.1 Stejnoseměrné reziduální proudy

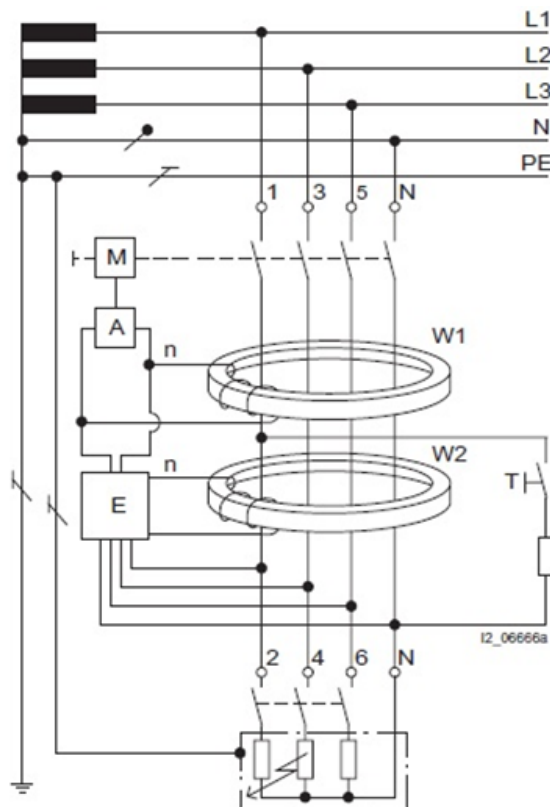
V průmyslu se stále častěji objevují typy zapojení, u kterých může dojít při poruše ke vzniku hladkých stejnosměrných reziduálních proudů nebo stejnosměrných reziduálních proudů se zbytkovým činitelem zvlnění. Toto se může projevit, když jsou použity měniče frekvence, ultrazvukových zařízení nebo rentgenových přístrojů.

Proudové chrániče náchylné na pulzující proud nemůžou takové stejnosměrné reziduální proudy zachytit a vybavit. Dále je i nepříznivě ovlivněna jejich funkce. Proto se proudové chrániče nesmí používat v takových instalacích, které produkují tyto proudy. Zde jako ochranu mohou použít oddělovací transformátory. Ale nové proudové chrániče reagující na všechny druhy reziduálních proudů, jsou výhodným ekonomickým řešením.

5.4.2 Proudový chránič reagující na všechny druhy reziduálních proudů

Součtový transformátor W1 hlídá střídavé a pulzující reziduální proudy v elektrickém zařízení. Součtový transformátor W2 kontroluje hladké stejnosměrné reziduální proudy a při chybě předávají přes elektronickou jednotku E pokyn k vybavení spouště A. Tento proudový chránič dokáže spolehlivě a bezpečně fungovat i při $0,7U_n$.

Dle ČSN IEC 755 platí pro proudové chrániče citlivé na všechny druhy proudů, že musí vypnout mezi hodnotami $0,5 - 2I_{\Delta n}$



A	spoušť
M	Mechanika chrániče
E	Elektronika pro vybavování při hladkých reziduálních proudech
T	Zkušební tlačítko
n	Sekundární vinutí
W1	Součtový proudový transformátor pro zachycení reziduálních proudů se sinusovým průběhem
W2	Součtový proudový transformátor pro zachycení hladkých stejnosměrných reziduálních proudů

Obr. 5.4 Blokové schéma proudového chrániče reagující na všechny druhy reziduálních proudů [6]

6 Uvedení do problematiky analýzy

6.1 Co je FEM analýza? (FINITE ELEMENT METHOD)

Principem metody je, že prvek (model) se rozloží do konečného počtu jednotlivých tvarů prvků. Metoda má tři části: preprocessor, processor a postprocessor.

Preprocessor – vytváříme model součásti, který má být analyzován. Model se rozdělí do sítí několika prvků. Tyto prvky jsou spojeny uzly a tvoří uzlovou síť. Každý uzel má v souřadnicích XYZ přesně dané souřadnice.

Processor – řeší matematický model fyzikální reality. Toto řešení zahrnuje řadu vnitřních operací a potřebuje v podstatě málo řídicích zásahů od obsluhy. To znamená, že se vyžaduje zadání materiálových parametrů, druhu proudů a jejich hodnoty a další podstatné parametry pro přesnost analýzy.

Postprocessor – tato část generuje výsledky analýz. V této části lze nahlédnout do všech dostupných výsledků analýzy. Výstupy mohou být grafické a matematické.

6.2 Historie

FINITE ELEMENT METHOD neboli v překladu Metoda konečných prvků. Původ této metody se spojuje s rokem jeho první publikace v roce 1956, ale základy algoritmu byly už dávno před touto publikací.

Teprve s příchodem modernějších číslicových počítačů mohlo dojít k dynamickému rozvoji této metody. Název The Finite element method pochází teprve až z roku 1960. Základní stavební kamenem metody je prvek konečných rozměrů. MKP byla zpočátku určena pro strojírenství, ale dnes se využívá ve všech oblastech elektrotechnického průmyslu. [9]

S příchodem CAD systémů a hlavně se vznikem 3D modelování dochází k velké změně. Dochází k propojení CAD a MKP systémů a je snaha zavádět výpočty a simulace napětí, deformací, proudění a pevnostních analýz o analýzy elektromagnetické zahrnuté přímo do fáze návrhu součástí. Za nejúspěšnější systémy lze v dnešní době považovat ABAQUS, NASTAN a ANSYS. [7]

6.3 Software ANSOFT Maxwell 16.0

Pro analýzu nejrůznějších elektromagnetických problémů vyvíjí společnost ANSYS, Inc. (USA) program ANSOFT Maxwell v nízkofrekvenční oblasti (do 3 kHz) a pro vysokofrekvenční oblast nabízí program ANSOFT HFSS. Doplnila tak řadu svých produktů, které nabízejí komplexní řešení problémů v oblasti proudění a pevnostních analýz o analýzy elektromagnetické. ANSOFT Maxwell využívá metod MKP (metoda konečných prvků) pro nalezení řešení úplné soustavy Maxwellových rovnic. Konstruktor tak dostává do rukou silný nástroj pro návrh a následnou optimalizaci elektrických strojů a zařízení. [7]

6.4 Předloha pro model

Pro model bude vytvořený podle předvolby součtového transformátoru, který je umístěný v proudovém chrániči. Použitý proudový chránič je od výrobce Moeller typ PF7 – 40/4/03 v provedení AC. Budou změřeny rozměry a počet závitů na sekundární cívce.

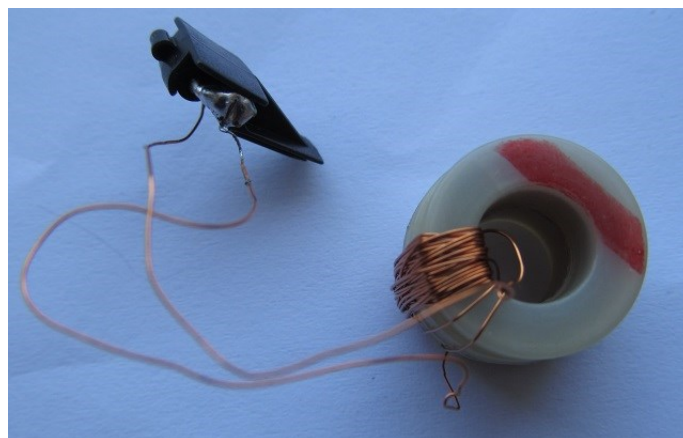
Technické údaje proudového chrániče:

Moeller PF7 – 40/4/03

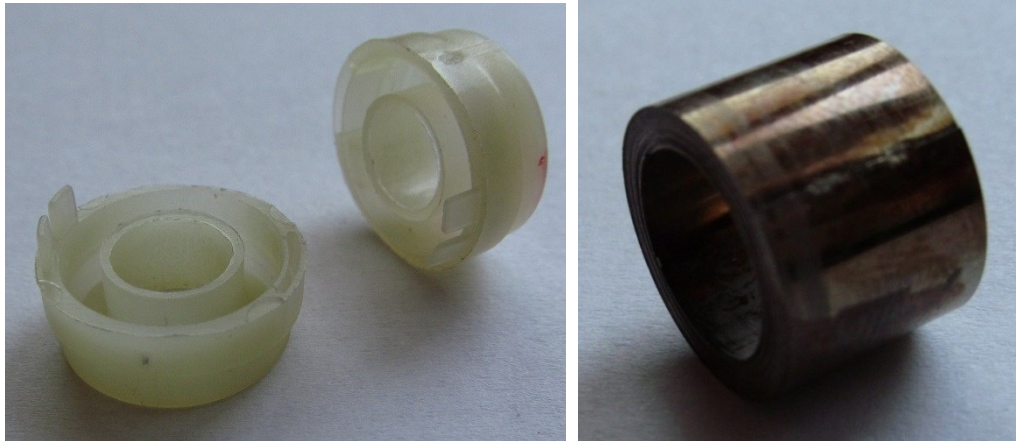
- citlivý na střídavé reziduální proudy
- bez zpožděného vybavení
- odolnost proti rázovým proudům 250A
- pro všeobecné použití
- $I_n=40A$, $I_{\Delta n}=300mA$
- podmíněná zkratová odolnost $I_{nc}=10000A$



Obr. 6.1 Zde je zobrazený proudový chránič, ze kterého bude vymontován součtový transformátor.



Obr.6.2 Součtový transformátor vyjmutý z proudového chrániče.



Obr. 6.3 Rozložený součtový transformátor, vlevo na obrázku je obal jádra a na pravé straně je jádro

Poté co byl transformátor vyjmutý, byly postupně odmotány a spočítány závitů sekundárního vinutí. A změřeny rozměry pro vytvoření modelu.

Počet závitů: $N=32$ z

Rozměry jádra:

Vnější průměr: $D_1=13,35\text{mm}$

Vnitřní průměr: $d_1=9,5\text{mm}$

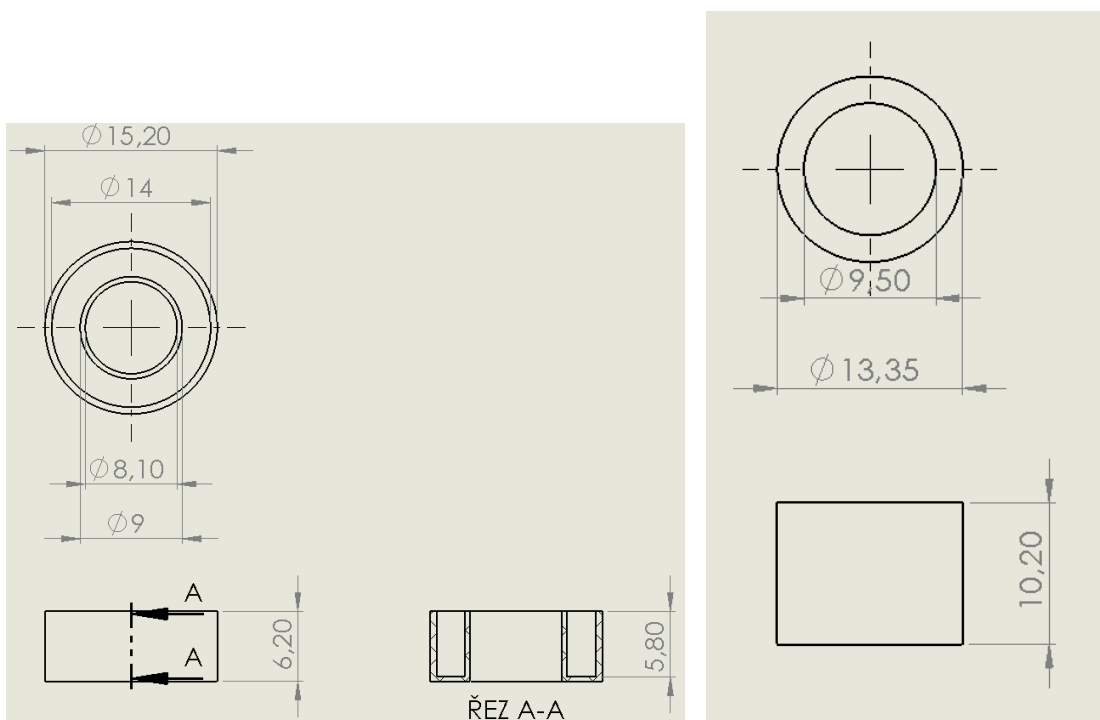
Výška: $h_1=10,2\text{mm}$

Rozměry jedné poloviny obalu:

Vnější průměr: $D_2=15,2\text{mm}$

Vnitřní průměr: $d_2=8,1\text{mm}$

Výška: $h_2=6,2\text{mm}$

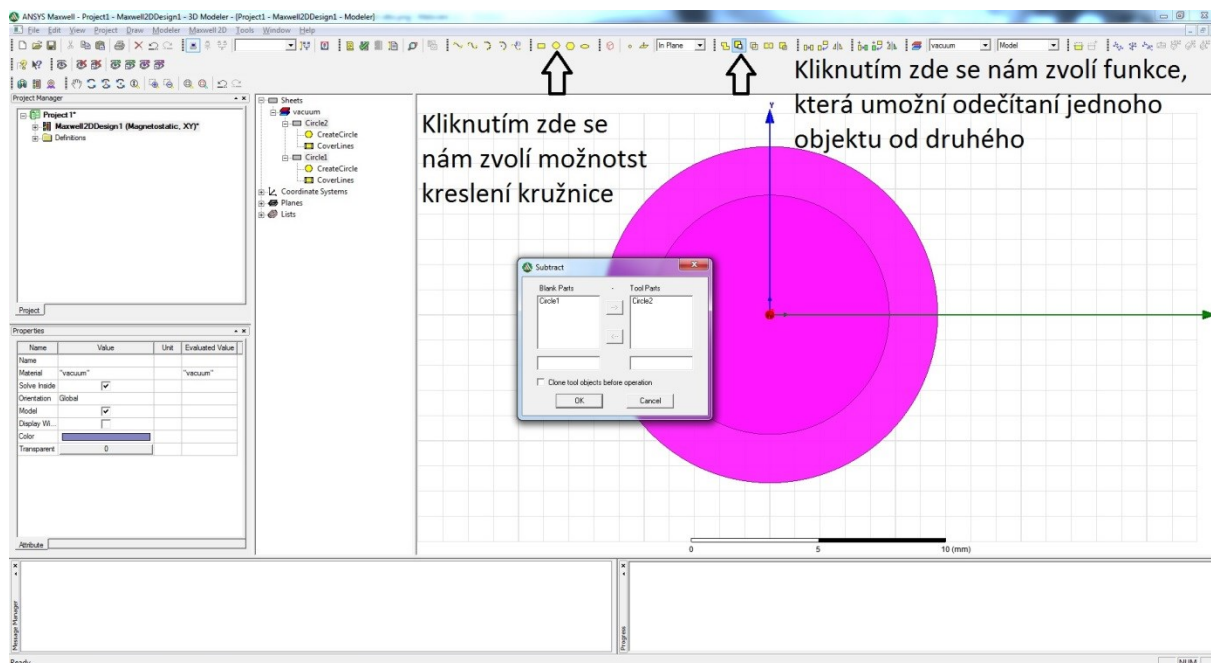


Obr. 6.4 Rozměry jádra a obalu.

7 Tvorba FEM modelu součtového transformátoru

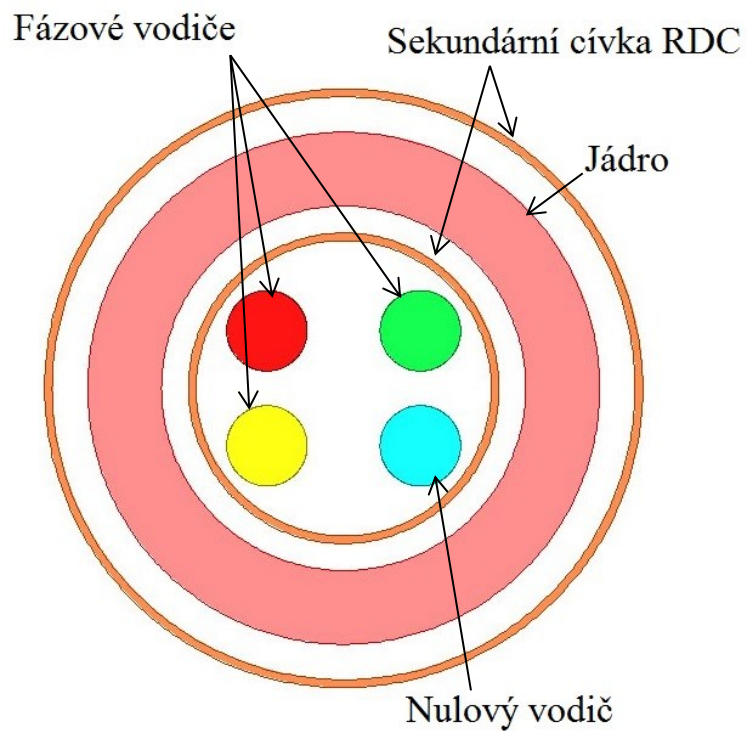
7.1 Tvorba modelu

Pro modelování a analýzu jsem zvolil program Ansoft Maxwell číslo verze 16, jehož funkce byly popsány v podkapitole software pro analýzu.



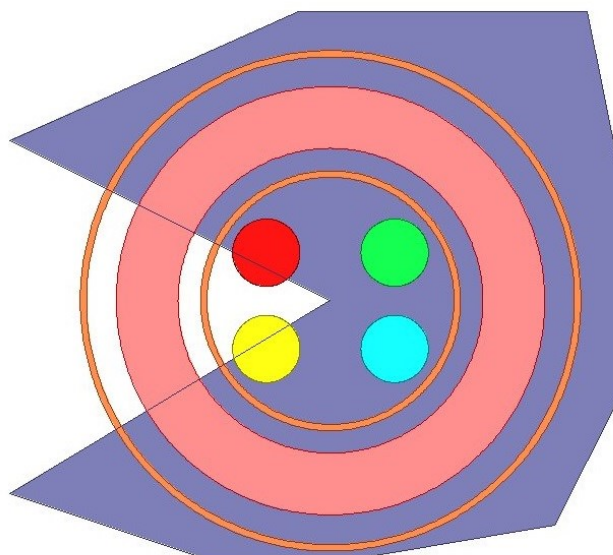
Obr. 7.1 Tvorba jádra

Na obrázku 7.4 jsem pomocí tlačítka pro kreslení kružnic nejprve nakreslil dvě kružnice o rozměrech $D_1=13,35\text{mm}$ a $d_1=9,5\text{mm}$. Abych dosáhl tvaru mezikružní, musím od většího kruhu odečíst ten menší. Tuto operaci provedeme pomocí tlačítka subtract (odečíst). Zvolíme si objekty a správně umístíme objekty do sloupečků tak, aby došlo k odečtení, a poté potvrdíme. Podobným způsobem pokračujeme i u následujících částí. V další části volíme rozměry sekundární cívky a zakreslíme vodiče procházející skrze transformátor a tvoří tím primární cívku. Jelikož nebudeme do modelu vkládat vlastnosti obalu jádra, pouze zvolíme rozměr sekundární cívky v určité vzdálenosti od jádra.



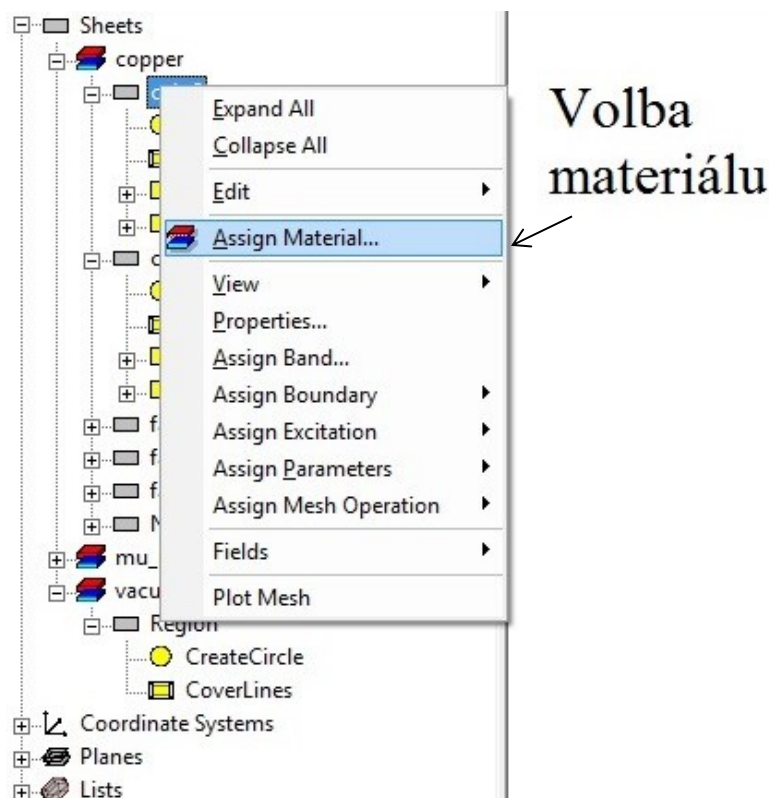
Obr. 7.2 Popis jednotlivých částí neúplného modelu

Sekundární cívka je pouze v jedné části, jak je vidět na obrázku 7.2. Musíme si pomoci pomocným polygonem. Polygon odečteme od sekundární cívky.



Obr. 7.3 Ukázka pomocného polygonu pro vymezení části sekundární cívky

V následujícím obrázku je ukázáno, jak se volí materiál pro jednotlivé části. Pro sekundární cívku a průchozí vodiče si zvolíme materiál měď.



Obr. 7.4 Volba materiálu pro sekundární cívku a průchozí vodiče

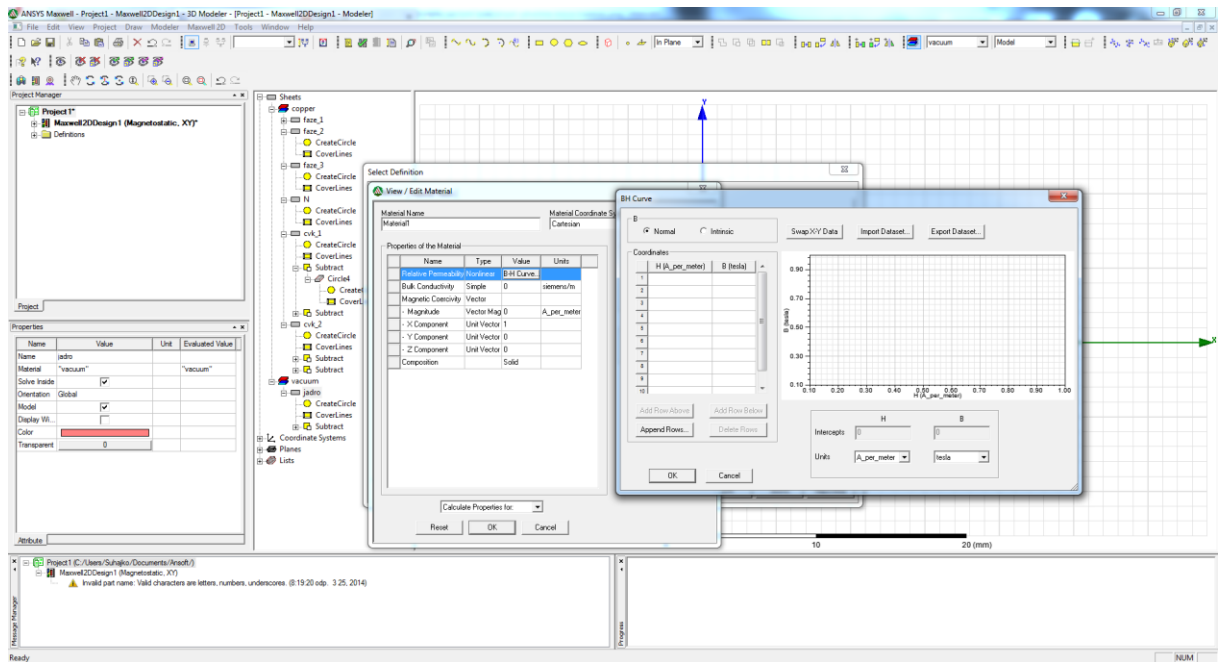
Pro jádro budeme volit různé druhy materiálu. V tabulce jsou zobrazeny druhy materiálu a jejich vlastnosti. Jelikož máme proudový chránič v provedení AC, pro jádro si zvolíme následující druhy materiálu. Abychom ověřili materiály pro citlivosti A a AC typu, pro B typ nemáme známé používané materiály.

Proud v (mA)	Materiál	Hustota (g/cm^3)	B_s (T)	Permeability μ_{15}
10 – 100	Ultraperm 10	8,7	0,74 -0,8	100 000 – 200 000
	Ultraperm 200			200 000 – 300 000
	Mumetall			60 000
	Vacoperm 100			100 000
300 – 500	Permax M	8,25	1,5	50 000
10 - 100	Vitroperm 800 F	7,35	1,2	145 000

Tab. 7.1 Materiály pro typ AC [13]

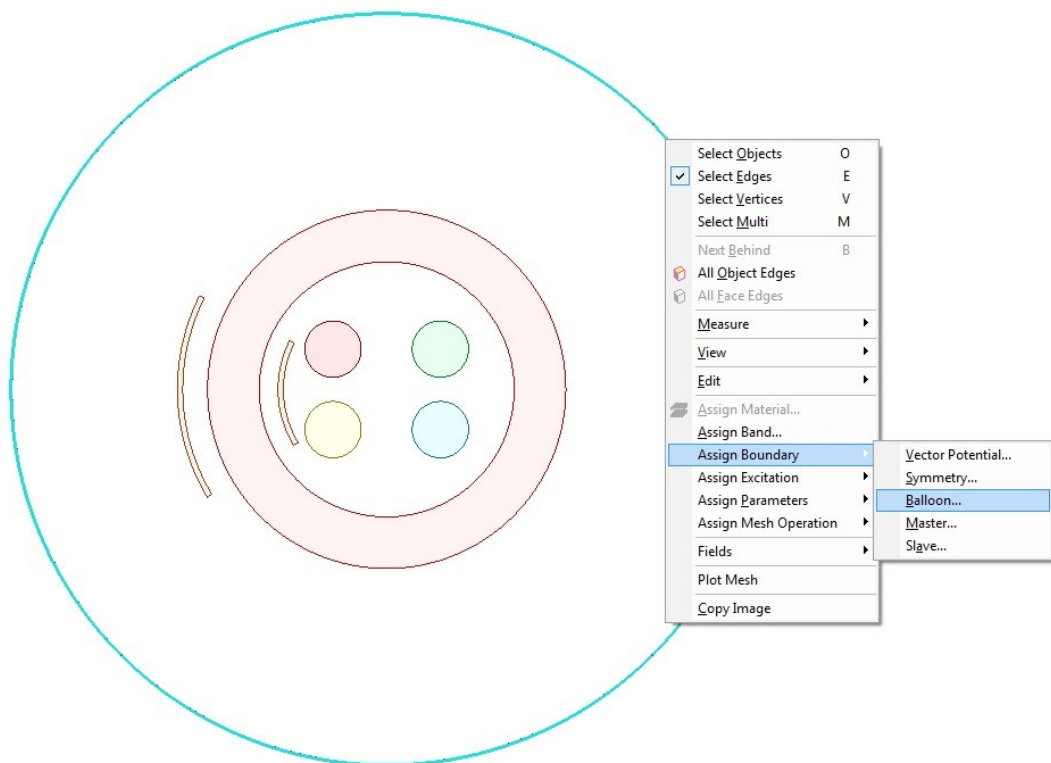
Proud v (mA)	Materiál	Hustota (g/cm^3)	B_s (T)	Permeability μ_{15}
10 - 100	Vitroperm 800 F	7,35	1,2	160 000

Tab. 7.2 Materiál pro typ A [13]

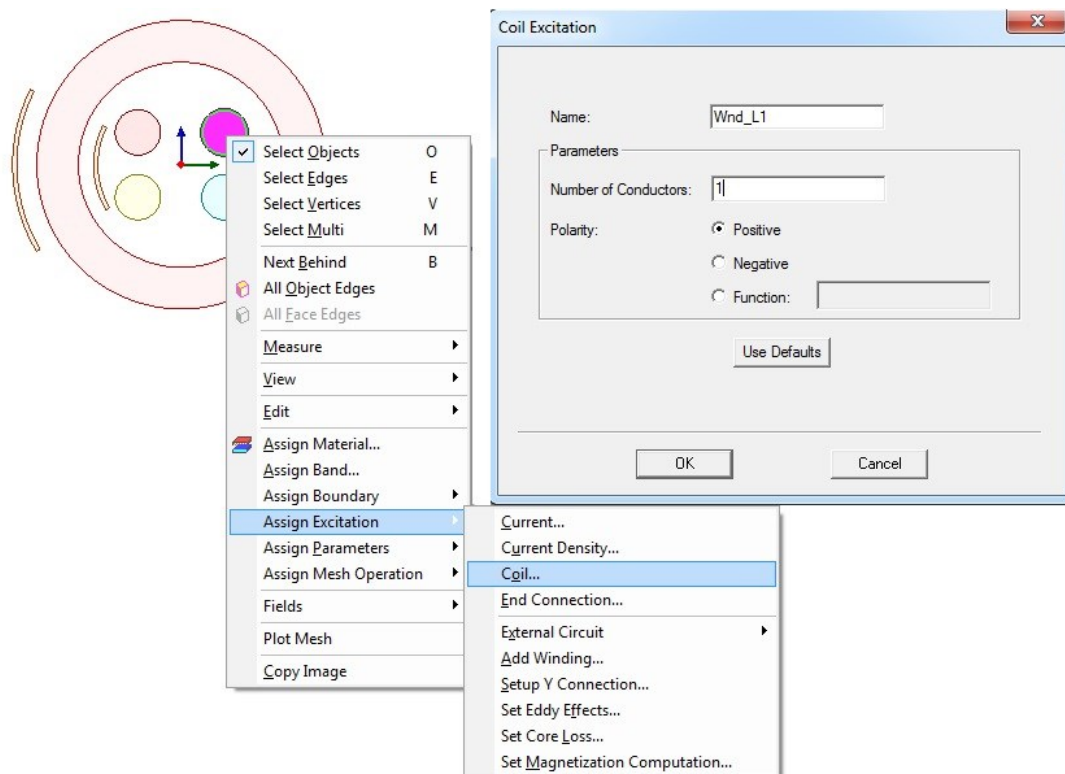


Obr. 7.5 Vložení externích dat zvolených druhů materiálů

Pro analýzu musíme zadat určité podmínky, aby to fungovalo. Jednou z podmínek je zvolení okrajových podmínek, které si určíme tím, že nakreslíme region působení a od hranice zvolíme balloon neboli šíření do nekonečna.

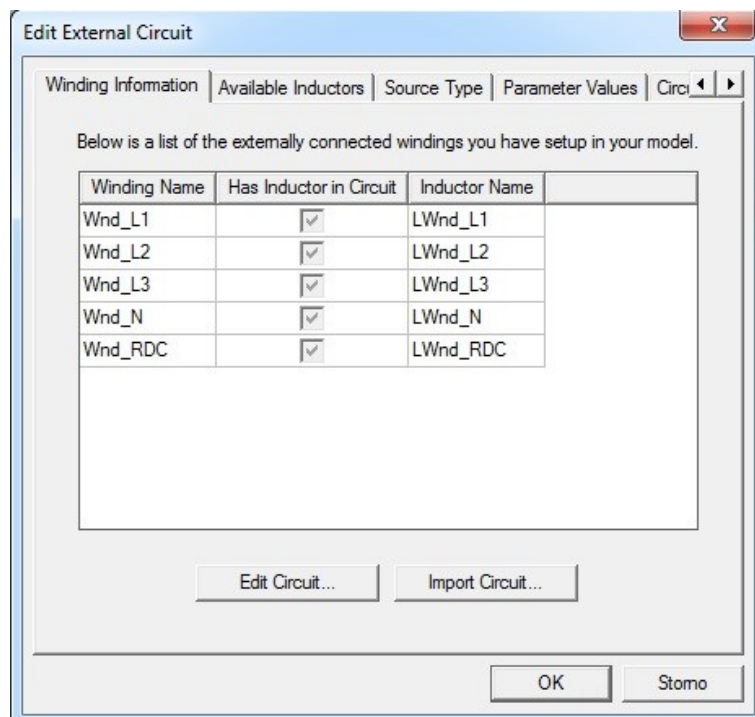


Obr. 7.6 Zobrazení volby okrajových podmínek



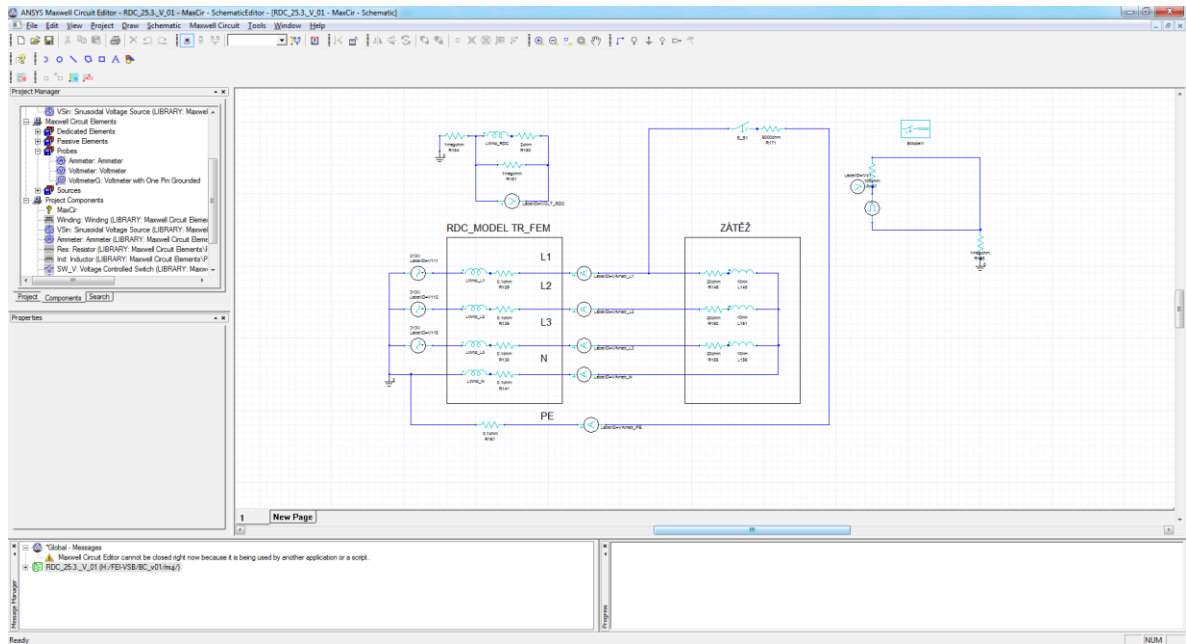
Obr. 7.7 Volba elektrických vlastností

Pro zvolení elektrických vlastností si vytvoříme externí obvod. Nejprve zvolíme, kde poteče proud a zvolí se, že má brát data z externího obvodu.



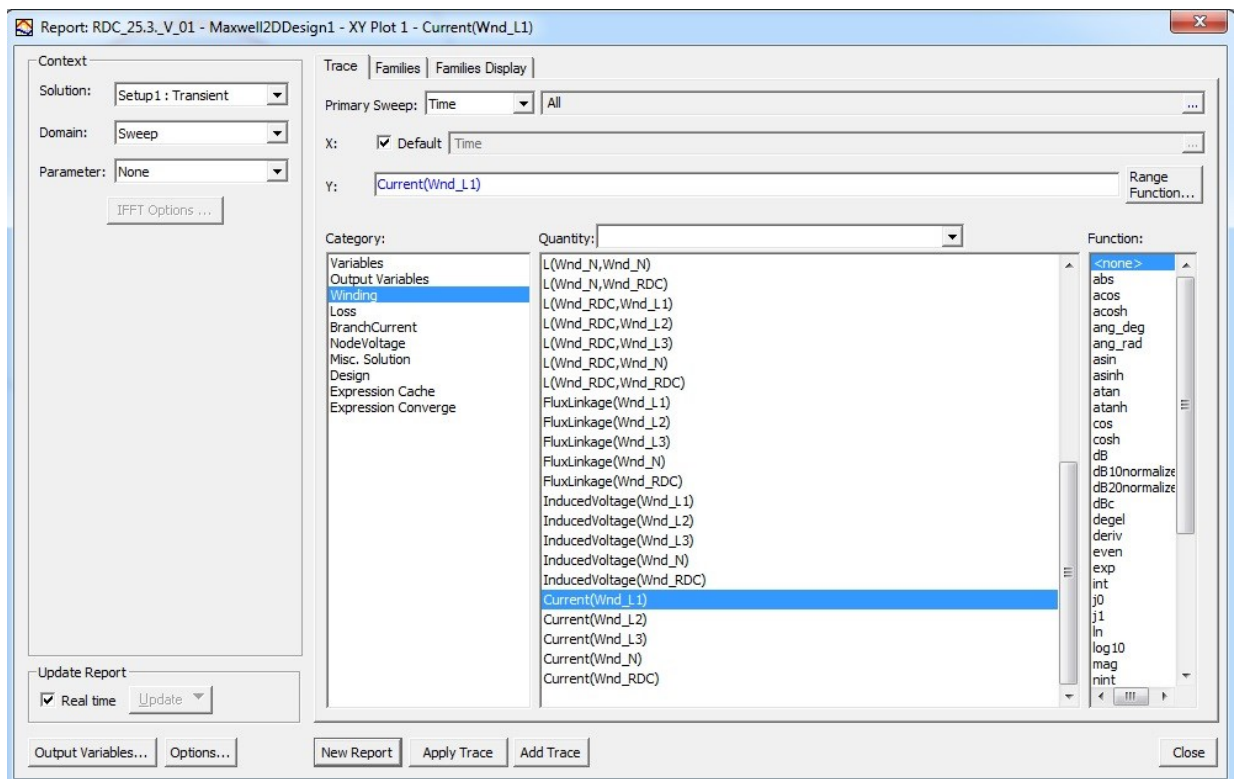
Obr. 7.8 Vložení externího obvodu

Na obrázku 7.9 je zobrazený externí obvod. Součástí obvodu je tří fázový zdroj, zátěž, kterou tvoří rezistor a induktor, simulační obvod pro ovládání tlačítka, které připojí část obvodu pro simulaci poruchy a poslední obvod vlevo nahoře simuluje zapojení sekundární cívky.



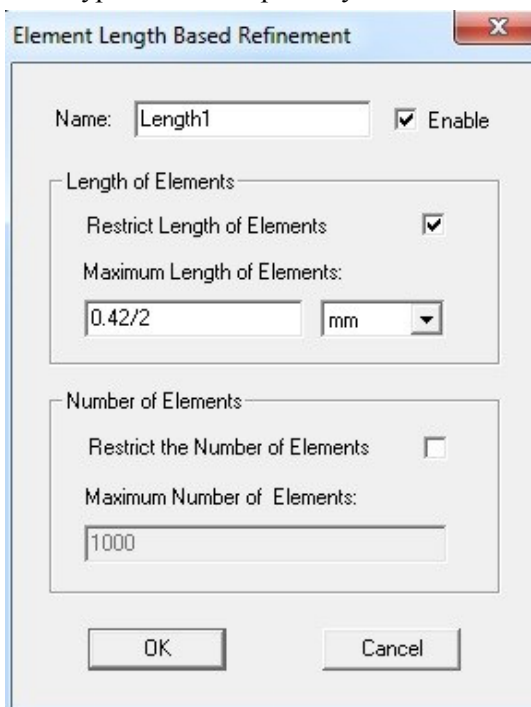
Obr. 7.9 Vložení externího obvodu

Vložení externího obvodu se nám umožní vložit vykreslování průběhů proudu a indukovaného napětí.

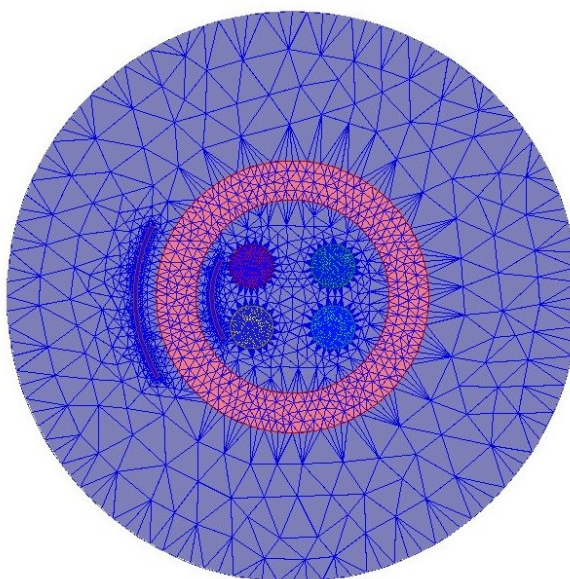


Obr. 7.10 Volba grafů pro vykreslení proudu a napětí

Máme provést FEM analýzu, takže si potřebujeme zvolit výpočetní síť. Na obrázku 7.11 je zobrazena volba hustoty elementu pro jednotlivé části. Program nám zobrazí hustotu elementů, které si zvolil sám, ale my pro přesnější analýzu zvolíme o polovinu menší číslo pro větší přesnost. Obrázek 7.12 zobrazuje už finálové rozložení výpočetních sítí pro celý model.



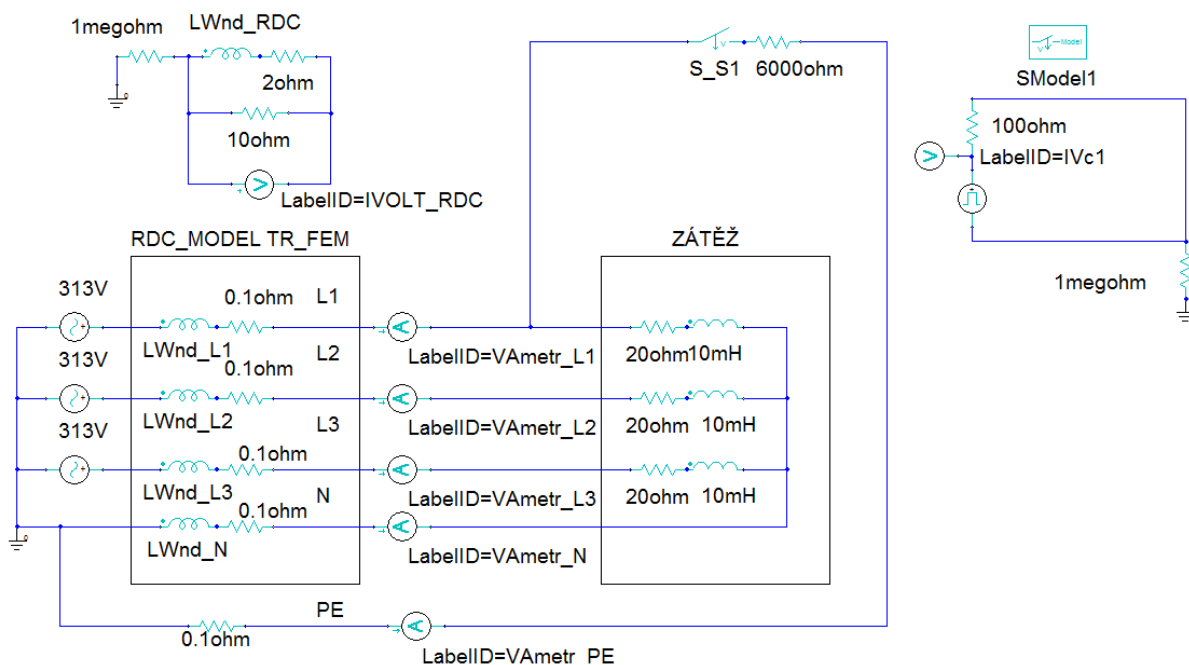
Obr. 7.11 Zvolení hustoty elementů



Obr. 7.12 Zobrazení výpočetních sítí v modelu

7.2 Popis externího obvodu

Abych mohl provést analýzu, musím nejdřív pro externí obvod zadat jeho parametry.



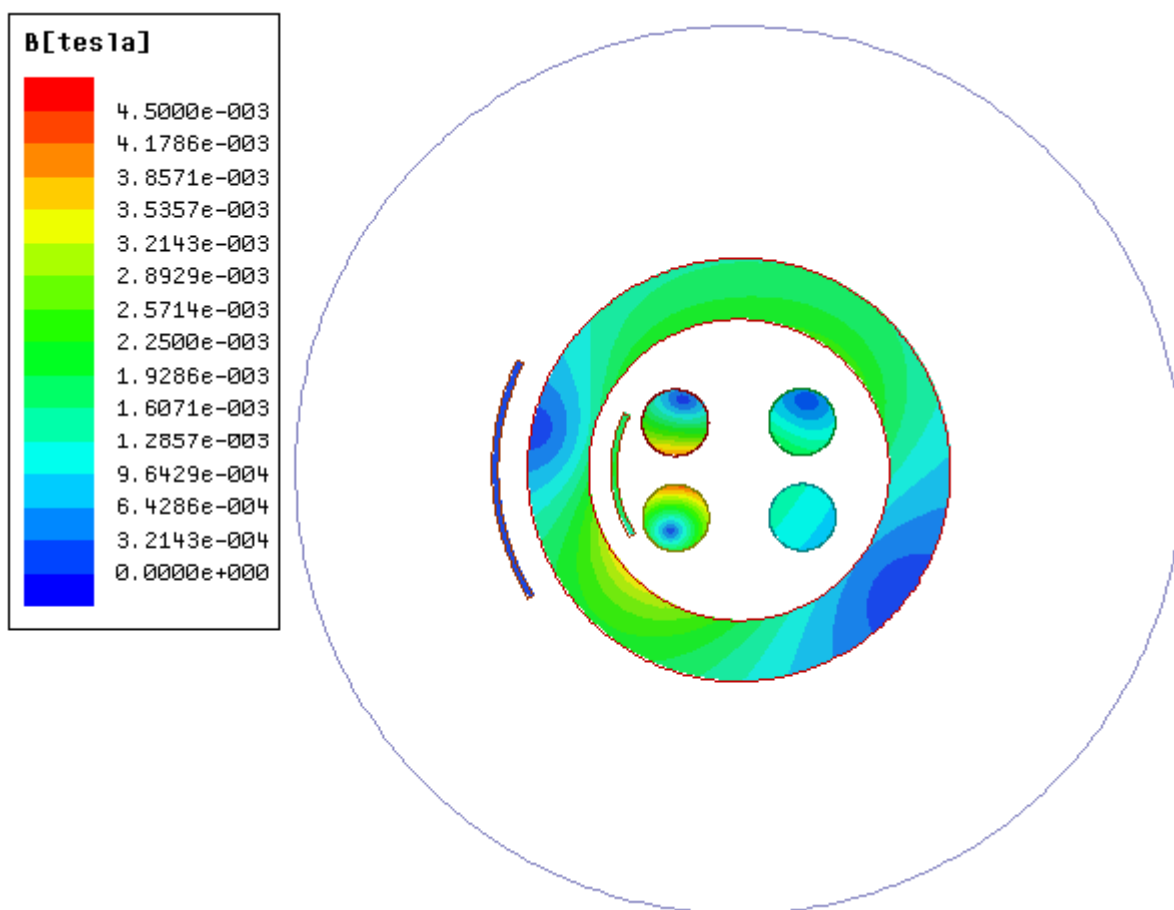
Obr. 7.13 Schéma externího obvodu

Pro co nejvíce reálné výsledky analýzy jsem se pokusil navrhnout tento model obvodu. V levé části jsem zvolil zdroj zapojený do hvězdy. Abych dodržel fázový posuv, musel jsem zadat v nastavení zdroje posunutí o 120° . Při přesunu do tvorby externího obvodu se mi automaticky zobrazily části, které představují v modelu fázové vodiče, nulový vodič a sekundární cívku součtového transformátoru. V schématu jsou pod označením fázové vodiče L1, L2, L3, nulový vodič N a sekundární cívka je jako RDC. Dále jsem vložil rezistor, který bude simulovat odpor vodiče. Hodnota odporu je $R=0,1\Omega$. Tento celek je ohraničen a označen jako RDC_MODEL TR_FEM. Abych byl schopen si zobrazit průběhy, musím přiřadit pro každý vodič ampérmetry. Dále je v schématu vidět blok pod označení ZÁTĚŽ. Zátěž je nastavena tak, aby byl výsledný proud kolem 16A. Pro simulaci poruchy jsem zvolil, že porucha nastane v první fázi ve spojení na zem přes vodič PE zde je časový spínač a hodnota odporu volena tak, aby představovala poruchový proud $\Delta I=30\text{mA}$. Časový spínač je programován obvodem nalevo. Zde se dají nastavit, v jakém čase nám nastane porucha. A poslední část schématu je samotná sekundární cívka součtového transformátoru. K této cívku jsem do série přiřadil odpor $R=2\Omega$, což představuje odpor reálného vinutí, jež jsem změřil a paralelně k tomu je připojený zátěžný odpor $R=10\Omega$, abych mohl ovlivňovat zátěž RDC. A dále je připojen voltmetr pro měření indukovaného napětí.

8 Analýza FEM modelu

V analýze bude ukázán jak bezporuchový chod, tak i poruchový chod. A také provedeme analýzu jádra vyrobeného z různých materiálů, které jsou vhodné pro použití v této aplikaci. Následovně vyhodnotím, který by byl naprosto nejlepší v ohledu reakce na daný reziduální proud. Poruchový proud bude v simulaci představovat hodnotu 30mA, tato hodnota by měla simulovat dotek člověka živé části.

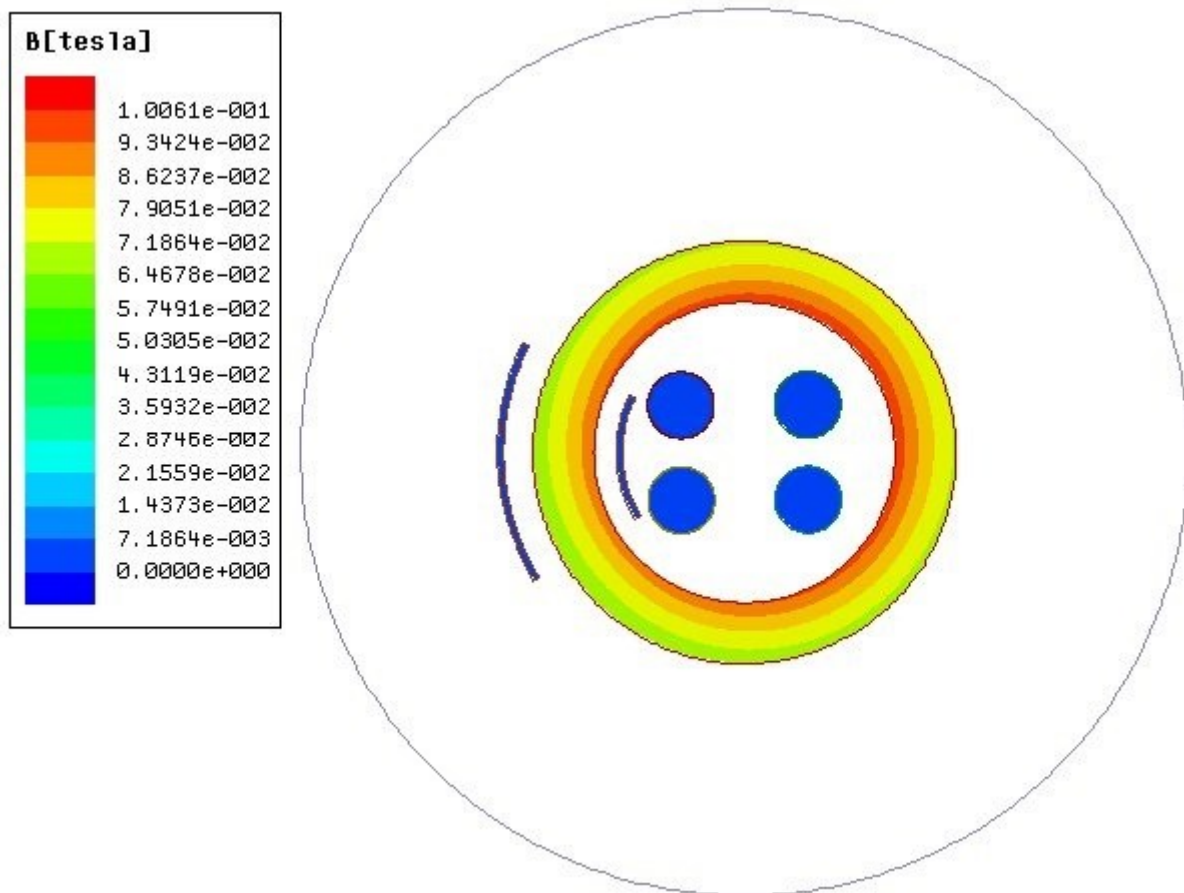
Po kontrole, zda jsou všechny potřebné údaje pro analýzu správně zadány, mohu spustit analýzu. Analýzu budu provádět pro základní materiál a to tzv. mumetall. Jeho vlastnosti byly popsány už dříve v tabulce 6.1. V externím obvodu jsem volil čas sepnutí poruchy v čase 6,5ms, takový čas jsem volil, protože v té době by měl být průběh proudu ustálený. Čas sepnutí jsem se také snažil nastavit co nejbližší počátku nárůstu proudu ve fázi, kde nastane porucha. V tomto čase je schopn materiál naindukovat napětí 11,4mV a dále v ustálenější části napětí 15,7mV.



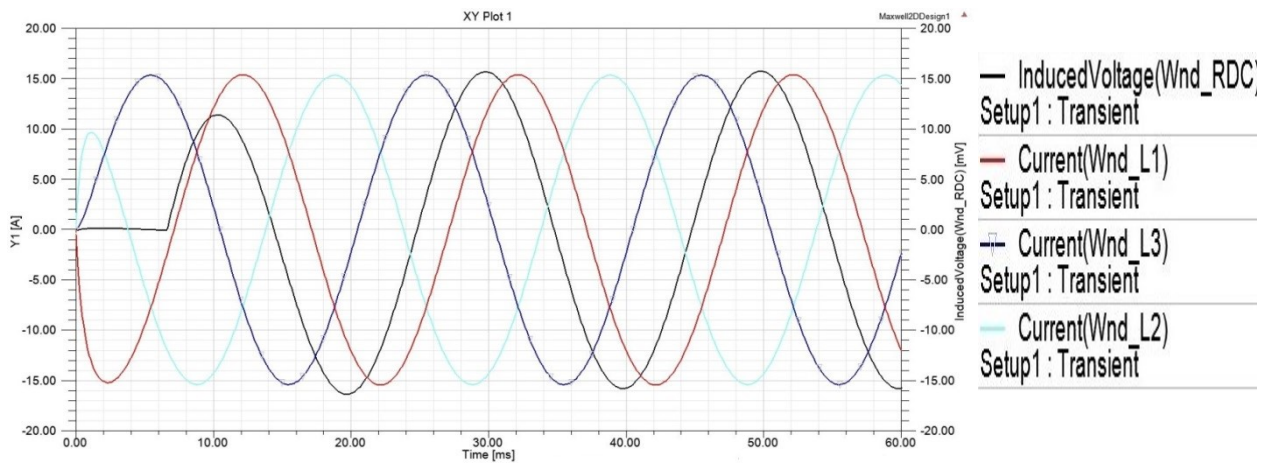
Obr. 8.1 Stav před poruchou

Na obrázku 8.1 je zobrazena magnetická indukce. V době před poruchou je vidět, že to je v klidovém stavu a indukované napětí je téměř nulové a vybavovací zařízení proudového chrániče nereaguje.

Obrázek 8.2 zobrazuje magnetickou indukci po vzniku poruchy v čase 6,6ms. Lze si všimnout, že magnetická indukce se znásobí a to zapříčiní to, že se v sekundární cívce transformátoru začne indukovat napětí. A tímto naindukovaným napětím bychom měli být schopni uvést do pohybu vybavovací zařízení a rozpojit obvod.



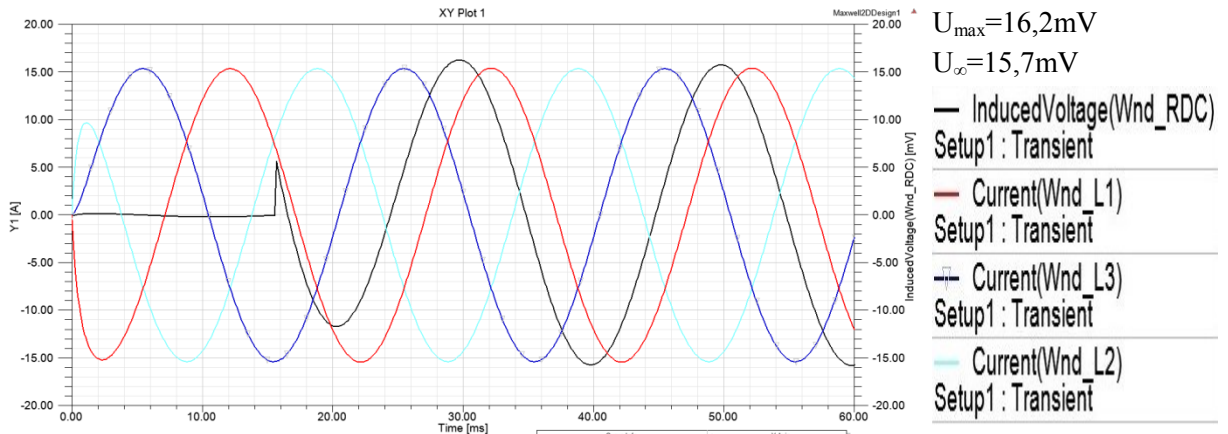
Obr. 8.2 Stav po vzniku poruchy



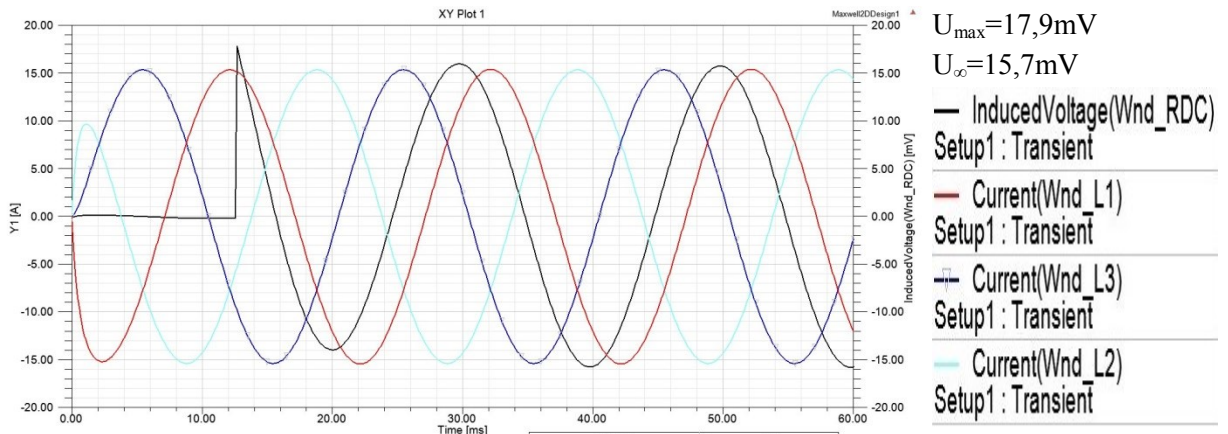
Obr. 8.3 Průběh proudu a indukovaného napětí

Na obrázku 8.3 je zobrazený celý průběh proudu a v daném čase je vidět sepnutí obvodu, co simuluje poruchu. Čas sepnutí je $t=6,6\text{ms}$.

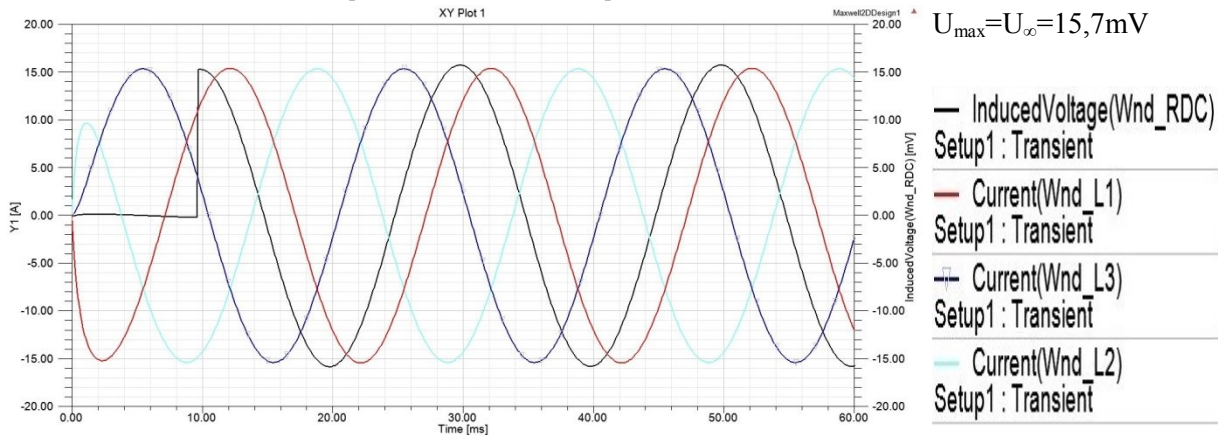
Dále pro ukázkou si zobrazíme, jak se chová magnetická indukce ve vybraných časech.



Obr. 8.4 Průběh proudu a indukovaného napětí v $t=15,6\text{ms}$



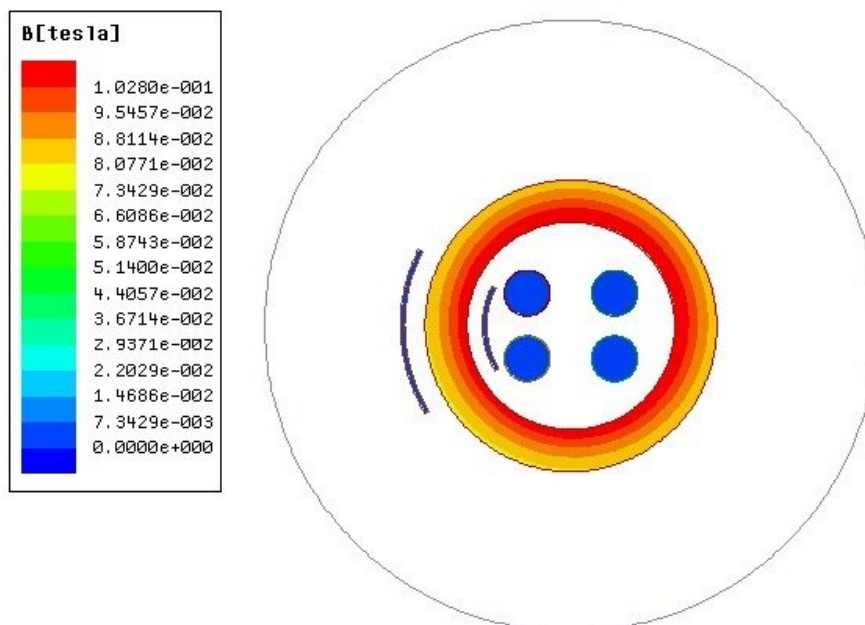
Obr. 8.5 Průběh proudu a indukovaného napětí v $t=12,6\text{ms}$



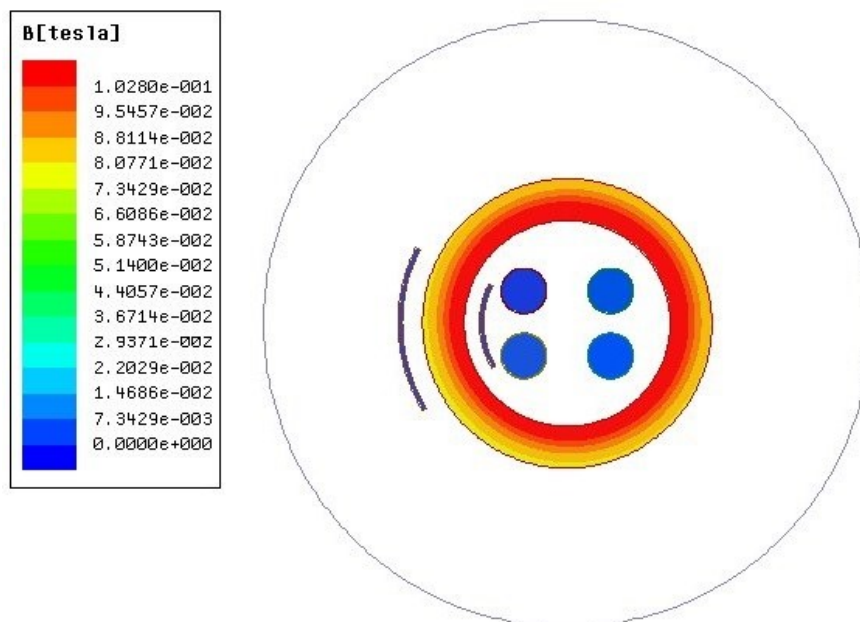
Obr. 8.6 Průběh proudu a indukovaného napětí v $t=9,6\text{ms}$

Spínání v námi zvolených časech ukazuje pouze to, že se mění jenom první perioda tudíž počáteční indukované napětí. Tímto si můžeme ukázat, že když dojde k poruše v jakémkoli čase je schopno se naindukovat po první půl periodě napětí, které je nám schopno vybavit chránič.

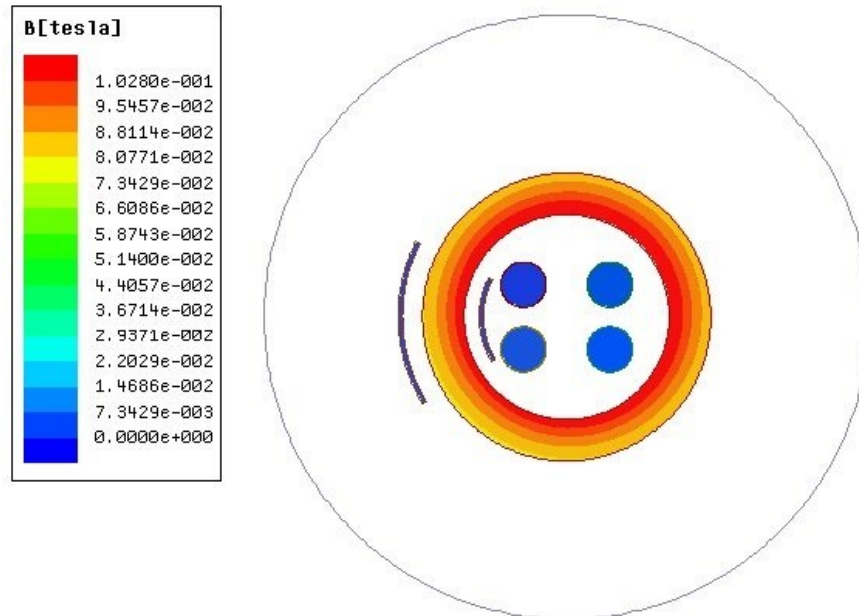
V dnešní době technologického rozvoje jsme schopni vyrobit materiál s neuvěřitelnou permeabilitou a tedy i vysokou citlivostí na nízké reziduální proudy. Tyto materiály jsou schopny včas rozpoznat i velmi nízké reziduální proudy a tím i naindukovat napětí potřebné pro vybavení chrániče. V následujících obrázcích jsou zobrazeny 3 další materiály, které se používají na jádra pro součtové transformátory umístěvané do proudových chráničů. Jedná se o materiály, jež jsou popsány v tabulce 7.1.



Obr. 8.7 Ultraperm 10



Obr. 8.8 Ultraperm 200



Obr. 8.9 Vacoperm 100

Zobrazené magnetické indukce jsou zobrazeny pro stejnou stupnici, jež jsou barevně značeny. Magnetická indukce je zobrazena ve stejném čase proto, abychom mohli dané materiály porovnávat. Rozdíly v daných materiálech jsou minimální. Je to způsobeno nejspíš tím, že materiály jsou velice podobných vlastností a všechny jsou určeny pro rozpoznání reziduálních proudů v rozmezí $I_{\Delta n}=10-100\text{mA}$. Rozdíl je pouze v maximálním naidukovaném napětí, jež bylo:

Materiál	U_{\max} (V)
Ultraperm 200	17,6
Ultraperm 10	17,4
Vacoperm 100	17,7
Mumetall	15,7

Tab. 8.1 Výsledky porovnání

Z toho můžu usoudit, že materiály Ultraperm 200, Ultraperm 10, Vacoperm 100 jsou si velice podobné a mají téměř stejné vlastnosti. Vhodný je i materiál zvaný Mumetall, ale není tak účinný jako předešlé materiály.

9 Závěr

Cílem této práce bylo se seznámit s programem Ansoft Maxwell. Program je založen na metodě konečných prvků. Principem této metody je, že model se rozloží na konečný počet prvků. Metoda je rozdělena na tři části. Tvorba modelu, zadání všech potřebných parametrů a poslední část zahrnuje výsledky této analýzy. Rozhodl jsem se zabývat analýzou součtového transformátoru. V první části jsem popsal základy elektrických strojů. Součtový transformátor, který se hodlám analyzovat, je převážně využíván v proudových chráničích. Proto pro vytvoření modelu jsem se rozhodl použít přesné rozměry transformátoru, který jsem demontoval z proudového chrániče. Po zjištění rozměru jsem mohl přistoupit k první části metody tvorba modelu neboli Preprocessor. Model jsem tvořil přímo v rozhraní programu Ansoft Maxwell. Jelikož to byla má první práce s tímto typem programu, bylo ze začátku velmi těžké přijít na jednotlivé operace, jako je odebrání jednoho kruhu od druhého, aby nám vzniklo mezikružní. Poté co jsem se naučil pracovat s programem, mohl jsem se dát do tvorby modelu. Po vytvoření modelu, jež je popsáno v kapitole 7, jsem mohl zadat materiálové vlastnosti. Pro co nejrealističtější výsledky analýzy jsem při volbě elektrických vlastností modelu vytvořil externí obvod, kterým se snažím nasimulovat třífázový soustavu. Po zvolení všech vlastností jsem mohl spustit analýzu. Pro analýzu jsem si zvolil, že provedu pro jeden materiál spínání v časech, které jsem si navolil sám. Je to pro ukázkou jak se zachová indukované napětí, když se proud nachází před maximem, po maximu a těsně před průchodem nulou. A poté ještě jsem si zvolil tři další nepoužívanější materiály pro jádra součtových transformátorů. Po porovnání jsem zjistil, že materiály se tolik neliší naindukované napětí se pouze lišilo v desetínách voltů. Jelikož Ansoft Maxwell neobsahovala dané typy materiálů, musel jsem si je vytvořit. To jsem provedl tak, že jsem musel ručně pomocí pravítka odečíst hodnoty z BH křivky, které jsem použil z materiálu získaného z webového serveru [13]. Neboť přesnost odečítání je velice nízká, musel jsem tyto grafy ještě upravit a vyhladit tak, aby byly pro analýzu grafy dostačující. Po dokončení úprav jsem prováděl kompletní analýzy pro dané typy materiálů a porovnal výsledky. Ze čtyř různých materiálů vyšlo, že Vacoperm 100 je jeden z nejlepších materiálů, z kterých jsem prováděl analýzu. Dále v materiálech používané pro tuto aplikaci je minimální rozdíl především se materiály dělí na konkrétní citlivost reziduálních proudů. A také na velikost tohoto proudu. Především jsem volil materiály pro aplikaci v domovní instalaci.

10 Literatura

- [1] ŘÍHA, Josef. *Elektrické stroje a přístroje*. Druhé, nezměněné vydání. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1986.
- [2] KOPEČEK, Jan a Miloš DVOŘÁK. *Přístrojové transformátory: měřící a jističí*. Praha: Academia - nakladatelství Československé akademie věd, 1966.
- [3] IVÁNEK, Lubomír. *Teorie elektromagnetického pole: Cvičení s počítačovou podporou*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1994. ISBN 80-7078-242-0.
- [4] JEZIERSKI, Eugeniusz. *Transformátory: Teoretické základy*. Praha: Academia - nakladatelství Československé akademie věd, 1973.
- [5] EATON ELEKTROTECHNIKA S.R.O. *Proudové chrániče a reziduální proudy: Aplikační pomůcka* [online]. 2008 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: http://www.eatonelektrotechnika.cz/pdf/tiskoviny_pdf_343.pdf
- [6] SIEMENS, s.r.o. *Proudové chrániče* [online]. 2002 [cit. 2013-11-17]. Dostupné z: [http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/1862_03\\$proudove\\$chranice.pdf](http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/1862_03$proudove$chranice.pdf)
- [7] HROMÁDKA, Jakub a KUBÁK. TECHSOFT ENGINEERING SPOL. S.R.O. *Software ANSYS pro návrh a optimalizaci elektrických strojů a zařízení, možnosti multifyzikálních analýz* [online]. 2011 [cit. 2014-02-17]. Dostupné z: http://www.ansys.stuba.sk/2011/pdf/FEA_6_TSE_HromAdka.pdf
- [8] LUCAS, J R. THE INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS, Sri Lanka Centre. *Historical Development of the Transformer* [online]. 2000 [cit. 2013-12-13]. Dostupné z: http://www.elect.mrt.ac.lk/Transformer_history_2000.pdf
- [9] KAČOR, Petr. VŠB-TU OSTRAVA , Fakulta elektrotechniky a informatiky. *Metoda konečných prvků v elektrotechnické praxi* [online]. 2003 [cit. 2014-02-13]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~kac37/_num_met_Kacor/
- [10] KOSTKA, Tomáš a NAVRÁTILOVÁ. *ELEKTROTECHNOLOGIE* [online]. 2008 [cit. 2014-02-15]. Dostupné z: http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/ete/ete_sylab.pdf

- [11] EGÚ ČB, a.s. *SOUČTOVÝ TRANSFORMÁTOR PROUDU SIO – 3.0* [online]. 2002 [cit. 2014-02-16]. Dostupné z: http://www.egu.cz/Egu_cb/pdf/SIO-30_cz.pdf
- [12] STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA STROJNÍ A ELEKTROTECHNICKÁ A VYŠŠÍ ODBORNÁ ŠKOLA. *Transformátory* [online]. 2008 [cit. 2013-12-16]. Dostupné z: www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/.../3.../transformator_2.pps
- [13] VACUUMSCHMELZE GMBH & CO. KG. *Soft Magnetic Materials and Semi-finished Products* [online]. 2002 [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://www.vacuumschmelze.com/fileadmin/documents/broschueren/htbrosch/Pb-pht-1.pdf>
http://www.vacuumschmelze.com/fileadmin/docroot/medialib/documents/broschuere/kbbrosch/FIKerne_en.pdf