

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Výpočet ztrát v konstrukčních částech transformátoru

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav NOVÁK**
Osobní číslo: **E08N0047K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Výpočet ztrát v konstrukčních částech transformátoru**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Navrhněte transformátor 40MVA, 110+-2x8%/23kV, Yd1, $u_k = 12\%$.
2. Stanovte ztráty ve stroji - naprázdno, nakrátko.
3. Navrhněte nádobu transformátoru dle podobného typu transformátoru a opatřete ji magnetickým a elektrickým stíněním.
4. Zhodnoťte vliv jednotlivých provedení na ztráty v nádobě.
5. Nakreslete výkres transformátoru.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Bianchi, N. : Electrical Machine analysis using finite elements, CRC Press, 2005
2. Kulkarni, S.V. : Transformer Engineering, Design and Practise, M. Dekker, 2004
3. Robert, M., Del Vecchio: Transformer design Principles, CRC Press, 2001
4. Petrov, G.N. : Elektrické stroje 1, Academia Praha, 1980

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimír Kindl, Ph.D.


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 17. října 2011

Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2012


Doc. Ing. Jirí Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 27. února 2012

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh transformátoru 40 MVA, 110/23 kV a výpočet přídatných ztrát v konstrukčních částech transformátoru pomocí Metody Konečných Prvků (MKP). Dalším krokem je osazení nádoby magnetickým stíněním a jeho analýza pomocí MKP.

Klíčová slova

Transformátor, přídatné ztráty, ztráty v nádobě transformátoru, metoda konečných prvků, stínění

Abstract

The master theses presents design of transformer 40 MVA, 110/23 kV and calculation of stray losses in structural components by using FEM (Finite Element Method). Next step is adding of magnetic shunt on the tank. Then analysis of shunt is performed.

Key words

Transformer, stray losses, tank losses, finite element method, shielding

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne 10.5.2012

Václav Novák

.....

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 TEORIE TRANSFORMÁTORU	12
1.1 PRINCIP ČINNOSTI TRANSFORMÁTORU	12
1.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU	13
2 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ TRANSFORMÁTORU	14
2.1 MAGNETICKÝ OBVOD TRANSFORMÁTORU	14
2.2 VINUTÍ	16
2.3 IZOLACE	17
3 ZTRÁTY TRANSFORMÁTORU	18
3.1 ZTRÁTY NAPRÁZDNO	18
3.1.1 Hysterezní ztráty	18
3.1.2 Ztráty vířivými proudy	20
3.2 ZTRÁTY NAKRÁTKO	20
3.2.1 Ztráty ve vinutí	21
3.2.2 Přídavné ztráty v konstrukčních částech transformátoru	22
4 PŘÍDAVNÉ ZTRÁTY V NÁDOBĚ	22
4.1 OPATŘENÍ PRO OMEZENÍ PŘÍDAVNÝCH ZTRÁT	22
4.1.1 Stínění spojek jádra	23
4.1.2 Magnetické stínění	23
4.1.3 Elektrické stínění	27
5 NÁVRH TRANSFORMÁTORU A URČENÍ ZTRÁT	28
5.1 URČENÍ FÁZOVÝCH NAPĚTÍ A PROUDŮ	28
5.1.1 Výpočet fázových napětí	29
5.1.2 Výpočet fázových proudů	29
5.2 MAGNETICKÝ OBVOD TRANSFORMÁTORU	29
5.2.1 Průřez jádra	29
5.2.2 Průměr kružnice opsané jádru	30
5.2.3 Jmenovitá magnetická indukce	30
5.2.4 Jmenovitý počet závitů	30
5.2.5 Výška jádra	31
5.3 VINUTÍ	31
5.3.1 Průřez vodičů	31
5.3.2 Šířky cívek	32
5.3.3 Základní rozměry okna jádra a vinutí	33
5.3.4 Výška cívek	34
5.4 HMOTNOST TRANSFORMÁTORU	35
5.4.1 Hmotnost magnetického obvodu	35
5.4.2 Hmotnost vinutí	35
5.5 VÝPOČET ZTRÁT	36
5.5.1 Ztráty naprázdno	36
5.5.2 Ztráty nakrátko	36
5.5.3 Ztráty transformátoru	37

6	VÝPOČET PŘÍDAVNÝCH ZTRÁT V KONSTRUKČNÍCH ČÁSTECH TRANSFORMÁTORU	
	POUŽITÍ MKP	37
6.1	MKP – MODEL.....	37
6.1.1	Okrajové podmínky.....	39
6.1.2	Definice použitých materiálů	40
6.1.3	Stanovení elektrické vodivosti konstr. částí.....	40
6.1.4	Výpočet hloubky vniku pro nádobu a stahovací desky.....	40
6.2	MKP - VÝPOČET PŘÍDAVNÝCH ZTRÁT	41
7	VÝPOČET STÍNĚNÍ	44
	ZÁVĚR	47
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	49
	PŘÍLOHY	1

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na návrh transformátoru 40 MVA, 110/23 kV a výpočet přídatných ztrát v jeho konstrukčních částech pomocí MKP. Dalším krokem je osazení nádoby magnetickým stíněním a jeho analýza pomocí MKP.

Přídatné ztráty v konstrukčních částech jsou indukovány rozptylovým polem vinutí. Tyto ztráty jsou u malých transformátorů zanedbatelné, avšak se vzrůstajícím výkonem transformátorů vzrůstá i velikost přídatných ztrát v konstrukčních částech transformátoru.

Rozptylový tok může být také zdrojem lokálních přehřátí v konstrukčních částech. To se týká především malých částí, kde je velká hustota rozptylového toku.

Seznam symbolů a zkratk

U_f	Fázové napětí [V]
U_s	Sdružené napětí [V]
I	Efektivní hodnota proudu [A]
I_f	Jmenovitý fázový proud [A]
S_n	Jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru [VA]
P_0	Ztráty naprázdno [W]
P_k	Ztráty nakrátko [W]
P_j	Jouleovy ztráty [W]
P_{celk}	Celkové ztráty transformátoru [W]
P_e	Ztráty vířivými proudy [W]
P_h	Hysterezní ztráty [W]
R_{1ss}, R_{2ss}	Fázové odpory vinutí měřené ss proudem [Ω]
m	Počet fází [–]
B	Magnetická indukce [T]
l	Výška okna [m]
D	Průměr jádra [m]
M	Vzdálenost středů jader [m]
Φ	Magnetický tok [Wb]
Ψ	Celkový spřažený tok [Wb]
X	Reaktance [–]
f	Frekvence [Hz]
σ	Činitel tvaru [–]
ρ	Měrný odpor [Ω]
σ	Proudová hustota [A/m^2]
γ	Vodivost [S/m]
E	Intenzita elektrického pole [V/m]

N	Počet závitů cívky [-]
U	Efektivní hodnota indukovaného napětí [V]
u_i	Okamžitá hodnota indukovaného napětí [V]
ω	Úhlová frekvence [rad / s]
S_j	Průřez jádra [m ²]
L	Indukčnost [H]
L_{12}	Vzájemná indukčnost [H]
I_μ	Magnetizační proud [A]
k_{Fe}	Koeficient plnění mag. obvodu [-]
n_d	Počet závitů v jednom chodu cívky [-]
n_{ch}	Počet chodů [-]
p_{vet}	Počet paralelních vodičů v axiálním směru [-]
h_{ss}	Výška svazku po stlačení [mm]
n_{rk}	Počet radiálních kanálů [-]
t_{pv}	Tloušťka vložky po stlačení [mm]
M_{Fe}	Hmotnost mag. obvodu [kg]
M_j	Hmotnost jader [kg]
M_{sp}	Hmotnost spojek [kg]
M_v	Hmotnost vinutí [kg]
δ	Hloubka vniku [m]
k_0	Koeficient přídatných ztrát vinutí [-]
c_k	Koeficient zvýšení ztrát vlivem oteplení vinutí [-]
k_{kk}	Koeficient přídatných ztrát v konstrukčních částech [-]

1 Teorie transformátoru

Transformátor je netočivý elektrický stroj transformující elektrickou energii. Mění přivedené napětí a proud na jiné požadované hodnoty. Transformátor je oproti točivým elektrickým strojům zařízení poměrně jednoduché a vysoce účinné. Transformátory se konstruují jako jednofázové, třífázové a zřídka i vícefázové. Transformátory mají široký rozsah využití a používají se v mnoha odvětvích elektrotechniky (sdělovací technika, energetika, měřicí technika) [2,5].

1.1 Princip činnosti transformátoru

Princip činnosti transformátoru je založen na zákonu elektromagnetické indukce. Vinutí jsou souose rozmístěna na jádrech transformátoru. Časově proměnný magnetický tok, vybuzený jedním vinutím, indukuje napětí do druhého vinutí. Nositelem spřaženého magnetického toku je magnetický obvod transformátoru.

Okamžitá hodnota indukovaného napětí vychází z 2. Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru:

$$\oint E dl = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (1.1-1)$$

Oběhové elektrické napětí $\oint E dl$ nazýváme indukované napětí u_i ve smyčce c . Při souhlasné volbě kladného smyslu u_i a Ψ lze psát.

$$u_i = \frac{d\Psi}{dt} \quad (1.1-2)$$

Kde Ψ je spřažený tok tzn. spřažení vinutí s magnetickým tokem Φ . V ideálním případě tedy platí:

$$\Psi = N \cdot \Phi \quad (1.1-3)$$

Výraz 1.1-2 s použitím výrazu 1.1-3 upravíme následovně

$$u_i = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1-4)$$

Ideální harmonický časový průběh magnetického toku Φ (Ve skutečnosti se v časovém průběhu objevují vyšší harmonické):

$$\Phi = \Phi_{\max} \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad (1.1-5)$$

Φ_{\max} amplituda magnetického toku

α fázové posunutí oproti počátku

Dosažením časového průběhu magnetického toku Φ do rovnice 1.1-4 dostaneme časový průběh indukovaného napětí.

$$u_i = \omega \cdot N \cdot \Phi_{\max} \cdot \cos(\omega t + \alpha) = \omega \cdot N \cdot \Phi_{\max} \cdot \sin\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1.1-6)$$

Z této rovnice je patrné, že indukované napětí u_i předbíhá magnetický tok Φ o 90° .

Amplituda indukovaného napětí u_i je ze vztahu 1.1-6 rovna:

$$U_{\max} = \omega \cdot N \cdot \Phi_{\max} \quad (1.1-7)$$

Z amplitudy indukovaného napětí určíme efektivní hodnotu indukovaného napětí:

$$U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \cdot N \cdot \Phi_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \Phi_{\max} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\max}$$

$$U = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \Phi_{\max} \quad (1.1-8)$$

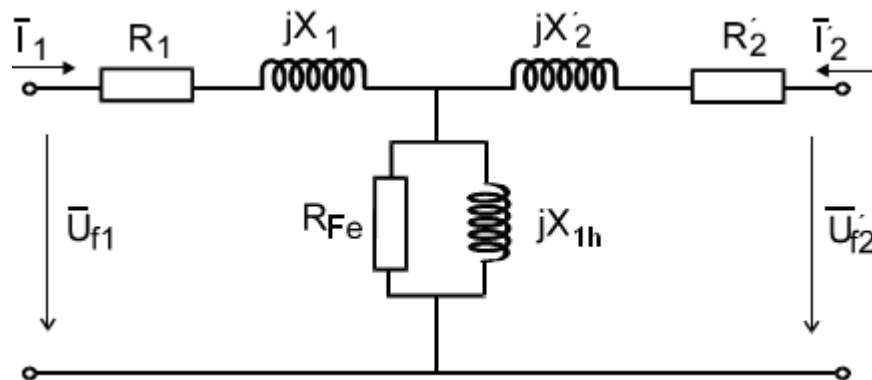
Tento vztah je základní rovnicí v teorii transformátorů. Je využíván pro návrh a dimenzování transformátoru [5].

1.2 Náhradní schéma transformátoru

Základní rovnice jednofázového transformátoru jsou

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (1.2-1)$$

$$u_2 = L_{12} \frac{di_1}{dt} + R_2 \cdot i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (1.2-2)$$



Obr. 1.1 Náhradní schéma transformátoru

Pro určení náhradního schématu transformátoru vycházíme ze zapojení pro dvojbran typu T (obr. 1.1). Transformátor je v ustáleném stavu. Náhradní schéma popisují následující rovnice. [2]

$$\bar{U}_1 = (R_1 + jX_1) \cdot \bar{I}_1 + jX_{1h} \cdot \bar{I}_2 \quad (1.2-3)$$

$$\bar{U}_2 = jX_{1h} \cdot \bar{I}_1 + (R_2' + jX_2') \cdot \bar{I}_2 \quad (1.2-4)$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 = \bar{I}_0 \quad (1.2-5)$$

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_{Fe} + \bar{I}_\mu \quad (1.2-6)$$

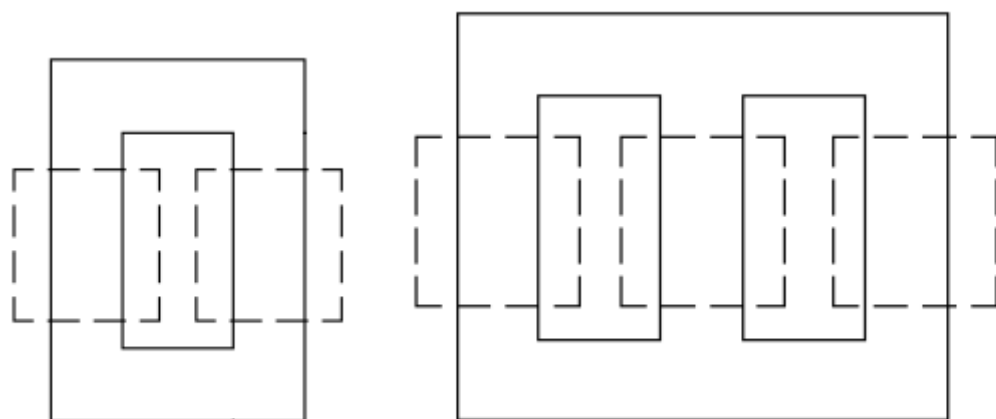
2 Konstrukční uspořádání transformátoru

2.1 Magnetický obvod transformátoru

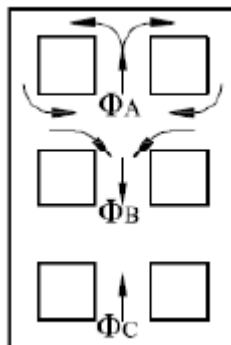
Magnetický obvod konstrukčně dělíme na jádrový a plášťový typ.

Plášťový typ se používá jen ve výjimečných případech a převážně pro jednofázové transformátory. Magnetický tok ve středním jádru je pro plášťový transformátor dvakrát větší než v krajních jádrech. Tato jádra mají poloviční průřez.

U většiny transformátorů převládá jádrový typ transformátoru.



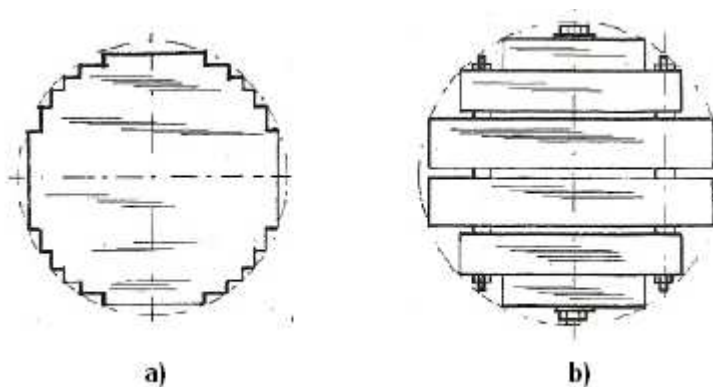
Obr. 2.1 Jednofázový a trojfázový jádrový typ transformátoru



Obr. 2.2 Třífázový plášťový typ transformátoru

Ke spojení jader se spojkami se používá přeplátování plechů. V místě přeplátování dochází vzhledem k použití orientovaných plechů k zvětšení ztrát v železe. Příčinou je orientace plechů. Orientované plechy mají výborné magnetické vlastnosti ve směru válcování, ale ne ve směru kolmém k válcování. V místě přeplátování dochází k ohybu siločar magnetického toku o 90° , tedy v kolmo na směr válcování. Proto jsou zde ztráty v železe vyšší než ve vlastním jádru nebo spojkách. Tento problém je řešen zkosením hran spojů. Nově jsou také plechy v místě spojů laserově, nebo mechanicky rýhované.

Tvar magnetického jádra je vyráběn kruhový nebo čtvercový. Nejčastěji se setkáváme se stupňovitým tvarem, který nahrazuje kruhový tvar jádra. Odstupňování jádra je jednodušší z výrobního hlediska, tím pádem i levnější. Stupňovitě rozdělené jádro je tvořeno svazky plechů, které tvoří jednotlivé stupně. Při větších průřezech jádra jsou mezi stupně přidány chladicí kanály.



Obr. 2.3 Odstupňování jader a) vícešupňové jádro b) odstupňované jádro s příčnými chladicími kanály

Odstupňovaný průřez se praktikuje i u spojek, ačkoli na nich není vinutí. Důvodem k odstupňování spojek je rovnoměrné rozložení magnetické indukce celým průřezem

magnetického obvodu.

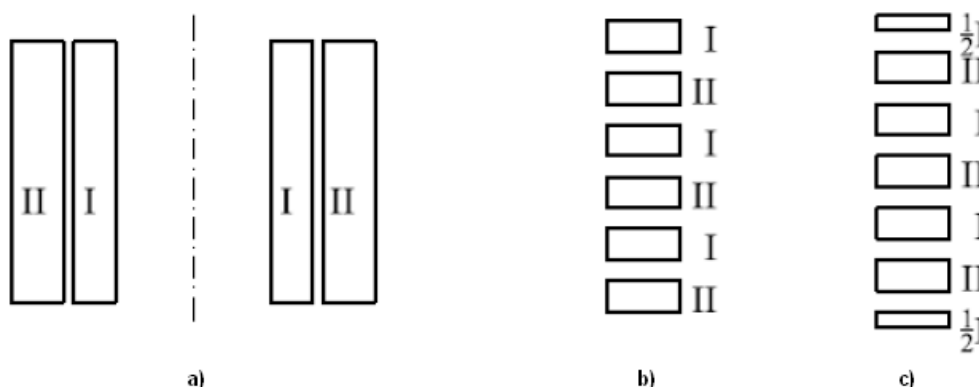
Stažení jader a spojek je v současnosti prováděno pomocí bandáží ze skelných tkanic napuštěných pryskyřicí. V některých případech se využívá slepení samotných transformátorových plechů.

Nedostatečné stažení magnetického obvodu má za následek zvýšení hladiny hluku v transformátoru [3].

2.2 Vinutí

Vinutí transformátoru musí vyhovět požadavkům na mechanickou a elektrickou pevnost. Musí být odolné proti tepelnému namáhání a technologicky proveditelné. Typ konstrukce je zvolen na základě jmenovitých hodnot proudu a napětí.

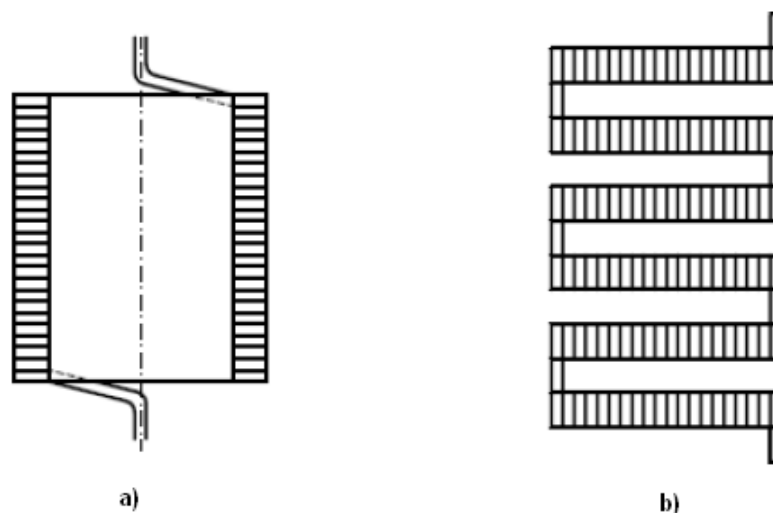
Vodiče jsou převážně měděné, holé nebo izolované, kruhového nebo čtvercového průřezu. Vinutí dále dělíme podle jeho polohy na jádrech transformátoru a podle vzájemné polohy primárního a sekundárního vinutí na vinutí válcová a vystřídaná (kotoučová).



Obr. 2.4 Dělení cívek podle vzájemné polohy jejich částí a) válcové vinutí
b) kotoučové vinutí – nesouměrné c) kotoučové vinutí – souměrné cívek

Válcová vinutí jsou umístěny v ose jádra, tak že blíže k jádru je zpravidla vinutí nižšího napětí a vně se nachází vinutí vyššího napětí. Tento druh vinutí je všeobecně nejrozšířenější.

Vystřídaná vinutí střídají vstupní a výstupní vinutí. Tato vinutí mají menší rozptyl a snadno se v nich tvoří paralelní větve. Problémovým se ukazuje řešení izolace při vyšších napětích [3].



Obr. 2.5 Způsob vinutí cívek a) polohové b) kotoučové

2.3 Izolace

Izolaci uvnitř cívky totožné fáze označujeme pojmem vnitřní izolace. Jedná se o mezizávitovou, mezipolohovou a mezicívkovou izolaci. Třída vnitřní izolace je pro jednotlivé typy chlazení různá. Pro vzduchem chlazené transformátory používáme izolace s tepelnou třídou B až H.

Pro transformátory chlazené olejem používáme izolace třídy A. Třída A je dána ponořením izolace do oleje, který nepřipouští větší teplotu. Samotné izolace jsou vyrobeny z látek organického původu (např. papír, bavlna, hedvábí) a jsou impregnovány ponořením do oleje. Takovéto izolace vykazují velice dobré vlastnosti z hlediska elektrické pevnosti.

Izolaci mezi jednotlivými vinutími, mezi vinutím a magnetickým obvodem a mezifázovou izolaci označujeme jako vnější izolaci. Jako izolace je používáno chladící medium transformátoru (vzduch, olej, zalévací hmoty). Pro jednotlivé typy izolace jsou na základě znalosti příslušného napětí definovány doporučené izolační vzdálenosti.

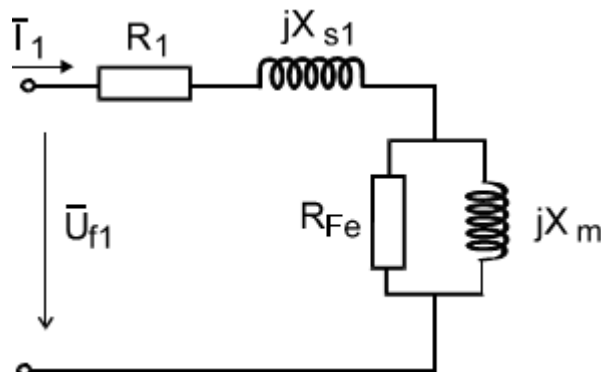
3 Ztráty transformátoru

Ztráty transformátoru všeobecně dělíme na ztráty naprázdno a ztráty nakrátko. Ztráty naprázdno jsou vlastně ztráty magnetického obvodu spojené s budícím proudem ve vstupním vinutí a průchodem magnetického toku magnetickým obvodem.

Ztráty nakrátko dále dělíme na ztráty Jouleovy (RI^2) a ztráty přídatné. Jouleovy ztráty vznikají průchodem proudu vinutím a jsou úměrné druhé mocnině proudu. Přídatné ztráty jsou vyvolány rozptylovým magnetickým tokem z vinutí, který indukuje v kovových částech (stěny nádoby, stahovací desky, svorníky, průchodky) vířivé proudy.

3.1 Ztráty naprázdno

Ztráty naprázdno vychází ze zapojení transformátoru naprázdno, kdy jsou výstupní svorky rozpojeny. Ve výstupním obvodu tedy není žádný proud. Vinutím protéká pouze nezbytný magnetizační proud a jmenovitý magnetický tok se uzavírá v magnetickém obvodu. Ztráty budícím proudem ve vstupním vinutí jsou však zanedbatelné. Hlavní složkou ztrát naprázdno jsou tedy ztráty způsobené magnetickým tokem, který se uzavírá magnetickým obvodem „železem“. Ztráty naprázdno se proto často také nazývají ztrátami v železe.



Obr. 3.1 Náhradní schéma transformátoru naprázdno

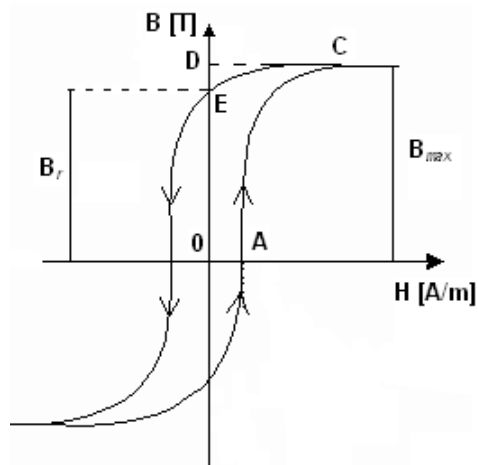
Ztráty naprázdno dělíme na hysterezní ztráty (přemagnetování) a na ztráty vířivými proudy indukovanými v magnetickém obvodu změnou magnetického toku [1].

3.1.1 Hysterezní ztráty

Hysterezní ztráty jsou úměrné ploše hysterezní smyčky. Se zmenšující se plochou hysterezní smyčky se zmenšují i hysterezní ztráty. Tvar hysterezní smyčky závisí na chemickém složení materiálu, na jeho tepelném a mechanickém zpracování. Současné plechy obsahují okolo 3% křemíku. Přidáním křemíku se zlepšují magnetické vlastnosti plechu, čímž

se snižují hysterezní ztráty a zároveň se zvyšuje vlastní odpor plechu. Zvýšením odporu se dosáhne omezení ztrát vířivými proudy.

Hysterezní ztráty jsou vlastně tepelná energie, odpovídající ploše ohraničené křivkou, která vznikne při jednom oběhu po hysterezní smyčce.



Obr. 3.2 Hysterezní smyčka

Při magnetování od nuly do B_{\max} se do jednotky objemu přivede energie daná plochou 0ACD0 magnetizační čáry. Při odmagnetování na remanentní sycení B_r se do sítě vrací energie daná plochou CDE. Ztratí se tedy energie daná plochou 0ACE0. Plocha celé smyčky tedy odpovídá celkovým tepelným ztrátám (hysterezím). Jeden oběh po hysterezní smyčce je uskutečněn za jeden kmit, proto jsou ztráty přímo úměrné frekvenci.

Hysterezní ztráty lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$P_h = k_2 \cdot f \cdot B_{mp}^n \quad (3.1-1)$$

k_2 konstanta závislá na materiálu

B_{mp} ... maximální hodnota magnetické indukce (amplituda)

n Steinmetzova konstanta $n = 1,6 \div 2$ plechy válcované za tepla

$n > 2$ plechy válcované za studena

f frekvence

Hysterezní ztráty jsou dále ovlivňovány rozložením magnetické indukce v celém magnetickém obvodu. Rozložení jader a spojek by mělo být takové, aby nedocházelo k prostupu magnetického toku kolmo k vrstvení. Řešením je odstupňování spojek

magnetického obvodu.

Volbou velikosti magnetické indukce lze ovlivnit velikost ztrát v železe a tím i velikost magnetického obvodu. Se zvětšující se indukci klesá průřez jádra a celé kostry, zmenší se i průměr a váha vinutí. Naopak ztráty v železe se zvýší přibližně o druhou mocninu magnetické indukce [1,2,4].

3.1.2 Ztráty vířivými proudy

Působením střídavého magnetického pole vznikají v magnetickém obvodu vířivé proudy indukované změnou magnetického toku a jsou závislé na druhé mocnině tloušťky plechů, frekvence a magnetické indukce.

Ztráty vířivými proudy lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$P_e = k_1 \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot B_{RMS}^2 \quad (3.1-2)$$

k_1 konstanta závislá na materiálu

B_{RMS} ...efektivní hodnota magnetické indukce

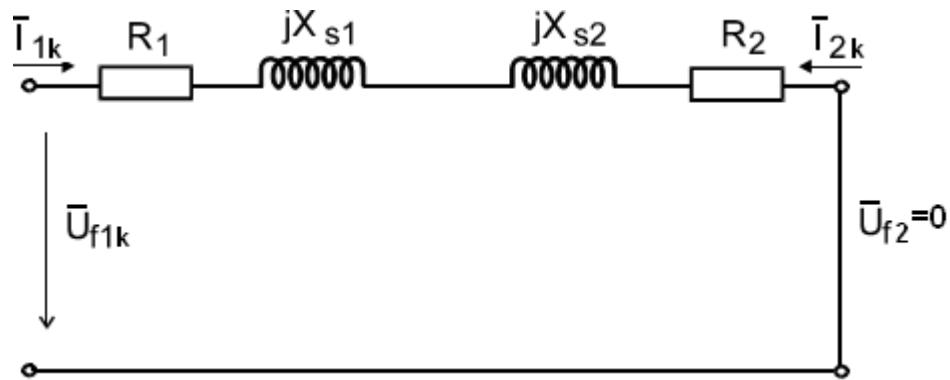
t tloušťka plechu

f frekvence

Ztráty vířivými proudy omezujeme, zejména při vyšších frekvencích, použitím tenčích plechů. Pro zmenšení ztrát naprázdno využíváme závislost vířivých ztrát na vodivosti materiálu [1,2].

3.2 Ztráty nakrátko

Ztráty nakrátko rozdělujeme na Jouleovy ($R I^2$) ztráty a na přídavné ztráty. Jouleovy ztráty jsou tepelné ztráty vznikající průchodem proudu vinutím. Zatímco přídavné ztráty vznikají působením rozptylového toku, vybuzeného ve vinutí, na kovové části transformátoru [1].



Obr. 3.3 Náhradní schéma transformátoru nakrátko

3.2.1 Ztráty ve vinutí

Průchodem proudu vinutím vznikají Jouleovy ztráty, které jsou úměrné druhé mocnině proudu. Pro výpočet Jouleových ztrát ve vinutí pomocí naměřených hodnot stejnosměrných odporů použijeme vzorec:

$$P_j = m \cdot R_{1ss} \cdot I_1^2 + m \cdot R_{2ss} \cdot I_2^2 \quad (3.2-1)$$

m počet fází

R_{1ss}, R_{2ss} fázové odpory vinutí změřené stejnosměrným proudem

I_1, I_2 efektivní hodnoty proudu ve vstupním a výstupním vinutí

Při velkých průřezích vodičů se uplatňuje povrchový jev, který nerovnoměrně rozděluje proudovou hustotu průřezem vodiče. Tím dochází ke zvětšení odporu vodiče. Abychom zabránili vzniku tohoto jevu dělíme vodiče na paralelní pruty (lamely) a tyto lamely permutujeme.

Jouleovy ztráty ve vinutí se často rozdělují na ztráty ve vinutí, při rovnoměrném rozložení proudové hustoty a na přídatné ztráty, kde se uplatňuje vliv zvýšení efektivního odporu oproti hodnotě odporu změřené stejnosměrným proudem.

Ztráty ve vinutí jsou také ovlivňovány teplotou. S rostoucí teplotou Jouleovy ztráty lineárně rostou, což je způsobeno taktéž lineární závislostí odporu na teplotě. Oproti tomu velikost přídatných ztrát ve vinutí klesá, protože s rostoucí teplotou dochází zrovnomnění rozložení proudové hustoty průřezem vodiče [1,2].

3.2.2 Přídavné ztráty v konstrukčních částech transformátoru

S rostoucím výkonem transformátorů vzrůstá i velikost přídavných ztrát v konstrukčních částech. Přídavné ztráty u transformátorů velkých výkonů dosahují značné velikosti. To může způsobit vyšší oteplení, které může v konečném důsledku ovlivňovat životnost zařízení.

Přídavné ztráty v konstrukčních částech tvoří velkou část (cca 20%) z celkových ztrát nakrátko. Největší podíl na velikosti přídavných ztrát mají konstrukční části s velkou plochou (nádoba). Ale důležitější je věnovat pozornost konstrukčním částem o malé ploše (např. výztužné plechy), kde jsou přídavné ztráty malé, ale je zde velká hustota rozptylového toku, která může způsobit neakceptovatelné místní přehřátí, vedoucí až k ohrožení životnosti transformátoru.

Z hlediska konkurenceschopnosti se jednotlivý výrobci snaží o snížení ceny materiálu, které vede k redukci celkové velikosti transformátoru. Se zmenšením velikosti, ale souvisí další nárůst přídavných ztrát. Je proto nutné osazení konstrukčních částí stíněním [1].

4 Přídavné ztráty v nádobě

Přídavné ztráty v nádobě transformátoru tvoří ve velkých silových transformátorech hlavní část celkových ztrát nakrátko. Příčinou ztrát ve stěnách nádoby transformátoru je radiálně odloučený rozptylový tok z vnějšku vinutí, indukovaný ve vinutí vířivými proudy. Hustota rozptylového toku ve stěnách nádoby je nízká, ale indukované ztráty jsou vysoké, příčinou je velká plocha stěn nádoby.

Lokální přehřátí se ve stěnách nádoby téměř nevyskytují. Zabraňuje tomu účinné olejové chlazení stěn nádoby a dobrá tepelná vodivost materiálu, ze kterého je nádoba vyrobena. Přídavné ztráty v nádobě transformátoru omezujeme použitím magnetického a elektrického stínění.

Stínění obvykle aplikujeme na velké silové transformátory. Každému návrhu stínění by měla předcházet finanční analýza, na jejímž základě se rozhodne o použití stínění.

4.1 Opatření pro omezení přídavných ztrát

Přídavné ztráty v konstrukčních částech jsou redukovány několika způsoby:

- použitím vrstveného materiálu
- použitím vysoce odporového materiálu

- snížením hustoty toku v jednotlivých částech použitím materiálů s nižší permeabilitou
- omezením hustoty toku zajištěním paralelní cesty, která má nízký magnetický odpor a ztráty
- omezením hustoty toku použitím stínící desky s vysokou vodivostí, která příslušný tok odkloní

V nádobě transformátoru používáme tři hlavní způsoby omezení:

- 1) stíněním spojek jádra, které shromažďuje rozptylový tok vycházející z vinutí, čímž je jádro a okolí vinutí ovlivňováno jen malým rozptylovým tokem
- 2) magnetickým stíněním
- 3) elektrickým stíněním, kde ke snižování přídavných ztrát používáme hliníkové nebo měděné desky

4.1.1 Stínění spojek jádra

Magnetické stínění spojek je umístěno paralelně ke spojkám na horním a spodním konci vinutí. Stínění spojek svádí rozptylový tok z vinutí zpět do jádra. Uzavřením rozptylového toku z vinutí přes stínění omezujeme ztráty vířivými proudy způsobené radiálním polem na koncích vinutí. Rozptylový tok ze stínění má axiální směr. Svedením toku zpět do jádra se omezují ztráty v nádobě.

Velikost rozptylového toku přenášeného zpět k jádru závisí na vzdálenosti stínění od jádra. S rostoucí vzdáleností stínění od jádra velikost rozptylového toku klesá. Pro účinnou kontrolu rozptylového pole musí být mezera mezi stíněním a jádrem zachována dostatečně malá.

U třífázových transformátorů s konstrukčním provedením se třemi jádry není koncentrace toku spojkami od vnějších fází vinutí přímá a pro jeho nasměrování je třeba stínění speciálně uspořádat. Proto v tomto případě nepoužíváme stínění spojek samostatně, ale doplňujeme jej elektrickým nebo magnetickým stíněním.

4.1.2 Magnetické stínění

Magnetické stínění se využívá pro nádoby s velkými jednolitými stěnami. Jeho účinnost je oproti elektrickému stínění vyšší. Používá se pro eliminaci rozptylového pole z vinutí. Nelze jej tedy využít pro stínění rozptylového pole vyvolaného vysokými proudy.

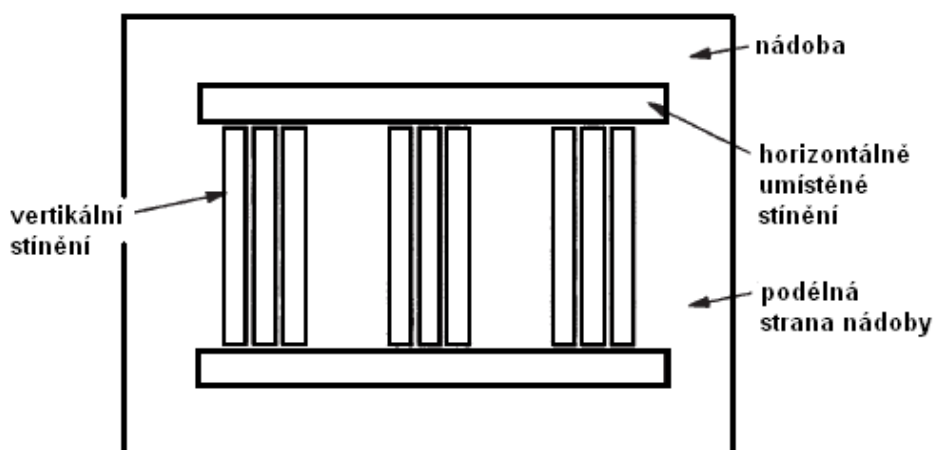
Rozptylový tok je sveden pomocí magnetického stínění o nízkém magnetickém odporu a tím zabraňuje pronikání rozptylového toku do konstrukčních částí. V ideálním případě ($\mu \rightarrow \infty$) je magnetické napětí rovnoměrně rozloženo po celé délce stínění. Ztráty ve stínění jsou obvykle zanedbatelné, jestliže je stínění navrženo o patřičné tloušťce a je zhotoveno z orientovaných plechů válcovaných za studena. K výrobě stínění se obvykle využívají svazky plechů zbylé z výroby jádra.

Výška magnetického stínění by měla být větší než rozměry vinutí. Optimální výška by měla být navržena pomocí analýzy metodou MKP. Bez předchozí analýzy je optimální umístit stínění na nádobu v poloze od hladiny horního středu spojek k hladině dolního středu spojky.

Magnetické stínění dělíme podle polohy na stěně nádoby:

- Stínění umístěné na stěnu nádoby na plocho
- Stínění umístěné kolmo na stěnu nádoby

Umístění magnetického stínění lze kombinovat v horizontálním a vertikálním směru, tak jako je naznačeno na obrázku.



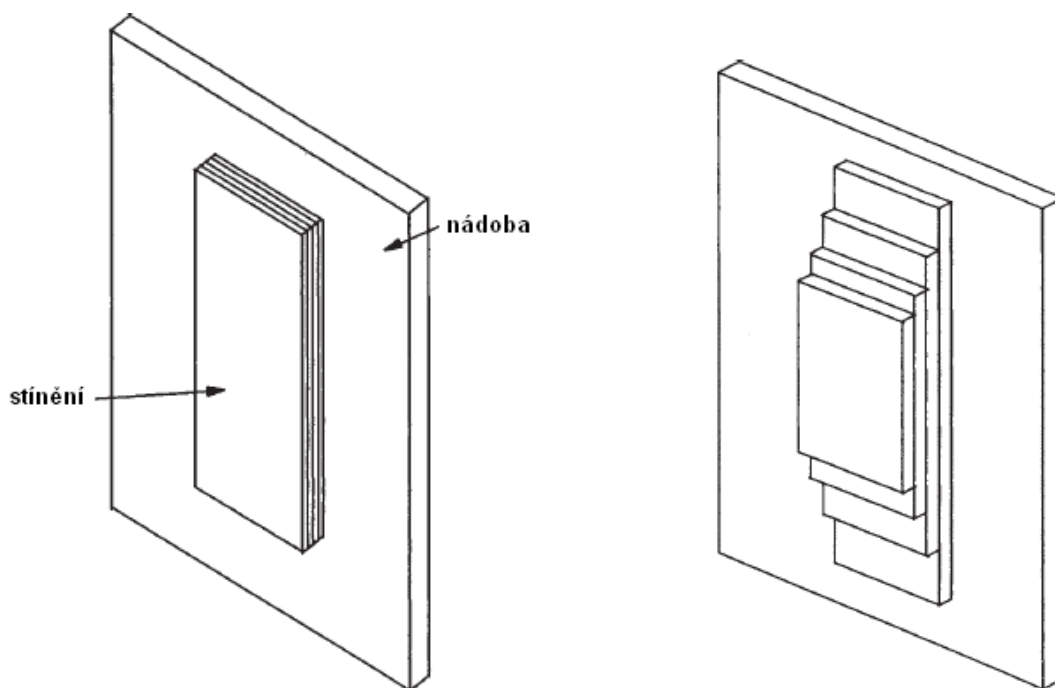
Obr. 4.1 Rozložení stínění v nádobě transformátoru

Stínění ve vertikálním směru umístíme před tři fáze vinutí, zatímco horizontální stínění umístíme na hladině spojek. Horizontálně umístěné stínění pak pohlcuje velkou část rozptylového pole z vinutí. Účinnost tohoto uspořádání zvýšíme přidáním elektrického stínění na kratší stranu nádoby, odkud se odražený rozptylový tok uzavírá zpět v horizontálně umístěném stínění.

Magnetické stínění využíváme v případech nádoby, které nemají komplikovanější tvary. V případech nádoby složitějších tvarů se častěji využívá elektrické stínění.

4.1.2.1 Stínění umístěné na stěnu nádoby na plocho

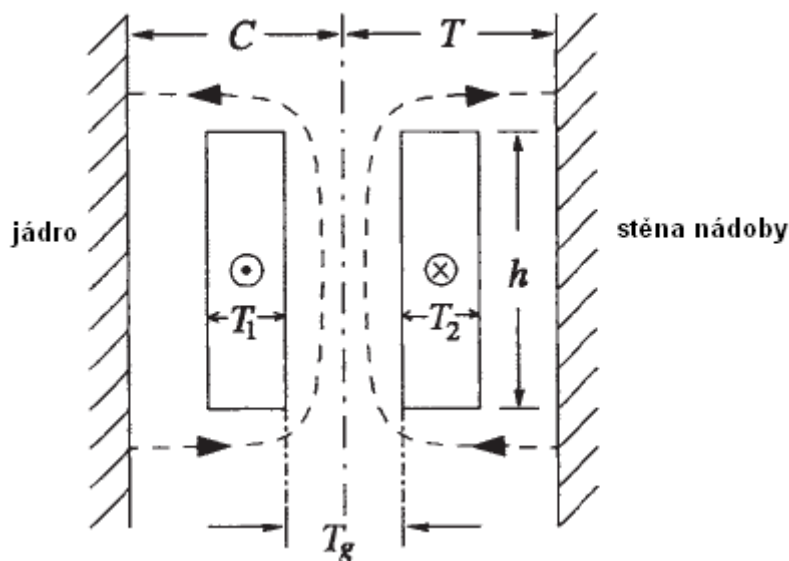
Stínění umístěné na stěnu nádoby naplocho je obecně využívanější. Šířku stínící desky volíme co nejmenší s ohledem na vstupní ztráty v horní a spodní části desky, ve kterých působí rozptylový tok v radiálním směru. S omezením šířky stínění vzrůstá počet stínících desek, tím se navyšuje čas zpracování stínění. Proto každý výrobce hledá optimální šířku a počet desek.



Obr. 4.2 Stínění umístěné na plocho na stěnu nádoby a odstupňované stínění

Šířka stínících desek se pohybuje od 50 do 300 mm. Mezery mezi jednotlivými deskami by měli být minimální. V podstatě se zachová jen taková mezera, která postačuje pro uchycení desek.

Tvar desek lze navrhnout dvěma způsoby. Jako rovnoměrně rozloženou po celé délce desky nebo naopak odstupňovanou. Stínící desku si můžeme dovolit odstupňovat díky tomu, že radiální složka rozptylového toku vstupuje do koncových částí stínící desky v různých bodech a je tedy malý. Zatímco axiální složka rozptylového toku je souhlasně orientovaná se shromažďovaným tokem a tak je maximální ve středu stínící desky.



Obr. 4.3 Rozložení vinutí v transformátoru pro návrh tloušťky stínící desky

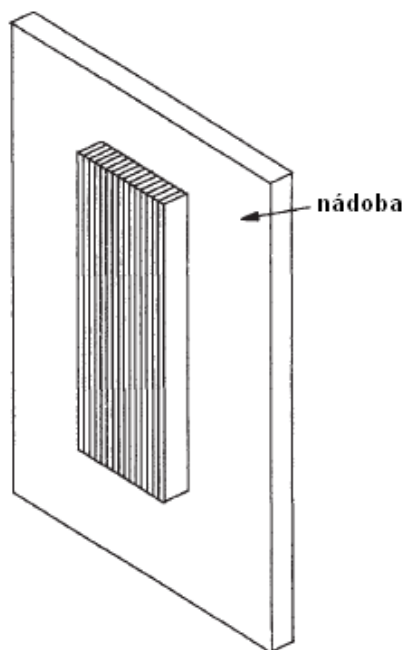
Tloušťku stínění lze navrhnout dle následujícího vzorce:

$$SD_{\min} = \frac{C}{C+T} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I \cdot \left(\frac{T_1 + T_2}{2} + T_g \right)}{h \cdot B} \quad [\text{m}] \quad (4.1-1)$$

Hodnota hustoty magnetického toku B je pro orientované plechy válcované za studena 1,7 T a pro orientované plechy válcované za tepla 1,4 T. Protože je však skutečná efektivní permeabilita stínění menší kvůli mezilamelovým a nemagnetickým mezerám preferujeme, i z důvodů zpomalení sycení stínění, hodnoty B o 20% nižší tj. pro plechy válcované za studena 1,4 T a pro plechy válcované za tepla 1,15 T.

4.1.2.2 Stínění umístěné kolmo na stěnu nádoby

Druhé konstrukční uspořádání položené kolmo na stěnu nádoby je účinnější než stínící deska umístěná na plocho, ale je náročnější na výrobu.



Obr. 4.4 Stínění umístěné kolmo na stěnu nádoby

Rozptylový tok vstoupí do tenkých plechů, kde se omezí ztráty vířivými proudy. Efektivní permeabilita těchto plechů je díky chybějícím nemagnetickým mezerám větší než je tomu v případě stínění umístěného na plocho.

Přítomnost vnitřních mezilamelových nemagnetických mezer u plošného stínění redukuje permeabilitu v normálovém směru k plechům, proto má rozptylový tok tendenci setrvat v lamelě dokud se ta nenasytí. V případě jejího nasycení pokračuje rozptylový tok dále do další lamely atd. Proto je plošné uspořádání stínění méně účinné.

4.1.3 Elektrické stínění

Elektrické stínění omezuje rozptylová pole z vinutí a od vysokoproudých částí. Dotyčná rozptylová pole jsou pomocí indukovaných vířivých proudů ve stínění vytlačována zpět k jádru. Výhodou elektrického stínění je jeho menší hmotnost a dále pak možnost jeho osazení i na nádoby nebo jiné konstrukční části složitějších tvarů.

Osazení stínění na konstrukční části složitějších tvarů je jednodušší, ale má také své nevýhody. Především se vytvářejí ztráty i v samotném stínění. Dále je pak možný výskyt lokálních přehřátí, způsobených odraženým rozptylovým tokem ze stínění, na nechráněných částech v těsné blízkosti stínění. Proto je vždy nutné navrhnout rozměry a umístění stínění

v nádobě co nejpřesněji. Šířka elektrického stínění by oproti magnetickému měla být dostatečně velká.

Nejvhodnější použití je kombinace elektrického stínění na kratších stranách nádoby, magnetické stínění v horizontálním směru na hladině spojek a vertikální magnetické stínění v rovině všech tří fází vinutí. Elektrické a horizontální stínění směřují pole především do axiálního směru. Axiální složka rozptylového pole je omezována vertikálně umístěným magnetickým stíněním [1].

5 Návrh transformátoru a určení ztrát

Návrh transformátoru vychází ze zavedeném, typizované řady již vyrobených transformátorů, u kterých jsou již splněny všechny požadavky dané normami, spolu s co nejlepším a nejekonomičtějším řešením konstrukce transformátoru. Vstupní dané hodnoty se pak jen minimálně mění. Změny převážně souvisí jen s použitím materiálů lepších vlastností, zlepšeným chlazením nebo příznivějším rozměrovým řešením. Případné změny jsou prováděny za účelem ekonomičtějšího návrhu transformátoru.

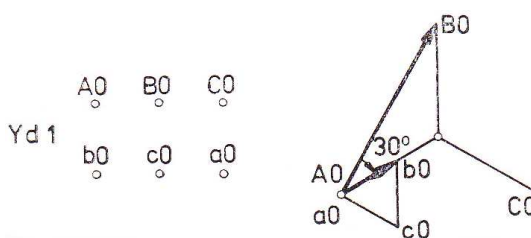
Dále je návrh transformátoru omezen podmínkami dopravy. Kdy největší transformátory jsou přepravovány pomocí speciálně upravených železničních vagonů.

Pro návrh transformátoru je nejdůležitější následující základní rovnice:

$$U_i = 4,44 \cdot N \cdot \Phi_{\max} \cdot f \quad [\text{V}; -, \text{Wb}, \text{Hz}]$$

5.1 Určení fázových napětí a proudů

Vycházíme ze zapojení transformátoru Yd1.



Obr. 5.1 Zapojení transformátoru Yd1

5.1.1 Výpočet fázových napětí

Hodnota fázového napětí pro zapojení primárního vinutí do hvězdy:

$$U_{1s} = 110 \text{ kV}$$

$$U_{1f} = \frac{U_{1s}}{\sqrt{3}} = \frac{110000}{\sqrt{3}} = 63508,5 [\text{V}] \quad (5.1-1)$$

Hodnota fázového napětí sekundárního vinutí pro zapojení do trojúhelníka je shodná se síťovým napětím. Pak tedy $U_{2f} = U_{2s} = 23 \text{ kV}$.

5.1.2 Výpočet fázových proudů

Primární vinutí 110 kV je zapojeno do hvězdy. Pro výpočet jmenovitého fázového proudu vyjdeme ze vztahu $S = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_f$.

$$I_{1f} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{1s}} = \frac{40 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = 209,9 [\text{A}] \quad (5.1-2)$$

Pro sekundární vinutí, které je zapojeno do trojúhelníka, použijeme vztah $S = 3 \cdot U_2 \cdot I_{2f}$.

$$I_{2f} = \frac{S}{3 \cdot U_2} = \frac{40 \cdot 10^6}{3 \cdot 23000} = 579,7 [\text{A}] \quad (5.1-3)$$

5.2 Magnetický obvod transformátoru

5.2.1 Průřez jádra

$$S_j = C \cdot \sqrt{\frac{S}{k \cdot f}} \cdot 10^{-4} = 4,5 \cdot \sqrt{\frac{40 \cdot 10^6}{3 \cdot 50}} \cdot 10^{-4} = 0,2324 [\text{m}^2], \quad (5.2-1)$$

kde $C = 4 \div 6$ přirozené olejové chlazení

$C = 6 \div 8$ vzduchové chlazení

Volím $k = 3$ pro trojfázový jádrový transformátor.

5.2.2 Průměr kružnice opsané jádru

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S_j}{\pi \cdot k_{Fe}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,2324}{\pi \cdot 0,89}} = 0,576 \text{ [m]} \quad (5.2-2)$$

$k_{Fe} \sim 0,89$	pro $D \geq 300\text{mm}$
$k_{Fe} \sim 0,84$	pro $D < 300\text{mm}$
$k_{Fe} \sim 0,95$	jádra s obdélníkovým průřezem

5.2.3 Jmenovitá magnetická indukce

Magnetický obvod transformátoru je tvořen orientovanými plechy válcovanými za studena. Pro tyto plechy volím hodnotu magnetické indukce

$$B = 1,7 \text{ [T]}.$$

5.2.4 Jmenovitý počet závitů

Jmenovitý počet závitů určím ze vztahu pro indukované napětí transformátoru

$$U_i = 4,44 \cdot \Phi \cdot N \cdot f. \text{ Výsledek je zaokrouhlen na celá čísla.}$$

Jmenovitý magnetický tok

$$\Phi = B \cdot S_j = 1,7 \cdot 0,2324 = 0,3951 \text{ [Wb]} \quad (5.2-3)$$

Indukované napětí na jeden závit

$$U_{iN} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f = 4,44 \cdot 0,3951 \cdot 50 = 87,71 \text{ [V]} \quad (5.2-4)$$

Počet závitů pro napětí 110 kV

$$N_1 = \frac{U_{1f}}{U_{iN}} = \frac{63508,5}{87,71} = 724 \text{ [-]} \quad (5.2-5)$$

Počet závitů pro napětí 23 kV

$$N_2 = \frac{U_2}{U_{iN}} = \frac{23000}{87,71} = 263 \text{ [-]} \quad (5.2-6)$$

Počet závitů regulačního vinutí

$$N_r = \frac{U_{rf}}{U_{iN}} = \frac{10483,5}{87,71} = 120 \text{ [-]} \quad (5.2-7)$$

5.2.5 Výška jádra

Výška jádra závisí na proudovém zatížení povrchu železa A, které udává celkový proud připadající na 1 m výšky jádra. Volím $A = 180000 \text{ A/m}$.

$$l = \frac{2 \cdot I_1 \cdot N_1}{A} = \frac{2 \cdot 209,9 \cdot 724}{180000} = 1,69 \text{ [m]} \quad (5.2-8)$$

5.3 Vinutí

5.3.1 Průřez vodičů

S ohledem na velikost ztrát nakrátko volíme velikost proudové hustoty pro olejové transformátory v rozmezí $\sigma_{Cu} = 2 \div 3 \text{ [A/mm}^2\text{]}$.

$$S = \frac{I_f}{\sigma} \text{ [mm}^2\text{; A, A/mm}^2\text{]} \quad (5.3-1)$$

- vinutí 23 kV:

$$S = \frac{579,7}{2,1} = 276,1 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (5.3-2)$$

- vinutí 110 kV:

$$S = \frac{209,9}{2,3} = 91,3 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (5.3-3)$$

- regulační vinutí:

$$S = \frac{223,78}{6,0} = 37,3 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (5.3-4)$$

5.3.2 Šířky cívek

Šroubovice:

$$b_c = n_{pvr} \cdot b_{vi} \cdot 1,035 \cdot n_{vr} + \sum a_k \text{ [mm]} \quad (5.3-5)$$

b_c šířka cívky [mm]

n_{pvr} ... počet paralelních vodičů v radiálním směru [-]

b_{vi} šířka vodiče včetně izolace [mm]

n_{vr} počet vrstev [-]

a_k šířka axiálního kanálu [mm]

1,035 ..koeficient nárůstu vlivem navinutí

- vinutí 23 kV:

$$b_c = 23 \cdot 3,55 \cdot 1,035 + 6 = 90,5 \text{ [mm]} \quad (5.3-6)$$

- regulační vinutí:

$$b_c = 4 \cdot 3,2 \cdot 1,035 = 13,2 \text{ [mm]} \quad (5.3-7)$$

Deskové vinutí:

$$b_c = n_{zd} \cdot n_{pvr} \cdot b_{vi} \cdot 1,035 \cdot a_k \text{ [mm]} \quad (5.3-8)$$

b_c šířka cívky [mm]

n_{pvr} ... počet paralelních vodičů v radiálním směru [-]

b_{vi} šířka vodiče včetně izolace [mm]

n_{zd} počet závitů v desce [-]

a_k šířka axiálního kanálu [mm]

1,035 ..koeficient nárůstu vlivem navinutí

- vinutí 110 kV:

$$b_c = 11 \cdot 2 \cdot 4,05 \cdot 1,035 = 92,2 \text{ [mm]} \quad (5.3-9)$$

5.3.3 Základní rozměry okna jádra a vinutí

Výška okna jádra $l = 1,69m$

Vzdálenost konců vinutí od spojek jader $v_1 = 280mm$

Vzdálenost konců regulačního vinutí od spojek jader $v_2 = 480mm$

Výška vinutí

$$h = l - v_1 = 1690 - 280 = 1410 \text{ [mm]} \quad (5.3-10)$$

Výška regulačního vinutí

$$h_r = l - v_2 = 1690 - 480 = 1210 \text{ [mm]} \quad (5.3-11)$$

Výpočet jednotlivých průměrů cívek je realizován dle následujících vztahů:

Vnitřní průměr cívek

$$D_i = D + 2 \cdot d_{el} \text{ [mm]} \quad (5.3-12)$$

D průměr jádra [mm]

d_{el} izolační vzdálenost od jádra [mm]

Střední průměr cívek

$$D_s = D_i + b_c \text{ [mm]} \quad (5.3-13)$$

b_c šířka cívky [mm]

Vnější průměr cívek

$$D_e = D_i + 2 \cdot b_c \text{ [mm]} \quad (5.3-14)$$

průměry cívky vinutí 23 kV:

$$d_{el} = 23 \text{ [mm]}$$

$$D_i = 576 + 2 \cdot 23 = 622 \text{ [mm]} \quad (5.3-15)$$

$$D_s = 622 + 90,5 = 712,5 \text{ [mm]} \quad (5.3-16)$$

$$D_{es} = 622 + 2 \cdot 90,5 = 803 \text{ [mm]} \quad (5.3-17)$$

průměry cívky vinutí 110 kV:

$$d_{el} = 50 \text{ [mm]}$$

$$D_i = 803 + 2 \cdot 50 = 903 \text{ [mm]} \quad (5.3-18)$$

$$D_s = 903 + 92,2 = 995,2 \text{ [mm]} \quad (5.3-19)$$

$$D_{ep} = 903 + 2 \cdot 92,2 = 1087,4 \text{ [mm]} \quad (5.3-20)$$

průměry cívky regulačního vinutí:

$$d_{el} = 33 \text{ [mm]}$$

$$D_i = 1087,4 + 2 \cdot 33 = 1153,4 \text{ [mm]} \quad (5.3-21)$$

$$D_s = 1153,4 + 13,2 = 1166,6 \text{ [mm]} \quad (5.3-22)$$

$$D_{er} = 1153,4 + 2 \cdot 13,2 = 1179,8 \text{ [mm]} \quad (5.3-23)$$

5.3.4 Výška cívek

$$h_{cs} = (n + j) \cdot n_{ch} \cdot n_p \cdot h_{ss} + n_{rk} \cdot t_{pv} \text{ [mm]} \quad (5.3-24)$$

n počet závitů v jednom chodu cívky [-]

j respektuje vinutí deskové $j = 0$

šroubovice $j = 1$ (připočítáváme 1 závit)

n_{ch} ... počet chodů [-]

n_p počet paralelních vodičů v axiálním směru [-]

h_{ss} výška svazku po stlačení [mm]

n_{rk} počet radiálních kanálů [-]

t_{pv} Tloušťka vložky po stlačení [mm]

- vinutí 23 kV:

$$h_{cs} = (132 + 1) \cdot 1 \cdot 1 \cdot 8,62 + 66 \cdot 3,98 = 1409,14 \text{ [mm]} \quad (5.3-25)$$

- vinutí 110 kV:

$$h_{cs} = 70 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 15,76 + 69 \cdot 4,46 = 1410,94 \text{ [mm]} \quad (5.3-26)$$

- regulační vinutí:

$$h_{cs} = (120 + 1) \cdot 1 \cdot 2 \cdot 5,01 = 1212,14 \text{ [mm]} \quad (5.3-27)$$

5.4 Hmotnost transformátoru

5.4.1 Hmotnost magnetického obvodu

$$\begin{aligned} M_j &= m \cdot \rho_{Fe} \cdot S_j \cdot (L + 0,163 \cdot D) = \\ &= 3 \cdot 7650 \cdot 0,2324 \cdot (1,69 + 0,163 \cdot 0,576) = 9514,5 \text{ [kg]} \end{aligned} \quad (5.4-1)$$

$$\begin{aligned} M_{sp} &= 2 \cdot \rho_{Fe} \cdot S_{sp} \cdot (2 \cdot M + 0,8 \cdot D) = \\ &= 2 \cdot 7650 \cdot 0,2324 \cdot (2 \cdot 1,245 + 0,8 \cdot 0,576) = 10492,2 \text{ [kg]} \end{aligned} \quad (5.4-2)$$

Celková hmotnost magnetického obvodu:

$$M_{Fe} = M_j + M_{sp} = 9214,5 + 10492,2 = 20006,7 \text{ [kg]} \quad (5.4-3)$$

5.4.2 Hmotnost vinutí

Hmotnost cívky vinutí:

$$M_v = \frac{D_i + D_e}{2} \cdot \pi \cdot S_v \cdot 3 \cdot \gamma \cdot N \text{ [kg]} \quad (5.4-4)$$

- vinutí 23 kV

$$\begin{aligned} M_v &= \frac{D_i + D_e}{2} \cdot \pi \cdot S_v \cdot 3 \cdot \gamma \cdot N = \\ &= \frac{0,622 + 0,803}{2} \cdot \pi \cdot 276,1 \cdot 10^{-6} \cdot 26700 \cdot 263 = 4339,8 \text{ [kg]} \end{aligned} \quad (5.4-5)$$

- vinutí 110 kV

$$\begin{aligned} M_v &= \frac{D_i + D_e}{2} \cdot \pi \cdot S_v \cdot 3 \cdot \gamma \cdot N = \\ &= \frac{0,903 + 1,0874}{2} \cdot \pi \cdot 91,3 \cdot 10^{-6} \cdot 26700 \cdot 724 = 5518 \text{ [kg]} \end{aligned} \quad (5.4-6)$$

- regulační vinutí

$$M_v = \frac{D_i + D_e}{2} \cdot \pi \cdot S_v \cdot 3 \cdot \gamma \cdot N =$$

$$= \frac{1,1534 + 1,1798}{2} \cdot \pi \cdot 37,3 \cdot 10^{-6} \cdot 26700 \cdot 120 = 438 \quad [\text{kg}] \quad (5.4-7)$$

Celková hmotnost magnetického obvodu:

$$M_v = M_{23} + M_{110} + M_{reg} = 4339,8 + 5518 + 438 = 10295,8 \quad [\text{kg}] \quad (5.4-8)$$

Celková hmotnost magnetického obvodu:

$$M = M_{Fe} + M_v = 20006,7 + 10295,8 = 30302,5 \quad [\text{kg}] \quad (5.4-9)$$

5.5 Výpočet ztrát

5.5.1 Ztráty naprázdno

$$P_0 = p_{b0} \cdot M_{Fe} \cdot \Delta p_{d0} = 1,346 \cdot 20006,7 \cdot 1,115 = 30026 \quad [\text{W}] \quad (5.5-1)$$

5.5.2 Ztráty nakrátko

$$P_k = M_v \cdot k_p \cdot c_k \cdot \sigma^2 \quad [\text{W}] \quad (5.5-2)$$

- vinutí 23 kV

$$P_{k23} = 4339,8 \cdot 1,07 \cdot 2,439 \cdot 2,1^2 = 49946,4 \quad [\text{W}] \quad (5.5-3)$$

- vinutí 110 kV

$$P_{k110} = 5518 \cdot 1,075 \cdot 2,439 \cdot 2,3^2 = 76534,6 \quad [\text{W}] \quad (5.5-4)$$

Ztráty v konstrukčních částech:

$$P_{kk} = (P_{k23} + P_{k110}) \cdot k_{kk} = (49946,4 + 76534,6) \cdot 0,04 = 5059 \quad [\text{W}] \quad (5.5-5)$$

$$k_{kk} = 0,04$$

Celkové ztráty nakrátko:

$$P_k = P_{k23} + P_{k110} + P_{kk} = 49946,4 + 76534,6 + 5059 = 132805 \quad [\text{W}] \quad (5.5-6)$$

5.5.3 Ztráty transformátoru

$$P_{celk} = P_0 + P_k = 30026 + 132805 = 162831 \text{ [W]} \quad (5.5-7)$$

[10]

6 Výpočet přídatných ztrát v konstrukčních částech transformátoru použitím MKP

Pro řešení fyzikálních systémů popisovaných pomocí parciálních diferenciálních nebo integrálních rovnic se využívá numerická metoda MKP. Metodou MKP řešíme především nelineární, prostorové a časově proměnné problémy, které nemohou být řešeny pomocí analytických výpočetních metod. Daný fyzikální problém je popsán soustavou diferenciálních rovnic, které jsou následně řešeny pomocí MKP.

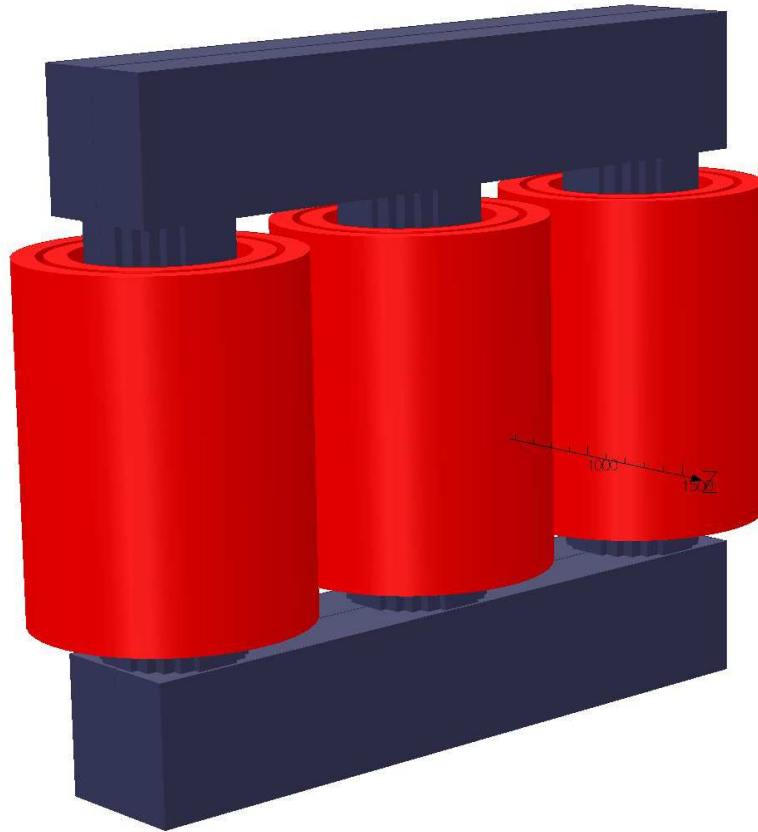
MKP rozděluje výpočetní problém na malé prvky (elementy), které zaplní daný problém nebo objekt výpočtu. Počet prvků je konečný. Jednotlivé výpočetní prvky jsou navzájem spojeny v uzlech, matematických bodech o známých prostorových souřadnicích. Zjednodušeně lze říct, že hledané hodnoty výpočetního problému jsou počítány právě v těchto uzlech. Vlastnosti jednotlivých elementů, které tvoří výpočetní síť modelovaného objektu, můžeme popsat jednoduchou matematickou funkcí. Pak lze modelovaný objekt popsat soustavou rovnic. Řešení diferenciálních rovnic je tak převedeno na řešení soustavy algebraických rovnic. Modelovaný objekt je pak popsán řádově tisícem až milionem rovnic.

V současnosti je nabízeno dostatek kvalitních výpočtových softwarů, využívajících MKP. MKP se využívá jak při návrhu nových zařízení, tak i při modernizaci stávajících zařízení [8].

6.1 MKP – model

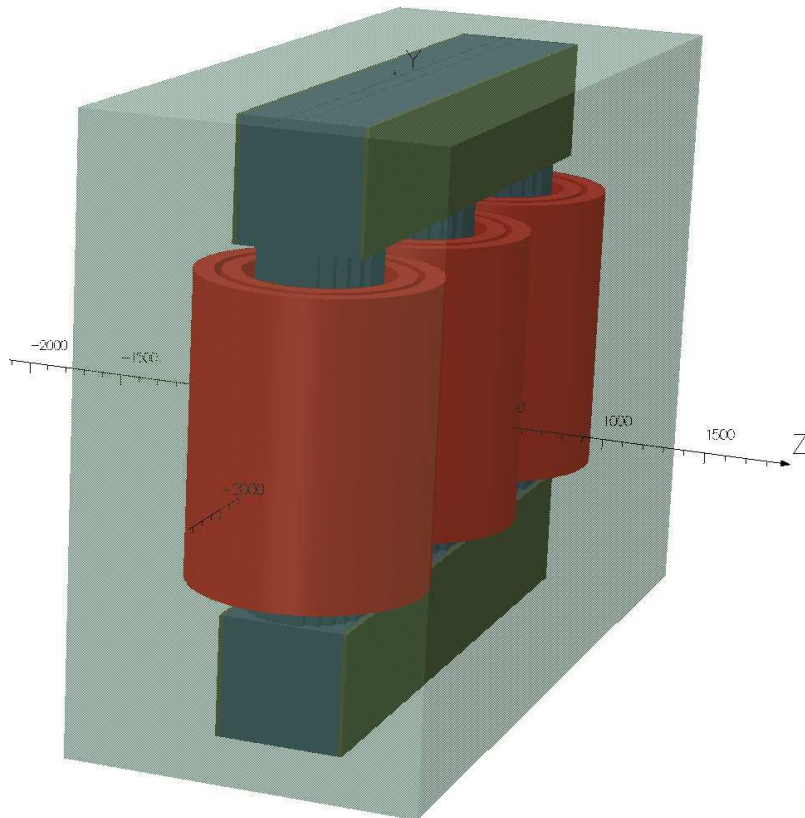
Pro výpočet přídatných ztrát v konstrukčních částech transformátoru byl použit MKP software Opera 3D v14. Software Opera 3D je tvořen několika samostatnými výpočetními moduly pro řešení problematiky elektromagnetických polí. Pro řešení časově proměnného elektromagnetického pole a výpočet vřívých proudů je v OPERA 3D určen výpočetní modul ELEKTRA. Tvorba geometrie, materiálové charakteristiky, okrajové podmínky, generování výpočetní sítě a příprava výpočtové databáze byla realizována v moderním prostředí OPERA 3D - Modeller. Výsledky výpočtu jsou v OPERA 3D prezentovány v prostředí Post-processoru, který poskytuje dostatečné nástroje pro kvalitní vyhodnocení řešeného problému.

Výpočet přídatných ztrát ve stahovacích deskách a nádobě transformátoru je vypracován pro distribuční transformátor 40 MVA, 110/23 kV.



Opera

Obr. 6.1 Základní část modelu, magnetický obvod a cívky



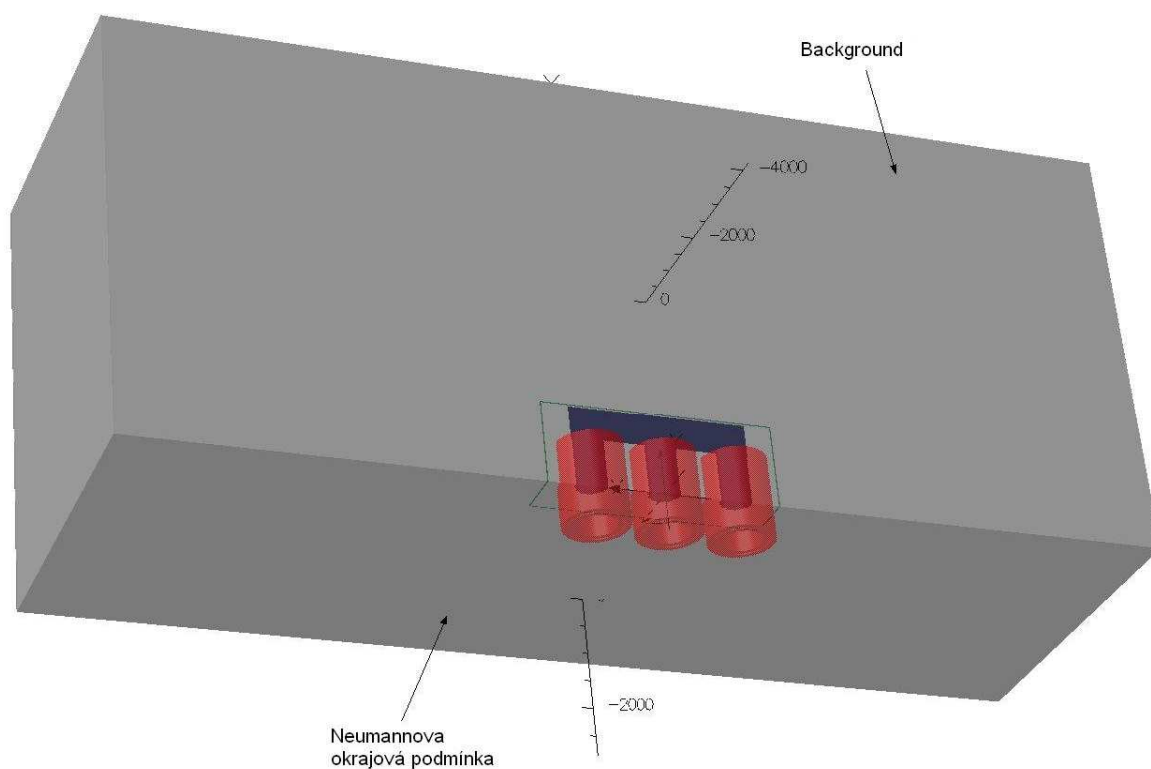
Opera

Obr. 6.2 Model se stahovacími deskami a nádobou

6.1.1 Okrajové podmínky

Pro výpočet lze využít symetrie geometrické i elektromagnetické, čímž dojde ke zmenšení výpočetního prostoru, což vede ke zkrácení času výpočtu. Výpočet elektromagnetického pole transformátoru byl modelován v jedné čtvrtině. (viz. obr. 6.3). V řezu a na okrajích řešeného pole musejí být zadány okrajové podmínky.

V rovině XZ byla definována Neumannova okrajová podmínka ($\frac{dA}{dn} = 0$, ekvipotenciály vektorového potenciálu A jsou kolmé k hranici). Na stěnách okolního prostředí a v rovině XY je použita Dirichletova okrajová podmínka (ekvipotenciály A jsou tangenciální k hranici).



Opera

Obr. 6.3 Definice okrajových podmínek

6.1.2 Definice použitých materiálů

<i>Jádro</i>	orientované transformátorové plechy válcované za studena EO 9, nelin. B-H charakteristika
<i>Konstr. části</i>	nádoba i stahovací desky o tloušťce 20 mm, magnetické, nelin. B-H charakteristika, měrná vodivost 5 MS/m pro 20°C
<i>Vinutí</i>	měď, relativní perm. $\mu_r = 1$, měrná vodivost 56 MS/m pro 20°C
<i>Olej</i>	uvnitř transformátorové nádoby, relativní permeabilita $\mu_r = 1$
<i>Vzduch</i>	okolní prostředí, relativní perm. $\mu_r = 1$

6.1.3 Stanovení elektrické vodivosti konstr. částí

Pro výpočet byly stanoveny elektrické vodivosti konstrukčních částí transformátoru pro předpokládané provozní teploty: 120°C pro stahovací desky, resp. 100°C pro nádobu. Měrná elektrická vodivost, resp. měrný elektrický odpor se v závislosti na teplotě mění dle vztahu:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) , \text{ kde teplotní koeficient odporu pro železo je: } \alpha = 0,006 \text{ [K}^{-1}\text{]}$$

Pak tedy:

Nádoba:

$$\rho_{100^\circ} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot (1 + 0,006 \cdot (100 - 20)) = 2,96 \cdot 10^{-7} \text{ [\Omega/m]} \rightarrow \underline{\underline{\gamma_{100^\circ} = 3,4 \cdot 10^6 \text{ [S/m]}}}$$

Stahovací desky:

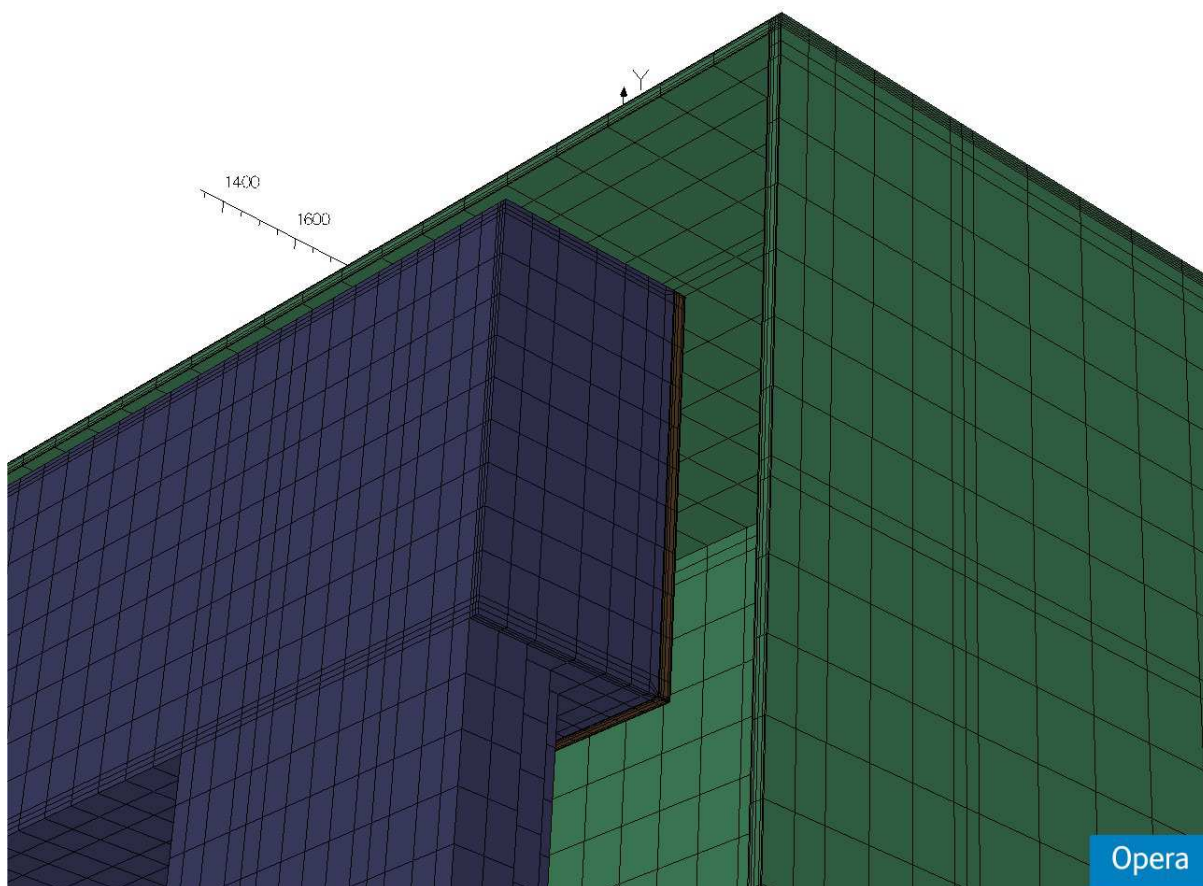
$$\rho_{120^\circ} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot (1 + 0,006 \cdot (120 - 20)) = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ [\Omega/m]} \rightarrow \underline{\underline{\gamma_{120^\circ} = 3,1 \cdot 10^6 \text{ [S/m]}}}$$

6.1.4 Výpočet hloubky vniku pro nádobu a stahovací desky

Pro správné nastavení sítě v konstrukčních částech transformátoru, kde budou počítány vířivé proudy resp. ztráty jimi způsobené, je třeba znát hloubku vniku materiálu:

Výpočet předpokládané hloubky vniku:

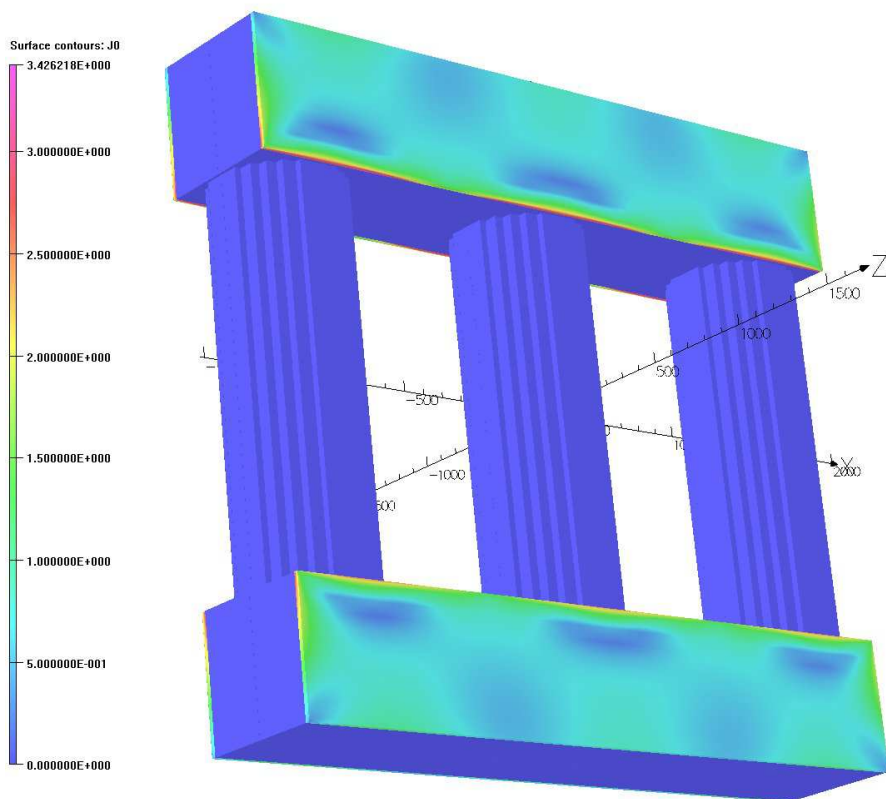
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \nu \cdot \mu}} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000}} = 1,3 \text{ [mm]}$$



Obr. 6.4 Síť modelu

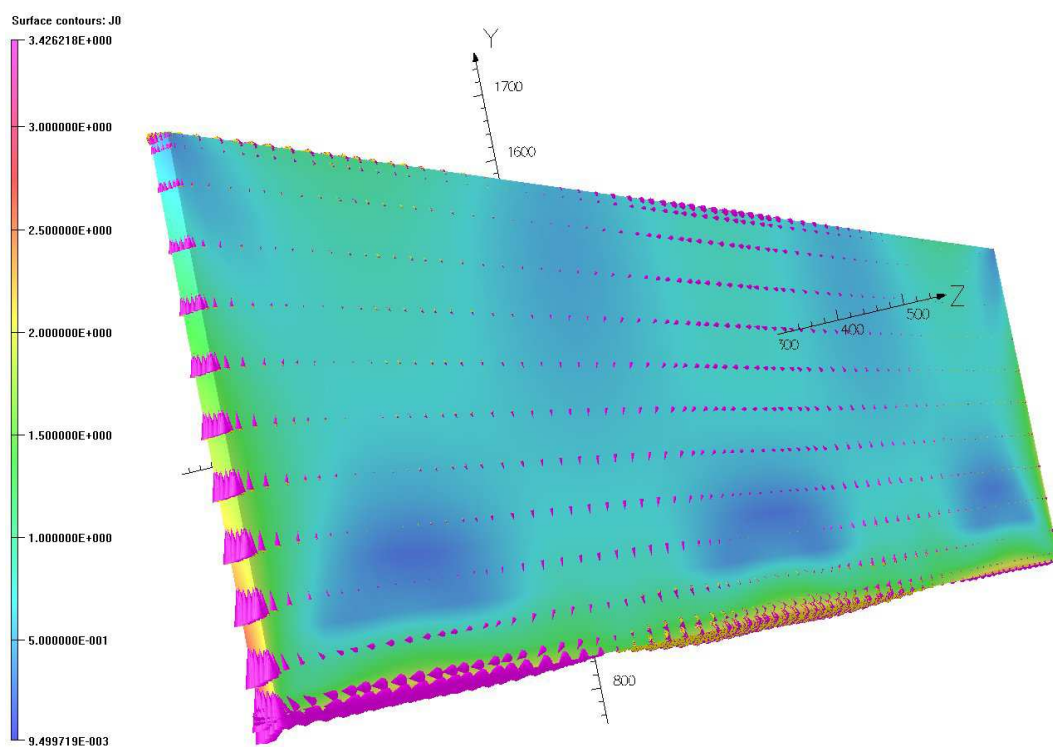
6.2 MKP - výpočet přídatných ztrát

Výpočet přídatných ztrát ve stahovacích deskách a nádobě transformátoru je proveden pro stav transformátoru nakrátko. Výsledky harmonické analýzy elektromagnetického pole a vypočtené ztráty jsou patrné z následujících obrázků:



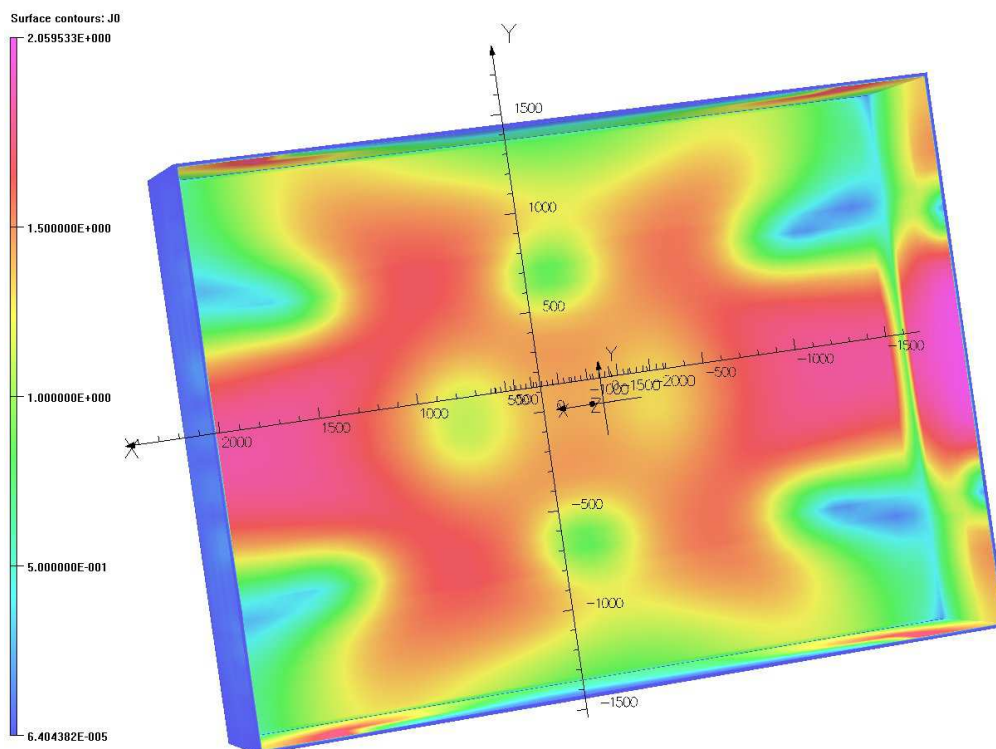
Opera

Obr. 6.5 Rozložení proudové hustoty ve stahovacích deskách



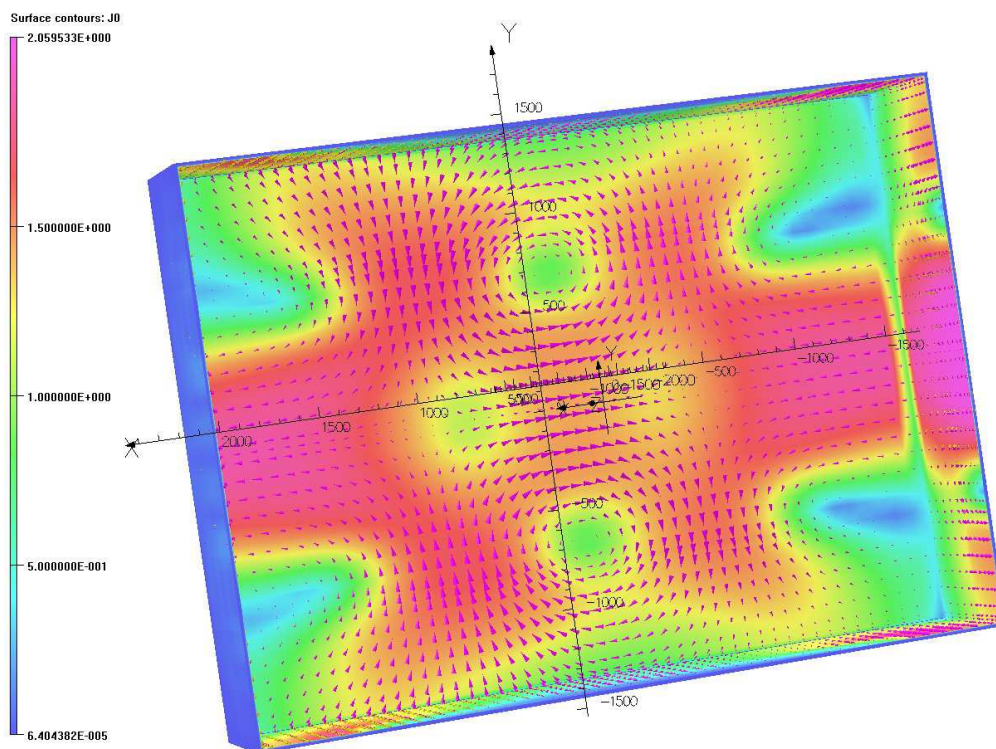
Opera

Obr. 6.6 Vektory proudové hustoty ve stahovací desce



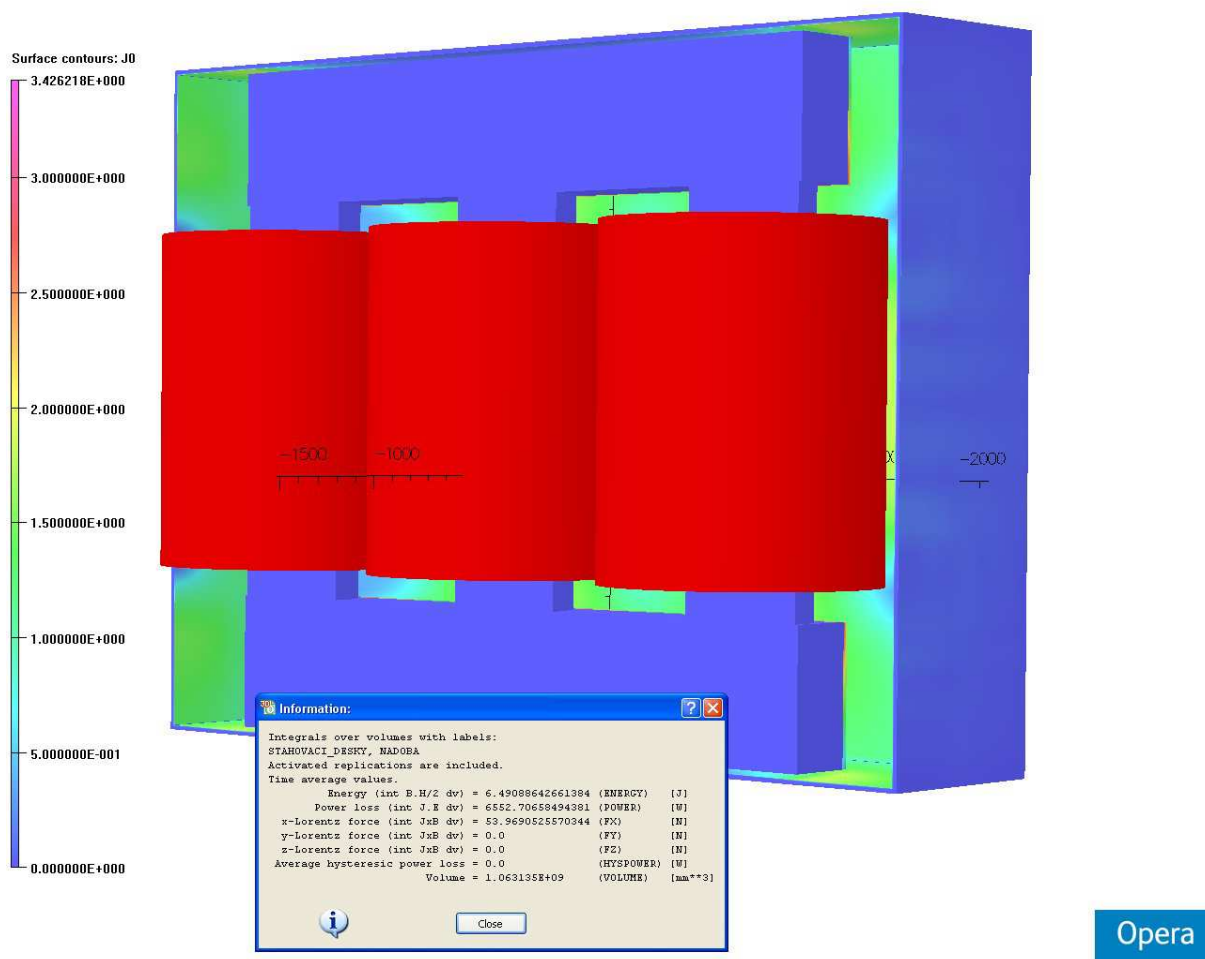
Opera

Obr. 6.7 Rozložení proudové hustoty v nádobě transformátoru



Opera

Obr. 6.8 Vektory proudové hustoty v nádobě transformátoru



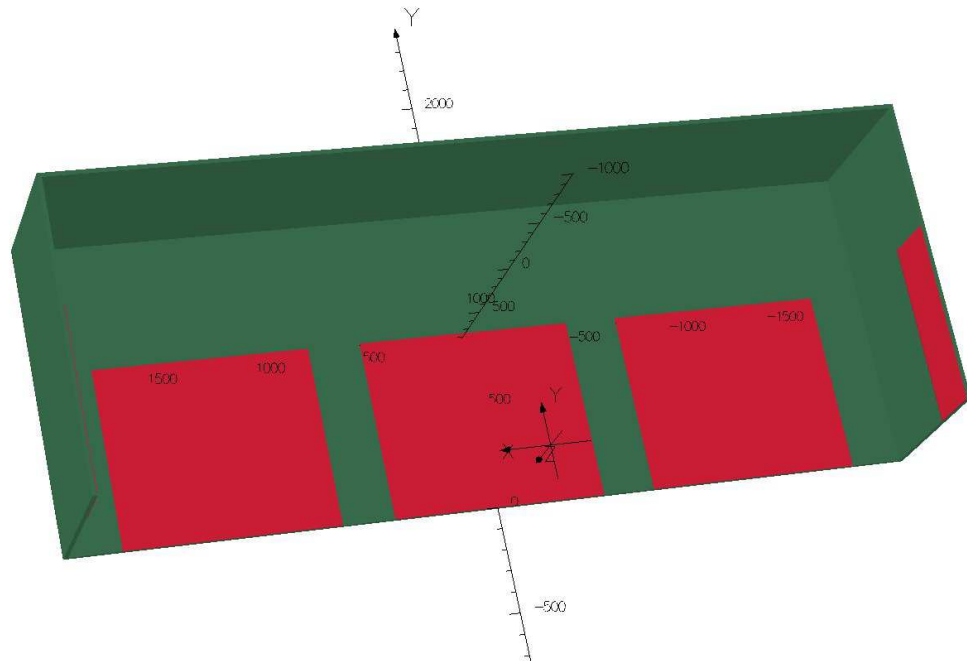
Obr. 6.9 Ztráty ve stahovacích deskách a nádobě transformátoru

Pro výpočet byl použit model tvořený sítí z 231283 elementů a 72056 uzlů. Celkový výpočetní čas byl 7 hodin a 34 minut. Přídavné ztráty v nádobě a stahovacích deskách transformátoru byly spočteny na 6553 W. Dílčí ztráty nádoby jsou 5829 W a stahovacích desek 724 W.

7 Výpočet stínění

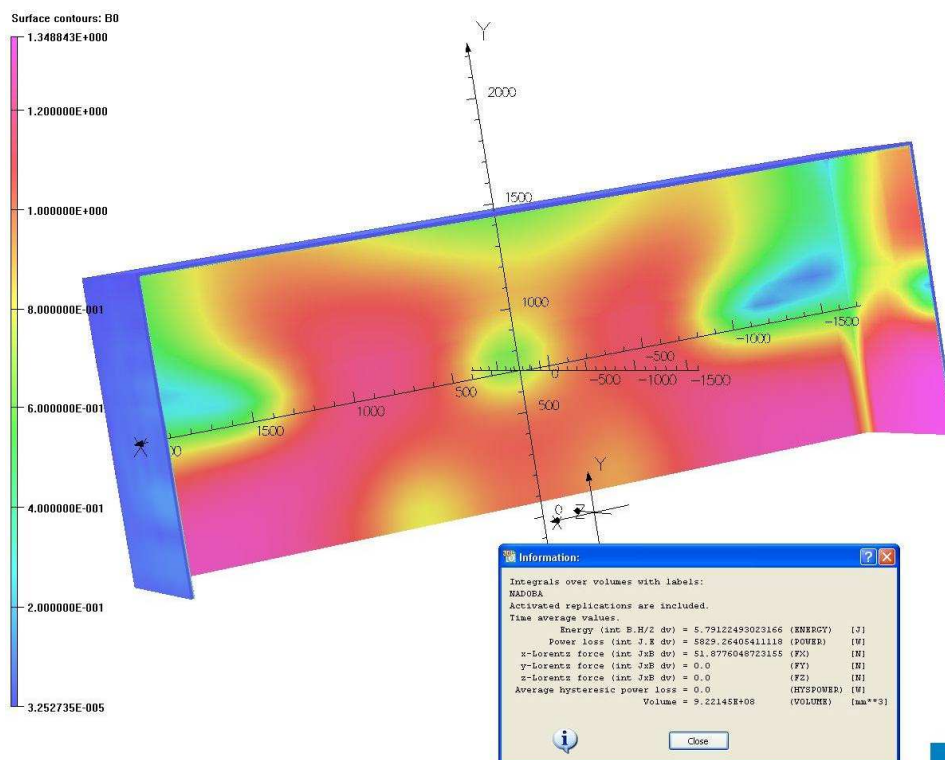
Optimálních rozměrů stínících desek bychom dosáhli využitím analýzy MKP. Proveditelnost takové analýzy (resp. několika pokusných výpočtů) je však časově náročná z hlediska tvorby modelů i výpočetního času. Proto jsme zvolili stínící magnetické desky dle rozměrů vinutí: výška 1700 mm, šířka 1000 mm a tloušťce 2,8 mm.

Magnetické stínění je složené z 5 transformátorových plechů o tloušťce 0,5 mm s činitelem plnění 0.9. Stínění je umístěno před každou fází a také na obě kratší strany nádoby. Materiál magnetického stínění je stejný jako v případě magnetického obvodu transformátoru.



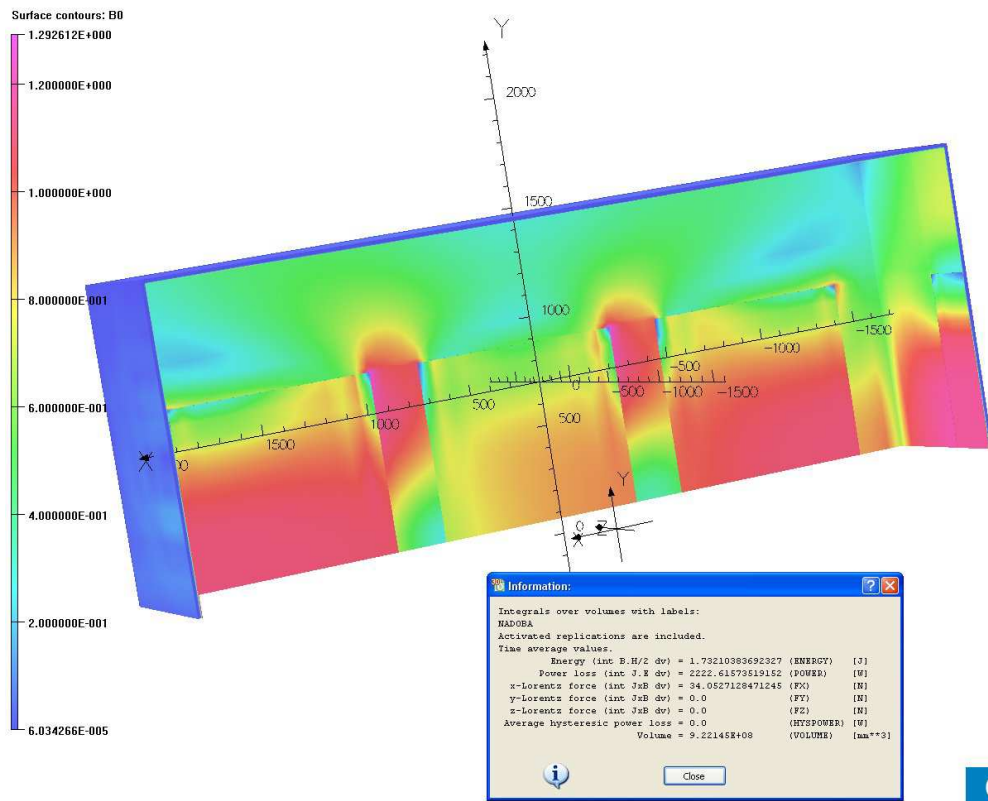
Opera

Obr. 7.1 Geometrie stínění



Opera

Obr. 7.2 Rozložení magnetické indukce v nádobě transformátoru bez stínění



Obr. 7.3 Rozložení magnetické indukce se stíněním

Závěr

Hlavní náplní předkládané diplomové práce je výpočet konstrukčních ztrát v transformátoru o výkonu 40 MVA. K výpočtu časově proměnného elektromagnetického pole byla použita Metoda Konečných Prvků (MKP). Výpočet a analýza trojrozměrného modelu transformátoru byl řešen pomocí softwaru OPERA 3D v14. Výpočet konstrukčních ztrát byl uvažován v nádobě a stahovacích deskách transformátoru, které tvoří největší část přídatných ztrát v konstrukčních částech transformátoru.

Základem výpočtu je geometrický model, kde jsou definovány materiálové vlastnosti, okrajové podmínky a vlastní rozměry transformátoru. Dalším krokem je tvorba výpočetní sítě modelu. Nej hustší síť byla vytvořena v oblasti stahovacích desek a nádoby, kde jsou počítány přídatné ztráty. Přídatné ztráty v nádobě a stahovacích deskách jsou ztráty vířivými proudy vyvolané rozptylovým tokem vinutí transformátoru.

Pro navržený model transformátoru jsou přídatné ztráty v nádobě a stahovacích deskách (tvoří největší část přídatných ztrát v konstrukčních částech) $P_{kk} = 6553$ [W]. U sériově vyráběných transformátorů o výkonu 40 MVA tvoří přídatné ztráty v konstrukčních částech transformátoru 5 až 6% celkových ztrát [10]. Vypočítaná hodnota přídatných ztrát tvoří 4% z celkových ztrát transformátoru. To je dáno geometrickým zjednodušením modelu transformátoru oproti skutečnosti a omezením výpočtu přídatných ztrát jen na nádobu a stahovací desky.

Přídatné ztráty v konstrukčních částech lze omezit vhodně zvoleným magnetickým či elektrickým stíněním. Pro omezení ztrát v nádobě byly navrženy stínící desky tvořené 5 transformátorovými plechy tloušťky 0,5, umístěné na vnitřním obvodu nádoby. Velikost stínících desek (1700×1000 mm) byla zvolena dle rozměrů vinutí. Ztráty vznikající ve stínících deskách jsou jednak hysterézní, které jsou redukovány použitím kvalitních plechů s nízkým ztrátovým číslem a ztráty od vířivých proudů. Ty jsou výrazně omezeny listěným provedením stínících desek.

V modelu je vodivost stínících desek zadána nulová $\gamma = 0$ a nepočítají se zde tedy vířivé proudy a tedy ani ztráty jimi způsobené. Stínící desky jsou pak namodelovány jako kompaktní desky s definovaným koeficientem plnění, kterým je při výpočtu magnetického pole definovaný listěný charakter stínících desek.

Z výše uvedených výsledků simulace (rozložení magnetického pole a snížení ztrát v nádobě z 5829W na 2223W) je patrný stínící efekt magnetických stínících desek. Dalším krokem by bylo vytvoření modelu s reálným provedením stínících desek tj. 5 izolovaných

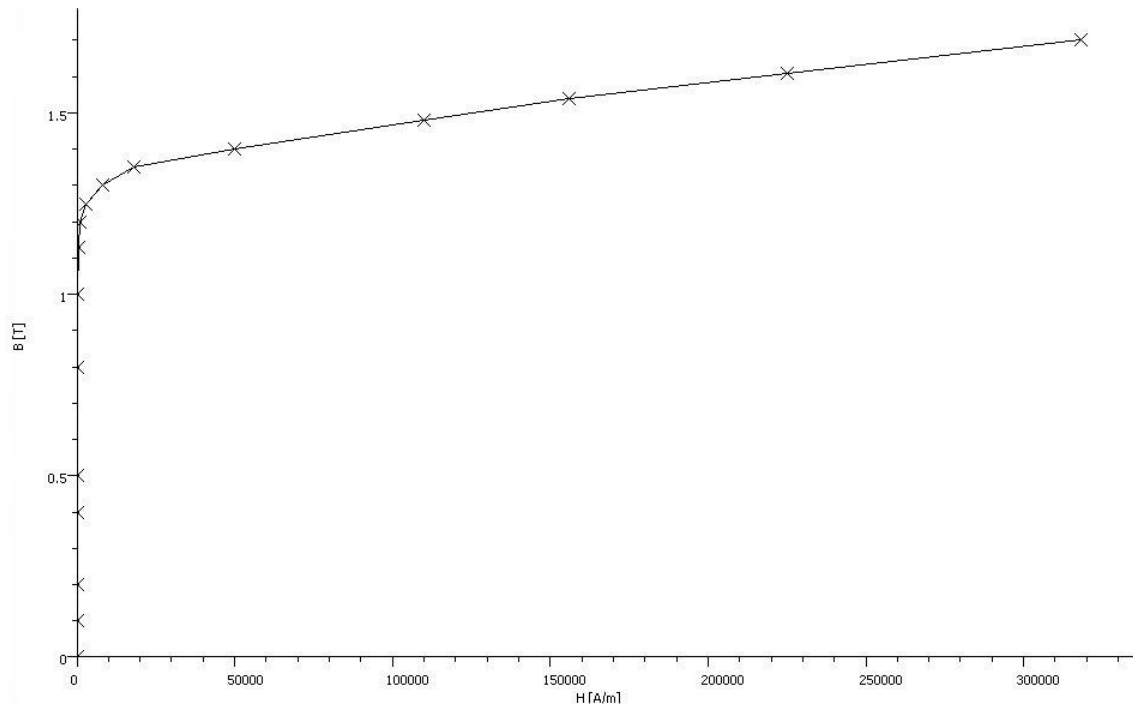
plechů tloušťky 0,5mm a výpočtem vířivých proudů v nich. Z důvodu časové náročnosti vytvoření takového modelu (sítě, výpočetní čas ...) nebylo toto řešení provedeno.

Seznam literatury a informačních zdrojů

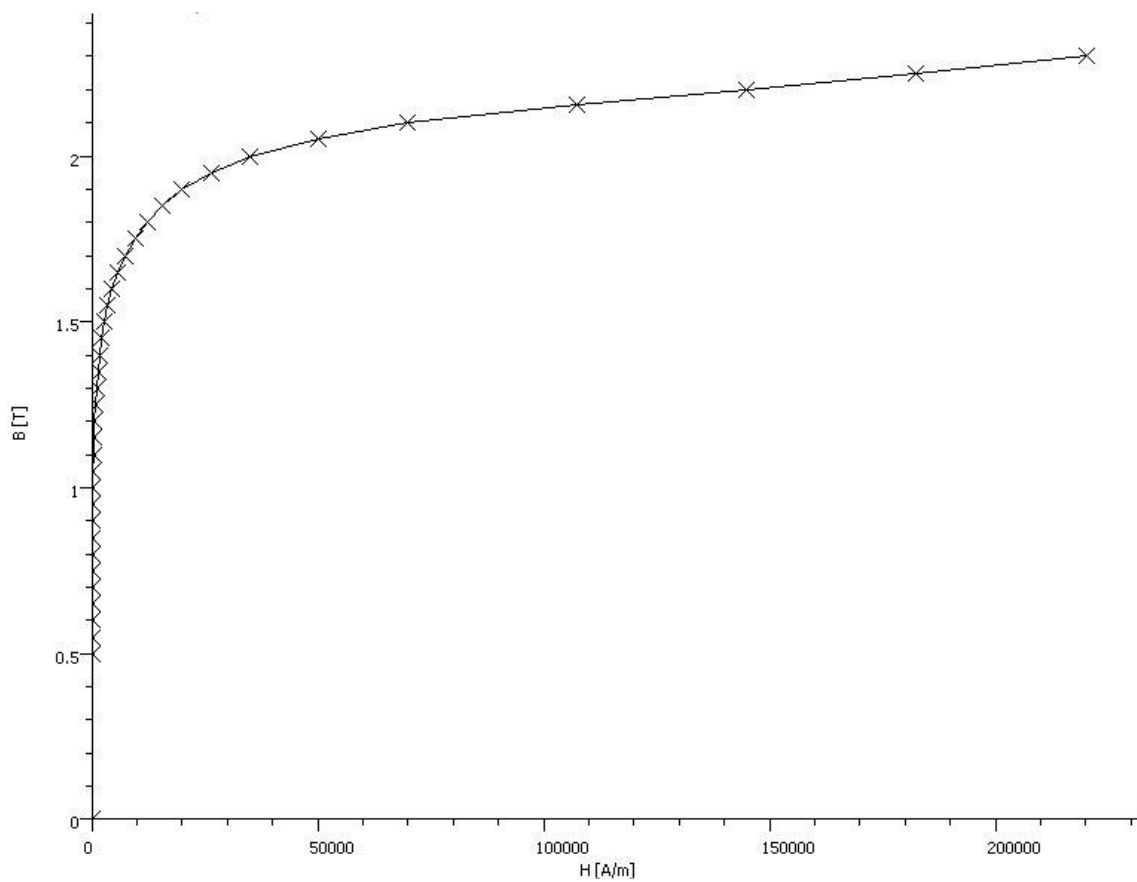
- [1] KULKARNI, S.V. *Transformer engineering, Design and practise*. 1. vyd. M. Dekker: 2004. 467 s. ISBN 0-8247-5653-3
- [2] BAŠTA, Jan, CHLÁDEK Jaroslav, MAYER, Imrich. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968. 584 s.
- [3] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 1: Úvod-transformátory*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1980. 388 s.
- [4] CIGÁNEK, Ladislav. *Elektrické stroje*. 6., přeprac. vyd. Praha: Technicko-vědecké vydavatelství, 1951. 816 s.
- [5] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. 221 s. ISBN 80-7082-221-X.
- [6] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 2., uprav. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. 344 s. ISBN 80-7082-412-3
- [7] Vector Fields Limited. *Opera 3D User Guide*. England, 2003
- [8] KINDL, Vladimír. *Modelování polí v elektrických strojích*. Podpůrný text pro výuku KEV/MPS. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. 89 s.
- [9] ŽARKO, Damir a MALJKOVIC, Zlatko a ŠTEFAN, Stjepan. *Calculation of losses in the core Caps of a transformer using 3-D element method*. SAEM 06 Ohrid, Macedonia. : 2006. 4 s.
- [10] KARNET, Václav. *Přídavné ztráty v konstrukčních částech transformátoru*. Diplomová práce. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009.

Přílohy

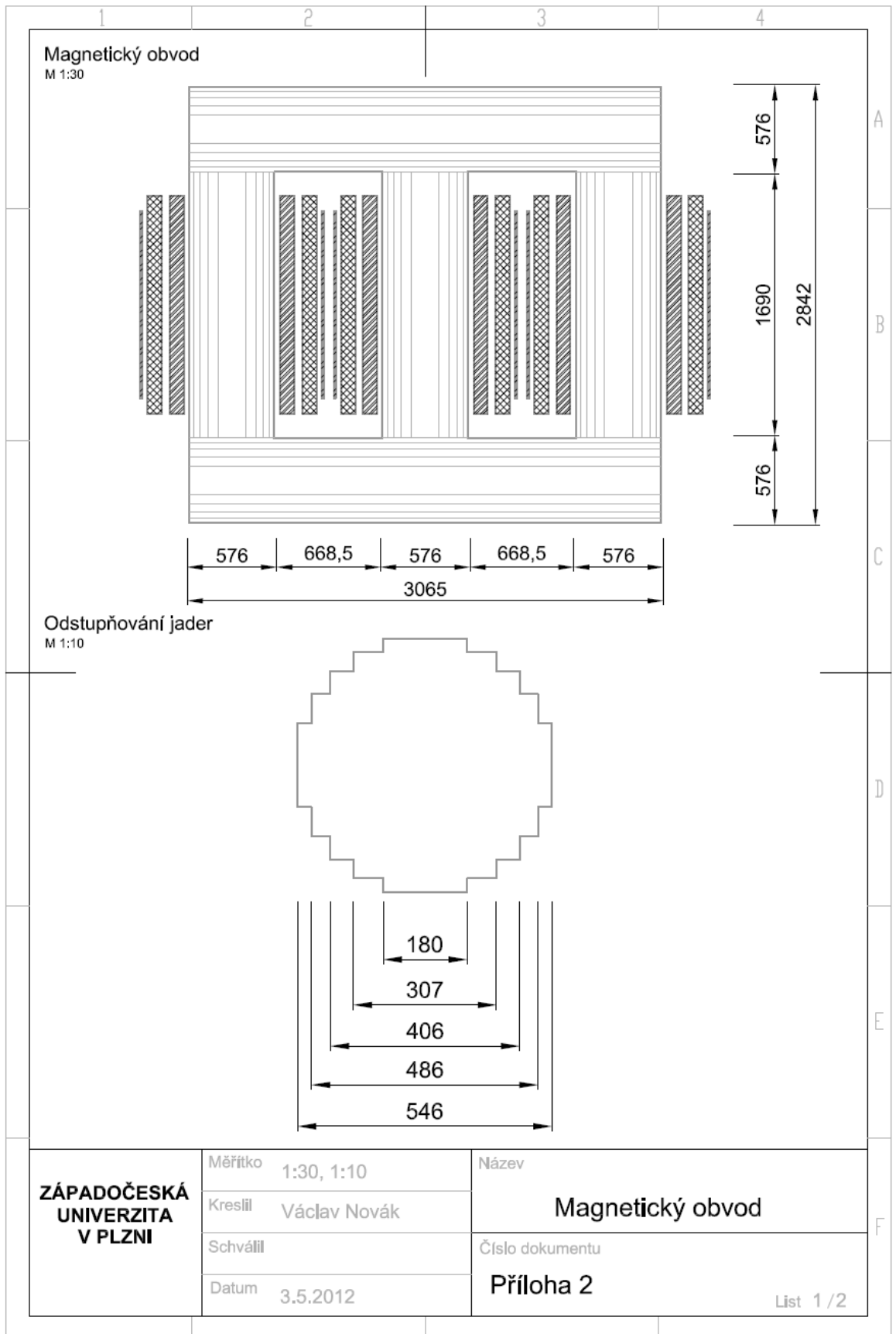
Příloha 1 - Magnetizační charakteristiky použitých materiálů

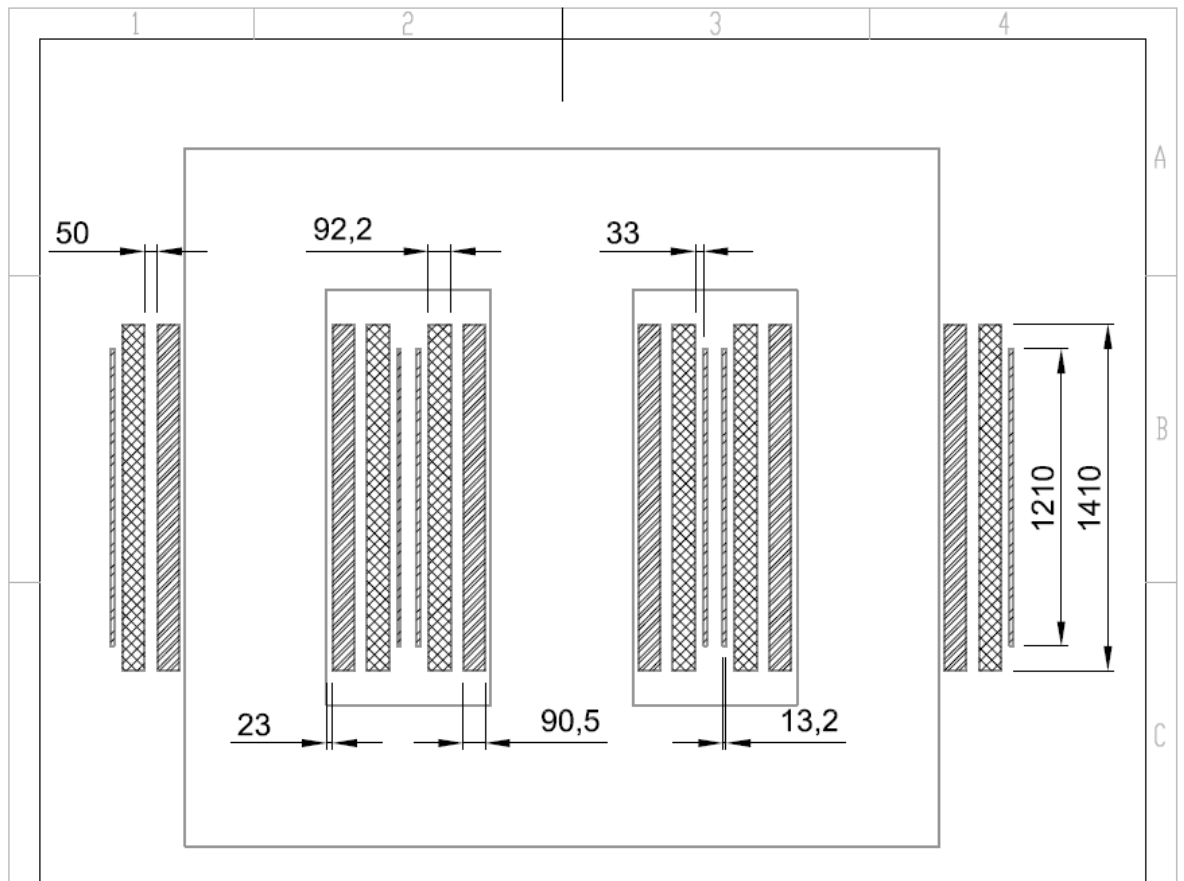


Magnetizační charakteristika magnetického obvodu (plechy EO9)

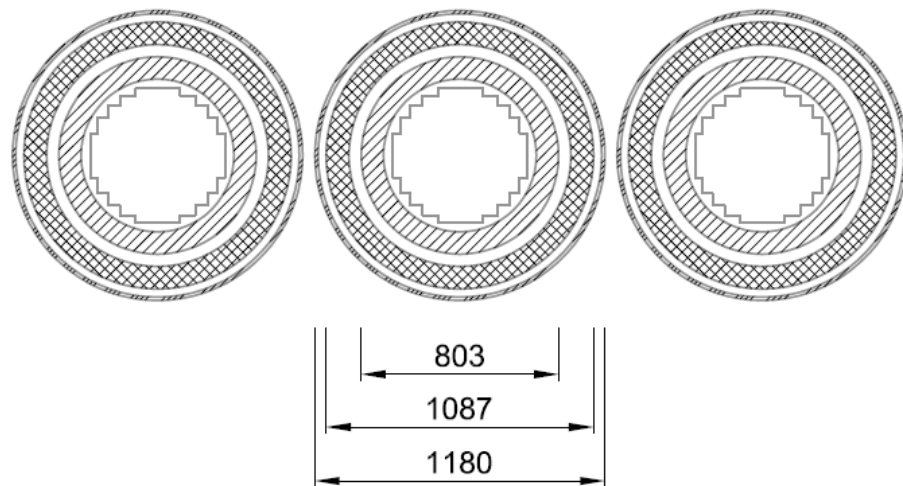


Magnetizační charakteristika konstrukčních částí (železo)





Půdorys vinutí



ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI	Měřítko	1:25	Název	Výkres vinutí
	Kreslil	Václav Novák	Číslo dokumentu	
	Schválil		Příloha 3	List 2 / 2
	Datum	3.5.2012		

Evidenční list

Souhlasím s tím, aby moje diplomová práce byla půjčována k prezenčnímu studiu v Univerzitní knihovně ZČU v Plzni.

Datum:

Podpis:

Uživatel stvrzuje svým čitelným podpisem, že tuto diplomovou/bakalářskou práci použil ke studijním účelům a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

Jméno	Fakulta/katedra	Datum	Podpis