

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR PROUDU 12kV, 4000//5/5A

DIPLOMOVÁ PRÁCE

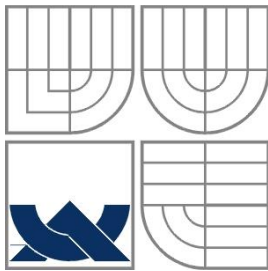
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

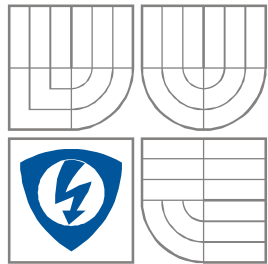
Bc. DAVID ŠUMBERÁK

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR PROUDU 12kV, 4000//5/5A

INSTRUMENT CURRENT TRANSFORMER 12kV, 4000//5/5A

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

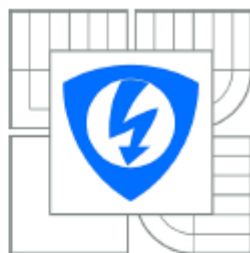
Bc. DAVID ŠUMBERÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ DOSTÁL

BRNO, 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. David Šumberák

ID: 106828

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Přístrojový transformátor proudu 12kV, 4000//5/5A

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte rozbor funkce měřicího a jisticího transformátoru proudu v energetických sítích.
2. Analyzujte fyzikální podstaty přístrojového transformátoru proudu, fázorová chyba trans a její složky.
3. Navrhněte základní konstrukční části transformátoru: měřicí jádro s vinutím 15VA, Tp 0,5; FS10, jisticí jádro s vinutím 15VA; 5P20, primární vodič pro jmenovitý krátkodobý proud $I_{th} = 50\text{kA}$.
4. Vytvořte model transformátoru a analyzujte získané poznatky z elektromagnetických simulací.
5. Proveďte částečnou typovou zkoušku navrhovaného transformátoru a zjištěné hodnoty porovnejte s hodnotami z numerického výpočtu a simulace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Kopeček, Dvořák: Přístrojové transformátory, SNTL 1964
- [2] Král, Vaněk: Elektromagnetické přístroje, VUT 1983
- [3] ČSN 60044-1 - Přístrojové transformátory - Část 1: Transformátory proudu
- [4] Gross a kolektiv: Laboratorní a numerická cvičení z el. přístrojů

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 28.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Dostál

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá popisem, vývojovým návrhem a výrobou přístrojového transformátoru proudu v jednozávitovém průchozím provedení s převodem 4000//5/5 A. V práci je postupně zpracován teoretický rozbor, numerický výpočet, vývojový 3D model, příslušné simulace a typová zkouška zadaného transformátoru. Je zde tedy popsán kompletní cyklus výroby přístrojového transformátoru proudu od jeho vývoje až po výrobu. Vývoj a výroba transformátoru probíhala ve spolupráci s firmou zabývající se vývojem, výrobou a prodejem přístrojových transformátorů na českém i zahraničním trhu - KPB Intra s.r.o.

Abstract

This master's thesis describes the development proposal and production of instrument current transformer in one turn primary winding with 4000//5/5 A transfer. The thesis involves a theoretical analysis, a numerical calculation, a developmental 3D model, corresponding simulations and a standard testing of the transformers. There is a complete written description of measuring current transformer cycle from the development to the production. The transformer development and production works were collaborated with the company KPB Intra s.r.o. The company engages in development, production and sale of these kinds of instrument transformers in the Czech Republic and foreign markets.

Klíčová slova

přístrojový transformátor proudu ; měřicí transformátor proudu ; jisticí transformátor proudu ; chyba proudu ; chyba úhlu ; nadproudové číslo ; nadproudový činitel

Keywords

instrument current transformer ; measuring current transformer ; protective current transformer ; current error ; phase displacement ; instrument security factor ; accuracy limit factor

Bibliografická citace

ŠUMBERÁK, D. *Přístrojový transformátor proudu 12kV, 4000//5/5A*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 94 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lukáš Dostál.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR PROUDU 12kV, 4000//5/5A jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

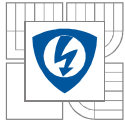
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. LUKÁŠI DOSTÁLOVI a Ing. JAROMÍRU VAŇKOVI, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

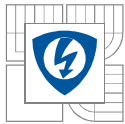
V Brně dne

Podpis autora

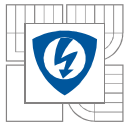


Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
ÚVOD	15
1 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU DLE NORMY	17
1.1 ROZDĚLENÍ.....	17
1.2 DŮLEŽITÉ NÁZVOSLOVÍ.....	18
1.2.1 DODATEČNÉ DEFINICE PRO MĚŘICÍ TRANSFORMÁTORY PROUDU	20
1.2.2 DODATEČNÉ DEFINICE PRO JISTICÍ TRANSFORMÁTORY PROUDU	20
1.3 NORMALIZOVANÉ HODNOTY.....	20
1.3.1 NORMALIZOVANÉ HODNOTY PRO MĚŘICÍ TRANSFORMÁTORY PROUDU	20
1.3.2 NORMALIZOVANÉ HODNOTY PRO JISTICÍ TRANSFORMÁTORY PROUDU	22
1.4 FUNKCE TRANSFORMÁTORU PROUDU	22
1.4.1 TRANSFORMÁTOR PROUDU V PRACOVNÍ OBLASTI A PŘI ZKRATECH	23
2 TEORIE PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU.....	25
2.1 CHYBA TRANSFORMÁTORU PROUDU	30
2.2 SOUVISLOST BŘEMENE, NADPROUDOVÉHO ČÍSLA A TŘÍDY PŘESNOSTI	31
2.3 PROVEDENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU	32
2.3.1 MAGNETICKÉ OBVODY A SEKUNDÁRNÍ VINUTÍ TRANSFORMÁTORŮ PROUDU	32
2.3.2 PRIMÁRNÍ VINUTÍ.....	33
2.3.3 EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE.....	34
2.4 POSTUP PŘI NÁVRHU TRANSFORMÁTORU PROUDU.....	34
3 NÁVRH PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU PROUDU.....	42
4 3D MODEL TRANSFORMÁTORU PROUDU.....	55
4.1 PRIMÁRNÍ VODIČ.....	55
4.2 MAGNETICKÉ JÁDRO	56
4.3 OBRUČ PRO UCHYCENÍ MAGNETICKÉHO JÁDRA	56
4.4 EPOXIDOVÝ ODLITEK	57
4.5 ZÁKLADOVÁ DESKA A ŠABLONA PRIMÁRNÍCH VODIČŮ.....	59
4.6 SVORKOVNICE.....	59
4.7 SESTAVA 3D MODELU TRANSFORMÁTORU.....	59
5 ELEKTROSTATICKÁ SIMULACE V PROGRAMU FEMM	62
5.1 TRANSFORMÁTOR BEZ STÍNĚNÍ SE ZALÉVACÍ MATICÍ	64
5.2 TRANSFORMÁTOR BEZ STÍNĚNÍ A BEZ ZALÉVACÍ MATICE.....	66
5.3 TRANSFORMÁTOR SE STÍNĚNÍM A ZALÉVACÍ MATICÍ	68
5.4 TRANSFORMÁTOR SE STÍNĚNÍM BEZ ZALÉVACÍ MATICE	69

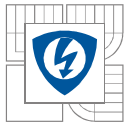


6 ČÁSTEČNÁ TYPOVÁ ZKOUŠKA A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	72
6.1 TYPOVÁ ZKOUŠKA PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU PROUDU	72
6.1.1 ZKOUŠKA KRÁTKODOBÝMI PROUDY	72
6.1.2 OTEPLOVACÍ ZKOUŠKA	72
6.1.3 ZKOUŠKA PRIMÁRNÍHO VINUTÍ IMPULSNÍM NAPĚTÍM	73
6.1.4 IZOLAČNÍ ZKOUŠKA SEKUNDÁRNÍCH VINUTÍ STŘÍDAVÝM NAPĚTÍM PRŮMYSLOVÉHO KMITOČTU	73
6.1.5 PŘEPĚŤOVÁ ZKOUŠKA MEZIZÁVITOVÉ IZOLACE	74
6.1.6 ZKOUŠKA PRIMÁRNÍHO VINUTÍ STŘÍDAVÝM NAPĚTÍM PRŮMYSLOVÉHO KMITOČTU.....	74
6.1.7 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	74
6.1.8 KONTROLA ZNAČENÍ SPRÁVNOSTI SVOREK.....	74
6.1.9 MĚŘENÍ CHYB	74
6.1.10 MĚŘENÍ NADPROUDOVÉHO ČÍSLA A CELKOVÉ CHYBY	77
7 ZÁVĚR.....	78
LITERATURA	80
PŘÍLOHY	81
7.1 PŘÍLOHA 1 – URČENÍ PRŮŘEZU PRIMÁRNÍHO VODIČE.....	81
7.2 PŘÍLOHA 2 – MAGNETIZAČNÍ CHARAKTERISTIKA NC	82
7.3 PŘÍLOHA 2 – MĚRNÉ ZTRÁTY PŘI MAGNETICKÉ INDUKCI NC.....	83
7.4 PŘÍLOHA 3 – PROTOKOL O TYPOVÉ ZKOUŠCE	84
7.5 PŘÍLOHA 4 – KATALOGOVÝ LIST CTT 12.....	92
7.6 PŘÍLOHA 5 – FOTOGRAFIE PROTOTYPU CTT 12.....	94



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Zapojení přístrojového transformátoru proudu do sítě.....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2: Průchozí transformátor proudu.....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 3: Podpěrný transformátor proudu.....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 4: Průchodkový transformátor proudu.....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 5: Třída přesnosti 0,2S a 0,5 dle tabulek 1 a 2.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 6: Přístrojový transformátor proudu – princip [9]</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 7: Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu [9]</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 8: Fázorový diagram přístrojového transformátoru proudu [9].....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 9: Magnetizační charakteristika feromagnetického materiálu.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 10: Náhradní schéma transformátoru</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 11: Fázorový diagram - znázornění chyby transformátoru proudu</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 12: Fázorový diagram transformátoru proudu pro dvě různé zátěže.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 13: Diagram chyb - podstata</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 14: Komplexní diagram chyb.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 15: Magnetizační charakteristiky různých materiálů</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 16: Řez transformátoru proudu bez primárního vodiče</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 17: Řez transformátorem proudu 2.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 18: Předběžný průřez měřicího jádra transformátoru</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 19: Schématické zobrazení polohy primárního vodiče v transformátoru.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 20: Fázorový diagram – pro výpočet.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 21: Vypočtené chyby proudu měřicího jádra.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 22: Vypočtené chyby úhlu měřicího jádra</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 23: Předběžný průřez jisticího jádra transformátoru.....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 24: Vypočtené chyby proudu jisticího jádra</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 25: Vypočtené chyby úhlu jisticího jádra</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 26: Princip SolidWorks.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 27: Primární pas - skica</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 28: Primární pas - 3D.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 29: Magnetické jádro - skica</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 30: Magnetické jádro – 3D.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 31: Obruč pro uchycení mag. jádra - skica</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 32: Obruč pro uchycení mag. jádra–3D.....</i>	<i>56</i>

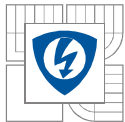


<i>Obrázek 33: Část odlitku z epoxidu 1</i>	57
<i>Obrázek 34: Část odlitku z epoxidu 2</i>	57
<i>Obrázek 35: Část odlitku z epoxidu 3</i>	57
<i>Obrázek 36: Část odlitku z epoxidu 4</i>	57
<i>Obrázek 37: Část odlitku z epoxidu 5</i>	58
<i>Obrázek 38: Část odlitku z epoxidu 6</i>	58
<i>Obrázek 39: Kompletní epoxidový odlitek</i>	58
<i>Obrázek 40: Základová deska 3D</i>	59
<i>Obrázek 41: Šablona primárních vodičů 3D</i>	59
<i>Obrázek 42: Svorkovnice 3D</i>	59
<i>Obrázek 43: Funkční části transformátoru</i>	60
<i>Obrázek 44: Řez transformátorem</i>	60
<i>Obrázek 45: Průhledný pohled na transformátor</i>	60
<i>Obrázek 46: Přístrojový transformátor proudu CTT 12</i>	61
<i>Obrázek 47: FEMM 1</i>	62
<i>Obrázek 48: FEMM 2</i>	63
<i>Obrázek 49: Transformátor bez stínění - rozložení napětí 1</i>	64
<i>Obrázek 50: Transformátor bez stínění - intenzita elektr. pole 1</i>	65
<i>Obrázek 51: Transformátor bez stínění - rozložení napětí 2</i>	66
<i>Obrázek 52: Transformátor bez stínění - intenzita elektr. pole 1</i>	67
<i>Obrázek 53: Transformátor se stíněním - rozložení napětí 1</i>	68
<i>Obrázek 54: Transformátor se stíněním - intenzita elektr. pole 1</i>	69
<i>Obrázek 55: Transformátor se stíněním - rozložení napětí 2</i>	70
<i>Obrázek 56: Transformátor se stíněním - intenzita elektr. pole 2</i>	71
<i>Obrázek 57: Chyba proudu měřicího jádra - srovnání</i>	75
<i>Obrázek 58: Chyba úhlu měřicího jádra - srovnání</i>	75
<i>Obrázek 59: Chyba proudu jisticího jádra - srovnání</i>	76
<i>Obrázek 60: Chyba úhlu jisticího jádra - srovnání</i>	76



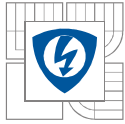
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Dovolené chyby proudu a chyby úhlu pro měřicí transformátory proudu [3]</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 2: Dovolené chyby proudu a chyby úhlu pro měřicí transformátory proudu pro zvláštní použití [3]</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 3: Dovolené chyby proudu pro měřicí transformátory proudu (třídy 3 a 5) [3]</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 4: Dovolené chyby proudu a chyby úhlu pro jisticí transformátory proudu [3].....</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 5: Magnetické materiály pro jádra přístrojových transformátorů proudu</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 6: Velikost izolačního předělu.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 7: Vypočtené chyby proudu a úhlu měřicího jádra</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 8: Vypočtené chyby proudu a úhlu pro jisticí jádra.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 9: Zkušební napětí pro transformátory do sítě 10 kV [3]</i>	<i>73</i>

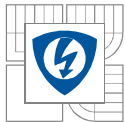


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis	Jednotka
ALF	Nadproudový činitel	[-]
B_n	Jmenovitá magnetická indukce	[T]
B_m	Indukce nasycení	[T]
B	Šířka zapouzdřeného jádra	[mm]
b	Šířka jádra	[mm]
D_{e1}	Průměr průchozího otvoru transformátoru	[mm]
D_{2i}'	Nejmenší možný vnitřní průměr magnetického obvodu s navinutým sekundárním vinutím	[mm]
d_{2i}	Průměr sekundárního vodiče	[mm]
D_{3i}'	Předběžný vnitřní průměr pouzdra magnetického obvodu	[mm]
D_i'	Předběžný vnitřní průměr magnetického obvodu	[mm]
D_i	Vnitřní průměr magnetického obvodu	[mm]
D_{2i}	Vnitřní průměr magnetického obvodu s navinutým sekundárním vinutím	[mm]
D_{3i}	Vnitřní průměr pouzdra magnetického obvodu	[mm]
D_e	Vnější průměr magnetického obvodu	[mm]
D	Střední průměr magnetického obvodu	[mm]
E	Intenzita elektrického pole	[kV/mm]
FS	Nadproudové číslo	[-]
f	Frekvence	[Hz]
H	Výška zapouzdřeného jádra	[mm]
H_0	Celková intenzita magnetického pole	[A/m]
H_g	Činná složka intenzity magnetického pole	[A/m]
I_{1N}	Jmenovitý primární proud	[A]
I_{2N}	Jmenovitý sekundární proud	[A]
i_p	Okamžitá hodnota primárního proudu	[A]
i_s	Okamžitá hodnota sekundárního proudu	[A]
I_{1m}	Krajní provozovací proud	[A]
I_{th}	Jmenovitý krátkodobý tepelný proud	[kA]
I_{dyn}	Jmenovitý dynamický proud	[kA]



I_{10}	Budící proud	[A]
I_{20}	Celková chyba proudu přepočítaná na počet sekundárních závitů	[%]
I_2'	Sekundární proud přepočítaný na počet závitů primárního vinutí	[A]
IPL	Jmenovitý primární nadproud	[A]
k_i	Jmenovitý převod transformátoru proudu	[-]
l_m	Délka střední siločáry magnetického obvodu	[mm]
l_2	Střední délka závitů sekundárního vinutí	[mm]
N_1	Počet primárních závitů	[-]
N_2	Počet sekundárních závitů	[-]
n	Nadproudové číslo (obecně)	[-]
N	Železné jádro kvality „normal“	[-]
N_c	Nanocrystal	[-]
P_N	Jmenovitá zátěž	[VA]
P_y	Permalloy	[-]
P_i	Vnitřní zátěž transformátoru při jmenovitém proudu	[VA]
P_ϵ	Činná složka jmenovité zátěže transformátoru	[VA]
P_j	Jalová složka jmenovité zátěže transformátoru	[VA]
P_c	Celková zátěž transformátoru	[VA]
p	Měrné ztráty	[W/kg]
R	Činná složka jmenovitého břemene	[Ω]
R_2	Odpor sekundárního vinutí	[Ω]
S_1	Průřez primárního vodiče	[mm ²]
S_2	Průřez sekundárního vodiče	[mm ²]
s	Vzdálenost stěny magnetického jádra od stěny pouzdra	[mm]
$SuEx$	Železné jádro kvality „super – extra“	[-]
T	Perioda	[s]
t_i	Tloušťka izolačního předělu	[mm]
t_2	Výška sekundárního vinutí	[mm]
U_{10}	Indukované napětí	[V]
U_{20}	Indukované napětí	[V]
U_m	Magnetické napětí	[A]
Z	Vnější břemeno	[Ω]

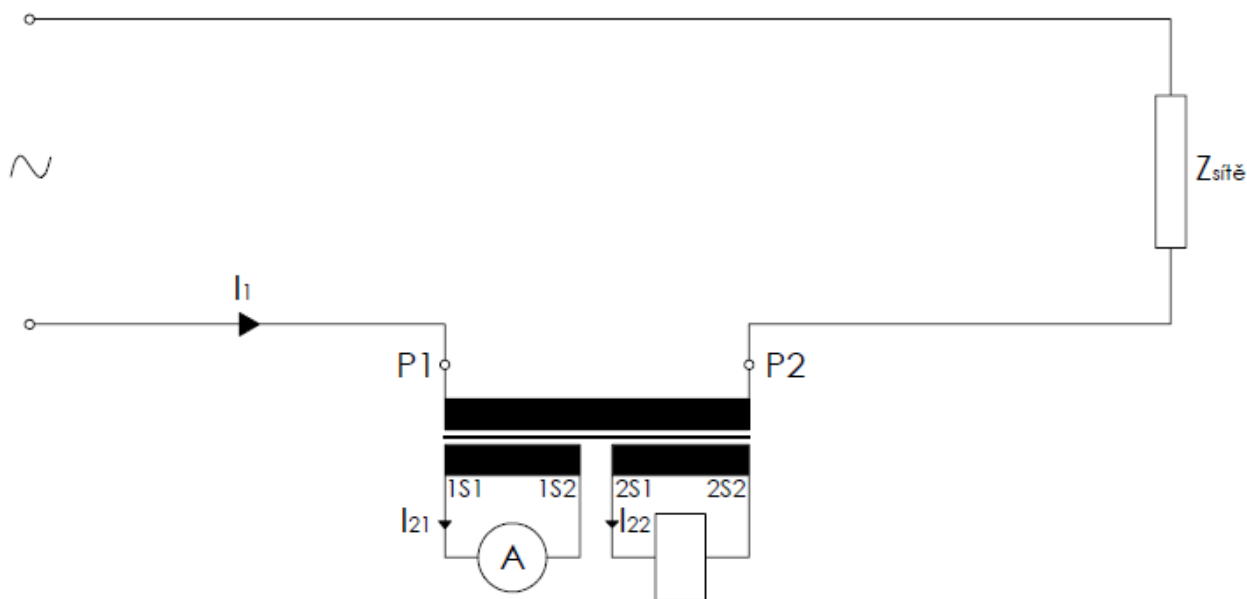


Z_i	Vnitřní břemeno	[Ω]
Z_c	Celkové břemeno	[Ω]
Z_N	Jmenovité břemeno	[Ω]
ε_i	Chyba proudu	[%]
δ_i	Chyba úhlu	[%]
Φ	Magnetický tok	[Wb]
μ_r	Relativní permitivita	[-]
σ_{th}	Proudová hustota	[A/mm ²]
ξ	Činitel plnění magnetického obvodu	[-]
ξ_2	Činitel nárustu výšky vinutí	[-]
ξ_3	Činitel plnění při skládání vodičů vedle sebe	[-]
ρ	Měrný odpor	[$\Omega \cdot m$]
γ	Měrná hmotnost	[kg/m ³]

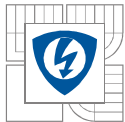
ÚVOD

Rozsah elektrických veličin v elektrizačních soustavách je tak značný, že přizpůsobovat proudové a napěťové systémy měřicích, jisticích a regulačních přístrojů takto rozsáhlým požadavkům není žádoucí z technického ani hospodářného hlediska. Z tohoto důvodu se přístroje zapojují do obvodů nepřímo přes *přístrojové transformátory*, které jsou svojí konstrukcí a funkcí k tomuto účelu přizpůsobeny. Podle transformované veličiny se dělí na *přístrojové transformátory proudu*, které se do obvodu zapojují sériově (viz. obr. 1) a *přístrojové transformátory napětí*, které se zapojují do obvodu paralelně. Dále je lze dělit podle typu přístroje, který bude v sekundárním obvodu transformátoru připojen. V případě, že bude připojen obvod měřicích přístrojů (např. elektroměry) – nazýváme je *měřicí*. Pokud bude připojen obvod jisticích přístrojů (např. napájení ochran) – nazýváme je *jisticí*. Často bývají konstruovány tak, že mohou současně působit jako měřicí i jisticí, tzn. mají několik sekundárních výstupů, z nichž některé mají vlastnosti potřebné pro napájení měřicích přístrojů a jiné pro napájení jisticích přístrojů. Toto je obvyklé u *přístrojových transformátorů proudu*, kterými se bude tato práce zabývat. Další běžné rozdělení *přístrojových transformátorů* je podle jejich umístění na transformátory pro *vnitřní montáž* a transformátory pro *venkovní montáž*. [1]

Přístrojové transformátory v podstatě transformují hodnoty proudu a napětí měřených obvodů na standardní hodnoty vhodné pro napájení proudových a napěťových cívek měřicích nebo jisticích přístrojů. Dále izolují obvod vn od obvodů nn (např. obvod jisticích přístrojů) a vzdalují měřicí a jisticí přístroje od působení silných magnetických a elektrických polí proudových obvodů, čímž vylučují nepříznivé působení na správnou funkci těchto přístrojů. Pro jisticí účely umožňují stanovit součty a rozdíly proudů nebo napětí v několika navzájem izolovaných bodech. Dovolují účelně soustředit měřicí a jisticí přístroje mimo rozvodny např. ve velínech. Transformátory proudu také chrání vhodnou konstrukcí systémy měřicích a jisticích přístrojů před dynamickými a tepelnými účinky nadproudů. [1]



Obrázek 1: Zapojení přístrojového transformátoru proudu do sítě



Cílem této práce je popis, návrh a realizace přístrojového transformátoru proudu s jedním měřicím (15 VA ; 0,5 ; FS10) a jedním jisticím (15 VA ; 5P20) jádrem v průchozím provedení a převodem 4000//5/5 A. Bude sloužit k měření a jistění zařízení vn pro nejvyšší napětí soustavy 12 kV. Práce je rozdělena na čtyři části. V první části je popsáno základní rozdělení přístrojových transformátorů proudu, důležité definice hlavních parametrů a některé, normou předepsané, tabulkové hodnoty pro přístrojové transformátory proudu. Dále je popsána analýza fyzikální podstaty přístrojových transformátorů proudu a jejich fázorové chyby. V druhé části práce je popsán samotný návrh transformátoru s požadovanými parametry a vývojový 3D model transformátoru vytvořený v programu SolidWorks. Ve třetí části jsou potom provedeny příslušné elektrostatické simulace v programu FEMM. V poslední části práce je popsána typová zkouška transformátoru a porovnání vypočítaných a naměřených výsledků. Přiloženy jsou i fotografie reálně vyrobeného kusu.

1 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU DLE NORMY

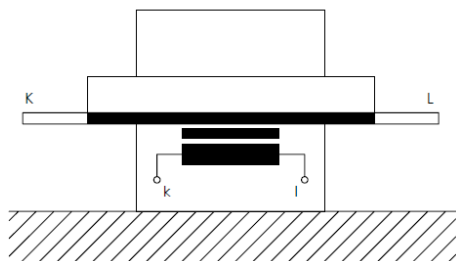
Přístrojové transformátory jsou netočivé elektromagnetické stroje, které napájí přístrojové obvody. Jejich konstrukce a technologie mají některé společné znaky např. s výkonovými transformátory, tedy s elektromagnetickými netočivými stroji (i když podle požadavků na funkci se od nich liší), ale jejich funkční vlastnosti se spíše blíží přístrojům. [1]

1.1 Rozdělení

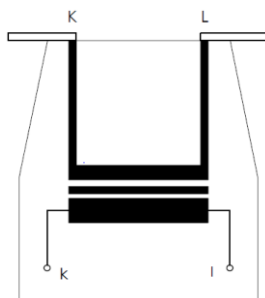
Přístrojové transformátory proudu se dělí podle hledisek:

- a) Podle tvaru a umístění primárních vývodů
 - průchozí (obr. 2)
 - podpěrný (obr. 3)
 - průchodkový (obr. 4)
- b) Podle primárního vinutí
 - jednozávitové
 - závitové
 - tyčové
 - násuvné
- a) Podle jiných hledisek
 - jednojádrové
 - vícejádrové
 - s rozebíratelným magnetickým obvodem
 - s několika sekundárními výstupy
 - kaskádové
 - sčítací

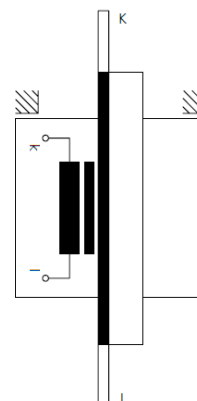
Podrobné rozdělení přístrojových transformátorů je popsáno v literatuře [2].



Obrázek 2: Průchozí transformátor proudu



Obrázek 3: Podpěrný transformátor proudu



Obrázek 4: Průchodkový transformátor proudu

1.2 Důležité názvosloví

Přístrojový transformátor – transformátor určený k převodu měřené veličiny do měřících přístrojů, elektroměrů, ochran a jiných podobných zařízení. [3]

Transformátor proudu – přístrojový transformátor, u něhož je za normálních provozních podmínek sekundární proud v podstatě úměrný primárnímu proudu; rozdíl fáze mezi vektory primárního a sekundárního proudu se při vhodném způsobu zapojení blíží nule. [3]

Primární vinutí – vinutí, kterým protéká proud, který má být transformován. [3]

Sekundární vinutí – vinutí, které napájí proudové obvody měřících přístrojů, elektroměrů, ochran nebo ovládacích zařízení. [3]

Sekundární obvod – vnější obvod, který získává informační signály ze sekundárního vinutí přístrojového transformátoru. [3]

Jmenovitý primární proud (I_{1N}) – hodnota primárního proudu, která je uvedena na štítku transformátoru proudu a na které je založena jeho činnost. [3]

Jmenovitý sekundární proud (I_{2N}) – hodnota sekundárního proudu, která je uvedena na štítku transformátoru proudu a na které je založena jeho činnost. [3]

Skutečný převod transformátoru – poměr skutečného primárního proudu ke skutečnému sekundárnímu proudu transformátoru proudu. [3]

Jmenovitý převod transformátoru proudu (k_i) – poměr jmenovitého primárního proudu ke jmenovitému sekundárnímu proudu transformátoru proudu. [3]

$$k_i = \frac{I_{1N}}{I_{2N}} \quad [\% ; A] \quad (1)$$

Jmenovitý závitový převod – požadovaný poměr počtu primárních závitů k počtu sekundárních závitů. [4]

Chyba proudu (chyba převodu) (ε_i) – chyba, kterou transformátor vnáší do měření proudu a která vyplývá ze skutečnosti, že skutečný převod není roven jmenovitému převodu. [3] Tato chyba proudu, vyjádřená v procentech je dána vztahem:

$$\varepsilon_i = \frac{I_S \cdot k_i - I_P}{I_P} \cdot 100 \quad [\% ; A] \quad (2)$$

kde I_P je skutečný primární proud

I_S je skutečný sekundární proud, když protéká I_P za podmínek měření

Chyba úhlu (δ_i) – rozdíl fáze mezi fázory primárního a sekundárního proudu; orientace fázorů primárních a sekundárních proudů je volena tak, že u ideálního transformátoru je chyba nulová. Chyba úhlu se považuje za kladnou, jestliže fázor sekundárního proudu předchází fázor primárního proudu. Obvykle bývá vyjádřena v úhlových minutách nebo centiradiánech. [3]

Celková chyba (ΔI) – v podmínkách ustáleného stavu je efektivní hodnota rozdílu mezi okamžitou hodnotou skutečného primárního proudu i_p a okamžitou hodnotou skutečného sekundárního proudu i_s násobenou jmenovitým převodem. Celková chyba vyjadřuje rozdíl fáze i zkreslení a udává se v procentech. [3] Je definována vztahem:

$$\Delta I = \frac{100}{I_{1N}} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (k_i \cdot i_s - i_p)^2 dt} \quad [\% ; A] \quad (3)$$



kde je k_i jmenovitý převod transformátoru proudu

I_{IN} efektivní hodnota primárního proudu

i_p okamžitá hodnota primárního proudu

i_s okamžitá hodnota sekundárního proudu

T doba trvání jednoho cyklu

Třída přesnosti – označení přiřazené transformátoru proudu, jehož chyba proudu a chyba úhlu nepřekročí dovolené hodnoty v předepsaných provozních podmínkách. [3]

Vnější břemeno (Z) – součet impedancí přístrojů a přívodů připojených na sekundární svorky transformátoru. [2]

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad [\Omega] \quad (4)$$

Vnitřní břemeno (Z_i) – součet reaktance a činného odporu sekundárního vinutí transformátoru. [2]

$$Z_i = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} \quad [\Omega] \quad (5)$$

Celkové břemeno (Z_c) – fázorový součet vnějšího a vnitřního břemene. [2]

Jmenovité břemeno (Z_N) – impedance, kterou lze transformátor v měřicím rozsahu zatížit, aniž se překročí dovolené chyby. [2]

Zátěž (P) – součin břemene a čtverce jmenovitého sekundárního proudu. [2]

$$P = Z \cdot I_{2N}^2 \quad [\text{VA} ; \Omega, \text{A}] \quad (6)$$

Jmenovitá zátěž (P_N) – je uvedena na štítku a rovná se součinu jmenovitého břemene a čtverce jmenovitého sekundárního proudu. [2]

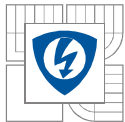
$$P_N = Z_N \cdot I_{2N}^2 \quad [\text{VA} ; \Omega, \text{A}] \quad (7)$$

Krajní provozovací proud (I_{Im}) – nejvyšší proud, který může trvale procházet primárním vinutím transformátoru proudu, na jehož sekundární vinutí je připojeno jmenovité břemeno, aniž se překročí dovolená trvalá teplota kterékoliv části transformátoru a aniž se překročí dovolené chyby (běžná hodnota bývá 120% I_{IN}). [2]

Jmenovitý krátkodobý tepelný proud (I_{th}) – efektivní hodnota primárního proudu, který transformátor vydrží po dobu 1 sekundy při zkratovaném sekundárním vinutí, aniž by došlo k poškození transformátoru; lze dohodnout i jiné časy než 1 sekunda, jako 0,5 s, 2 s a 3 s. [3]

Jmenovitý dynamický proud (I_{dyn}) – vrcholová hodnota primárního proudu, kterou transformátor vydrží bez elektrického nebo mechanického poškození elektrodynamickými silami při zkratovaném sekundárním vinutí. [3]

Jmenovitý trvalý tepelný proud – standardní hodnota jmenovitého trvalého tepelného proudu je jmenovitý primární proud. Jestliže je stanoven jmenovitý trvalý tepelný proud větší než jmenovitý primární proud, pak by jako přednostní hodnoty měly být zvoleny hodnoty 120% až 150% a 200% jmenovitého primárního proudu. [5]



1.2.1 Dodatečné definice pro měřicí transformátory proudu

Měřicí transformátor proudu – transformátor proudu určený k přenosu informačního signálu k měřicím přístrojům nebo elektroměrům. [3]

Jmenovitý primární nadproud (IPL) – hodnota minimálního primárního proudu, při které je celková chyba měřicího transformátoru proudu rovna nebo větší než 10% při jmenovitém sekundárním břemeni. [3]

Nadproudové číslo (FS) – poměr jmenovitého primárního nadproudu ke jmenovitému primárnímu proudu. V případě, že primárním vinutím transformátoru proudu bude protékat zkratový proud, bude bezpečnost pro napájené přístroje největší, pokud nadproudové číslo (FS) bude malé. Měla by se věnovat pozornost skutečnosti, že nadproudové číslo je ovlivněno břemenem. [3], [5]

1.2.2 Dodatečné definice pro jisticí transformátory proudu

Jisticí transformátor proudu – transformátor proudu určený k přenášení informačního signálu do ochranných a ovládacích zařízení. [3]

Jmenovitý primární nadproud při dané třídě přesnosti – hodnota primárního proudu, do které transformátor proudu vyhovuje požadavkům na celkovou chybu. [3]

Nadproudový činitel (ALF) – poměr jmenovitého primárního nadproudu při dané přesnosti a jmenovitého primárního proudu. [3]

1.3 Normalizované hodnoty

Hodnoty **jmenovitých primárních proudů** pro přístrojové transformátory proudu dle normy jsou: 10 – 12,5 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75 A a jejich dekadické násobky nebo zlomky. Podtrženým hodnotám se v praxi dává přednost.

Hodnoty **jmenovitých sekundárních proudů** pro přístrojové transformátory proudu dle normy jsou: 1 A, 2 A, a 5A. Přednostní hodnotou je 5A. Hodnota 1A se většinou volí v případě dlouhé vzdálenosti mezi přístrojovým transformátorem proudu a měřicím přístrojem, z důvodu možnosti použití vodiče s menším průřezem.

Hodnoty **jmenovité zátěže** do 30 VA pro přístrojové transformátory proudu dle normy jsou: 2,5 – 5,0 – 10 – 15 – 30 VA. Hodnoty jmenovité zátěže nad 30 VA mohou být zvoleny dle potřeby.

1.3.1 Normalizované hodnoty pro měřicí transformátory proudu

Třídy přesnosti pro měřicí transformátory proudu dle normy jsou:

0,1 – přesná laboratorní měření

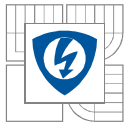
0,2 – laboratorní měření

0,2S – laboratorní měření (rozšířený proudový rozsah – od 1% jmen. proudu)

0,5S – měření spotřeby elektrické energie (rozšířený proudový rozsah – od 1% jmen. proudu)

0,5 – měření spotřeby elektrické energie

1 – podružné měření

**3 – orientační kontrolní měření [6]**

Pro třídy přesnosti **0,1 – 0,2 – 0,5 – 1** chyba proudu a chyba úhlu při jmenovitém kmitočtu nesmí překročit hodnoty uvedené v tabulce 1, při sekundární zátěži mezi 25% a 100% jmenovité zátěže. [3]

Pro třídy přesnosti **0,2S** a **0,5S** chyba proudu a chyba úhlu při jmenovitém kmitočtu nesmí překročit hodnoty uvedené v tabulce 2, při sekundární zátěži mezi 25% a 100% jmenovité zátěže. U těchto dvou tříd přesnosti je rozšířený proudový rozsah od 1% do 120% jmenovitého proudu. [3]

Pro třídy přesnosti **3** a **5** nejsou stanoveny chyby úhlu (viz. tabulka 3) a v praxi se běžně nevyskytují.

Třída přesnosti	±Chyba proudu v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku				±Chyba úhlu v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku							
					Minuty				Centiradiány			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,40	0,20	0,10	0,10	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,10
0,2	0,75	0,35	0,20	0,20	30	15	10	10	0,90	0,45	0,30	0,30
0,5	1,50	0,75	0,50	0,50	90	45	30	30	2,70	1,35	0,90	0,90
1,0	3,00	1,50	1,00	1,00	180	90	60	60	5,40	2,70	1,80	1,80

Tabulka 1: Dovolené chyby proudu a chyby úhlu pro měřicí transformátory proudu [3]

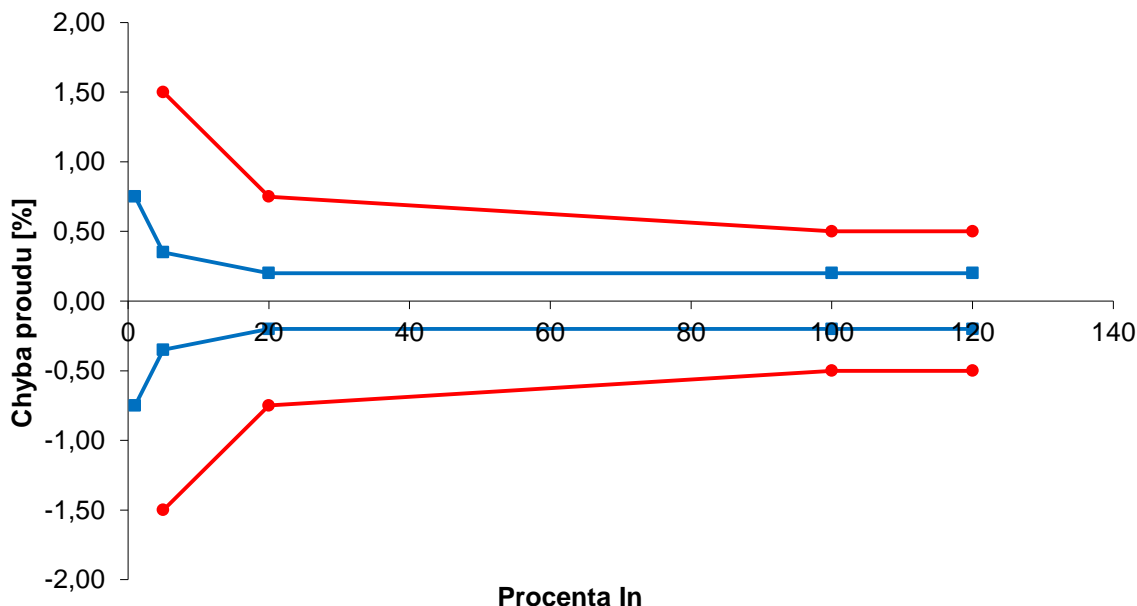
Třída přesnosti	± chyba proudu v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku					± Chyba úhlu v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku									
						Minuty					Centiradiány				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2S	0,75	0,35	0,20	0,20	0,20	30	15	10	10	10	0,90	0,45	0,30	0,30	0,30
0,5S	1,50	0,75	0,50	0,50	0,50	90	45	30	30	30	2,70	1,35	0,90	0,90	0,90

Tabulka 2: Dovolené chyby proudu a chyby úhlu pro měřicí transformátory proudu pro zvláštní použití [3]

Třída	± chyba proudu v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku	
	50	120
3	3	3
5	5	5

Tabulka 3: Dovolené chyby proudu pro měřicí transformátory proudu (třídy 3 a 5) [3]

V obrázku číslo 5 je grafické znázornění třídy přesnosti **0,2S** (modrá) a **0,5** (červená) pro měřicí transformátory proudu. Transformátor, aby vyhověl požadavkům na třídu přesnosti, se musí svojí chybou proudu vejít mezi horní a dolní hraniční křivku, která udává maximální dovolené chyby proudu v procentech jmenovitého proudu pro určitou třídu přesnosti.



Obrázek 5: Třída přesnosti 0,2S a 0,5 dle tabulek 1 a 2

1.3.2 Normalizované hodnoty pro jisticí transformátory proudu

Hodnoty nadproudových čísel dle normy jsou: **5 – 10 – 15 – 20 – 30**

Třídy přesnosti pro jisticí transformátory proudu dle normy jsou: **5P a 10P**

Norma [3] udává, že chyba proudu, chyba úhlu a celková chyba při připojené jmenovité zátěži a kmitočtu nesmí překročit hodnoty uvedené v tabulce číslo 4.

Třída přesnosti	Chyba proudu při jmenovitém primárním proudu %	Chyba úhlu při jmenovitém primárním proudu		Celková chyba při jmenovitém primárním nadproudu
		Minuty	Centiradiány	
5P	± 1	± 60	$\pm 1,8$	5
10P	± 3	-	-	10

Tabulka 4: Dovolené chyby proudu a chyby úhlu pro jisticí transformátory proudu [3]

1.4 Funkce transformátoru proudu

Základem činnosti přístrojového transformátoru proudu je elektromagnetická indukce. Je-li na primárním vinutí připojeno střídavé napětí U_1 , tak toto napětí protlačuje vinutím střídavý proud I_1 , který vyvolá magnetický tok stejné frekvence jako má napětí U_1 . Magnetický tok se uzavírá převážně magnetickým obvodem a svými účinky zasahuje sekundární vinutí. Časová změna tohoto magnetického toku způsobí, že se v sekundárním vinutí indukuje střídavé napětí a

teče střídavý proud. Obecné schéma zapojení transformátoru proudu do obvodu je na obrázku 1. Primární vinutí tohoto transformátoru je zapojeno do série s měřeným obvodem a prochází jím tedy proud I_1 , který je v podstatě dán obecnou impedancí tohoto obvodu Z . Proud I_2 , který prochází sekundárním vinutím transformátoru je potom dán převodem transformátoru (1). Sekundární vinutí je vyvedeno na svorkovnici, k jejímž svorkám jsou připojeny různé jisticí, měřicí nebo regulační obvody. Tyto obvody tvoří vnější břemeno transformátoru Z (4), které součinem s kvadrátem sekundárního proudu dává zátěž transformátoru P (6). Z výše uvedeného tedy vychází, že výkon transformátoru se mění jen změnou vnějšího břemene. Z čehož potom plyne změna napětí a magnetické indukce.

1.4.1 Transformátor proudu v pracovní oblasti a při zkratech

U přístrojových transformátorů proudu rozlišujeme dvě základní pracovní oblasti:

- **oblast provozní**
- **oblast nadproudová**

Za normálního provozu v síti pracuje transformátor v oblasti **provozní**. V této oblasti jsou určeny k práci transformátory *měřicí*. U těchto transformátorů je provozní oblast vymezena měřicím rozsahem, tzn. hodnotami primárního proudu, u kterých jsou normou stanoveny dovolené chyby pro měření. Přesnost transformátoru je dána jeho třídou přesnosti (viz kapitola 1.3.1).

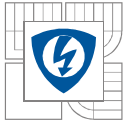
Při přetížení a zkratech v síti pracuje transformátor v oblasti **nadproudové**. *Měřicí* transformátor je v této oblasti z hlediska ochrany měřicích přístrojů připojených na jeho svorky charakterizován nadproudovým číslem. V technické praxi se používají nadproudová čísla $FS5$ a $FS10$ (viz kapitola 1.2.1). V této oblasti musí spolehlivě pracovat *jisticí* transformátory, protože napájí obvody ochrany. Tyto ochrany potřebují, aby transformátor přenesl co nejméně poměr mezi primárním a sekundárním proudem i při vysokých zkratových proudech v prvních několika periodách těchto proudů. Tyto jisticí transformátory jsou dány svojí třídou přesnosti $5P$ nebo $10P$ a také nadproudovým činitelem např. 5 , 10 , 20 (viz kapitola 1.3.2).

Hranici mezi těmito oblastmi tvoří **krajní provozovací proud** (viz kapitola 1.2).

V síti, na kterou je přístrojový transformátor připojen, mohou vzniknout poruchové stavy – zkraty. Správně navržený transformátor musí těmto zkratům svojí konstrukcí odolat. Schopnost odolat těmto tepelným, dynamickým a elektrickým účinkům zkratových proudů se nazývá **zkratová odolnost transformátoru** a je charakterizována jeho jmenovitým krátkodobým tepelným proudem I_{th} a jmenovitým dynamickým proudem I_{dyn} (viz kapitola 1.2).

Pro přístrojový transformátor proudu obecně je také důležité, že pokud primárním vinutím transformátoru prochází proud, tak je nutné, aby byly sekundární svorky připojeny na zátěž nebo **zkratovány**. Při průchodu proudu primárním vinutím **nesmí být sekundární svorky rozpojeny** – jde o havarijní stav. Pokud totiž dojde za provozu transformátoru k rozpojení sekundárních svorek, tak se celé primární proudění stane prouděním magnetizačním a během krátkého časového úseku sinusovky proudu dojde k nasycení magnetického obvodu. Magnetický tok Φ se od určité velikosti přestane zvyšovat a bude konstantní. Následně během krátkého časového úseku sinusovky dojde ke změně magnetického toku o hodnotu $2\Phi_{max}$. Právě v tomto okamžiku se v sekundárním vinutí N_2 naindukuje nejvyšší napětí. [2] Platí rovnice:

$$U_{20} = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (8)$$

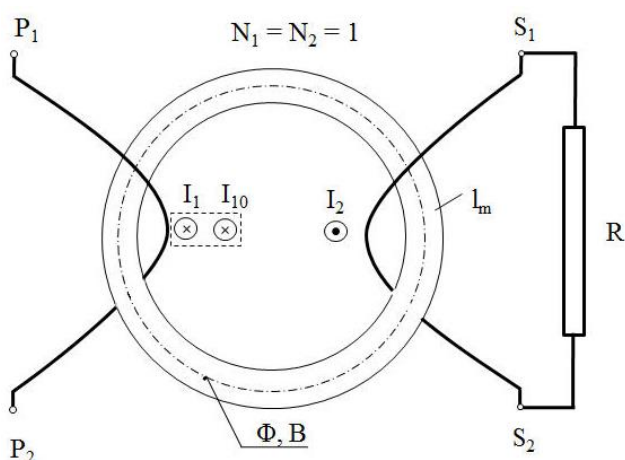


Největší hodnoty bude toto napětí dosahovat při průchodu magnetického toku nulou z důvodu, že indukované napětí přebíhá magnetický tok o 90° . Pokud tedy bude magnetický tok procházet nulou, napětí bude maximální.

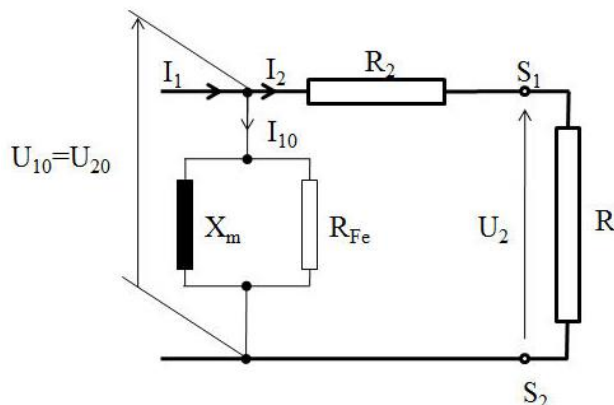
2 TEORIE PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU

Přístrojové transformátory proudu v energetických sítích napájí měřicí, jisticí a regulační obvody přístrojů připojených na sekundární svorky těchto transformátorů. Pro tyto transformátory platí stejné náhradní schéma i základní rovnice jako pro výkonové transformátory, ale jsou na ně kladeny jiné požadavky. U přístrojových transformátorů proudu je velký důraz kladen na dodržení předepsané chyby proudu a chyby úhlu v určitém rozsahu transformovaného proudu a v určitém rozsahu zatížení na sekundárních svorkách. Výkony požadované po přístrojových transformátorech proudu jsou nepatrné (viz kapitola 1). Poměrem primárního proudu I_{1N} a sekundárního proudu I_{2N} je v podstatě určen počet primárních závitů N_1 a sekundárních závitů N_2 , protože platí vztah pro převod transformátoru (32).

Přístrojový transformátor proudu se do obvodu zapojuje sériově a jeho chyba ε_i je dána fázorovým rozdílem primárního a sekundárního proudu a závisí také na velikosti zátěže. Tato chyba je v podstatě představována složkou primárního proudu nutnou k magnetizaci magnetického jádra transformátoru I_{10} . Zbývající složka primárního proudu I_1 je potom transformována do sekundárního vinutí. Principiálně lze transformátor nakreslit tak, jak ukazuje obr. 6. Na následujícím obrázku (obr. 7) je potom náhradní schéma tohoto transformátoru. Je důležité poznamenat, že pro dimenzi a návrh transformátoru proudu jsou důležité prvky náhradního schématu od příčné větve doprava, zbytek je v podstatě dán sítí, do které je transformátor připojen. [2]

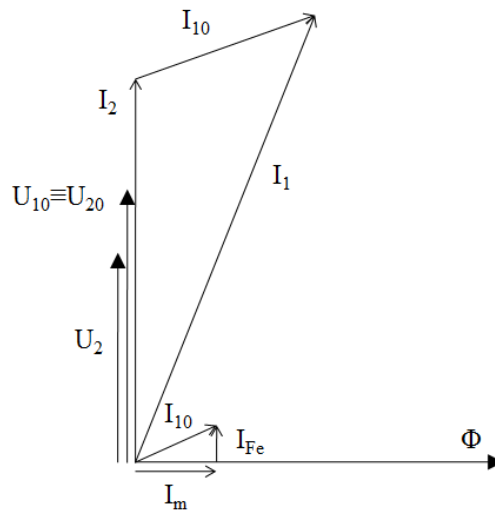


Obrázek 6: Přístrojový transformátor proudu – princip [9]



Obrázek 7: Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu [9]

Budeme-li předpokládat, že prvky náhradního schématu jsou lineární (R, R_2, X_m, R_{fe}), lze nakreslit fázorový diagram znázorněný na obr. 8. Dále budeme předpokládat, že se u sekundárního vinutí neprojeví rozptylová reaktance, jelikož jde o vinutí rovnoměrně navinuté na celý toroidní magnetický obvod. Pro zjednodušení zavedeme další předpoklad, že $I_1 = I_2$ a $N_1 = N_2 = 1$, protože jinak bychom museli přepočítat veličiny na stejný počet závitů. Na svorky sekundárního vinutí je připojena činná zátěž ($\cos\varphi = 1$).



Obrázek 8: Fázorový diagram přístrojového transformátoru proudu [9]

Potom pro napětí na sekundárních svorkách U_2 platí vztah:

$$U_2 = R \cdot I_2 \quad (9)$$

kde je R zátěž na sekundárních svorkách transformátoru

I_2 sekundární proud transformátoru

Pro indukované napětí U_{20} tedy platí:

$$U_{20} = (R + R_2) \cdot I_2 \quad (10)$$

kde je R_2 odpor sekundárního vinutí

Dále pro indukované napětí U_{20} platí také vztah z indukčního zákona:

$$U_{20} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot N_2 \quad (11)$$

kde je f frekvence

Φ magnetický tok

N_2 počet sekundárních závitů

Porovnáním vztahů (10) a (11) dostaneme:

$$U_{20} = (R + R_2) \cdot I_2 \rightarrow 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot N_2 \quad (12)$$

Pro magnetický tok ϕ dále platí:

$$\phi = B \cdot S \quad (13)$$

kde je B magnetická indukce

S průřez magnetického obvodu

Ze vztahu (12) je nyní vidět, že pouhou změnou zátěže na sekundárních svorkách transformátoru R lze měnit indukované napětí U_{20} a tím i magnetický tok ϕ . Protože pro magnetický tok platí vztah (13) a máme-li daný (nebo zvolený) průřez magnetického obvodu, tak je tím dána i odpovídající magnetická indukce B . Při znalosti magnetické indukce lze potom z magnetizační charakteristiky (obr. 9) odečíst příslušnou intenzitu magnetického pole H . Celkové magnetické napětí U_m potřebné k protlačení magnetického toku ϕ magnetickým obvodem je pak dáno vztahem:

$$U_m = H \cdot l_m = N_1 \cdot I_{10} \quad (14)$$

kde je U_m magnetické napětí

H intenzita magnetického pole

l_m délka střední siločáry magnetického obvodu

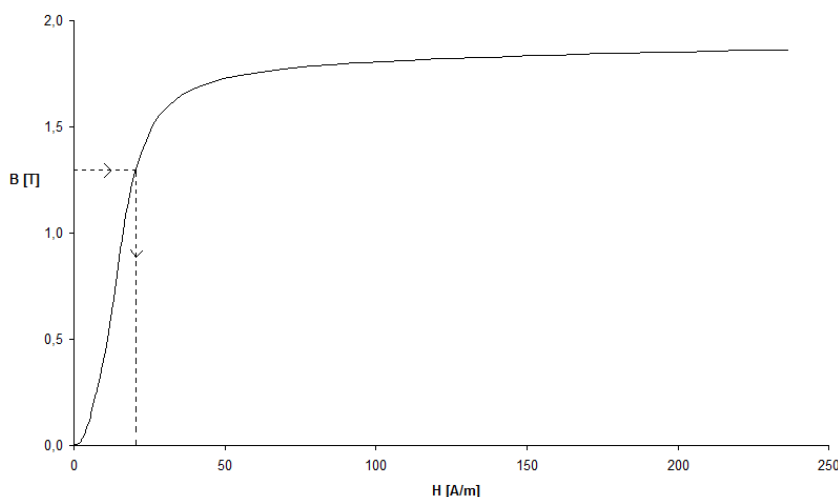
N_1 počet primárních závitů

I_{10} budící proud

Ze vztahu (14) lze vyjádřit budící proud transformátoru I_{10} , který má zásadní vliv na chybu přístrojového transformátoru proudů:

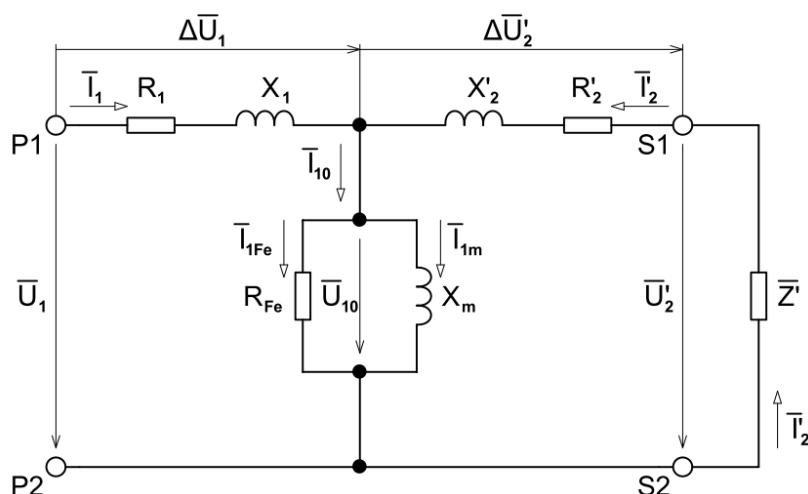
$$I_{10} = \frac{H \cdot l_m}{N_1} \quad (15)$$

Ze vztahu (15) plyne, že jestliže zvětšíme počet primárních závitů N_1 (s tím v poměru počet sekundárních závitů N_2 , aby platil převod), tak bude budící proud I_{10} menší a tím se zmenší i celková chyba přístrojového transformátoru proudů ΔI . Toto tvrzení lze vyzorovat i z fázorového diagramu na obr. 11. Tohoto faktu se v technické praxi hojně využívá.



Obrázek 9: Magnetizační charakteristika feromagnetického materiálu

Náhradní schéma reálného transformátoru i s levou částí podélné větve je na obr. 10.



Obrázek 10: Náhradní schéma transformátoru

Z teorie transformátorů vyplývají následující rovnice pro přepočítání parametrů:

Sekundární proud přepočítaný na počet závitů primárního vinutí:

$$I_2' = I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (16)$$

Sekundární napětí přepočítané na počet závitů primárního vinutí:

$$U_2' = U_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (17)$$

Odpor sekundárního vinutí přepočítaný na počet závitů primárního vinutí:

$$R_2' = R_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (18)$$

Reaktance sekundárního vinutí přepočtené na počet závitů primárního vinutí:

$$X_2' = X_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (19)$$

Pomocí Kirchhoffových zákonů lze napsat rovnice, které popisují vlastnosti transformátoru ve všech provozních stavech. Pro jednotlivé obvody v náhradním schématu tedy platí následující rovnice podle II. Kirchhoffova zákona:

$$\overline{U}_1 = R_1 \cdot \overline{I}_1 + jX_1 \cdot \overline{I}_1 + \overline{U}_{10} \quad (20)$$

$$\overline{U}_2' = R_2' \cdot \overline{I}_2' + jX_2' \cdot \overline{I}_2' + \overline{U}_{20}' \quad (21)$$

Pro indukované napětí dále platí:

$$\overline{U}_{10} \equiv \overline{U}_{20}' \quad (22)$$

Podle I. Kirchhoffova zákona dále platí:

$$\overline{I}_1 = \overline{I}_{10} - \overline{I}_2' \quad (23)$$

Z rovnic (20) a (21) můžeme vyjádřit indukovaná napětí:

$$\overline{U}_{10} = \overline{U}_1 - R_1 \cdot \overline{I}_1 - jX_1 \cdot \overline{I}_1 \quad (24)$$

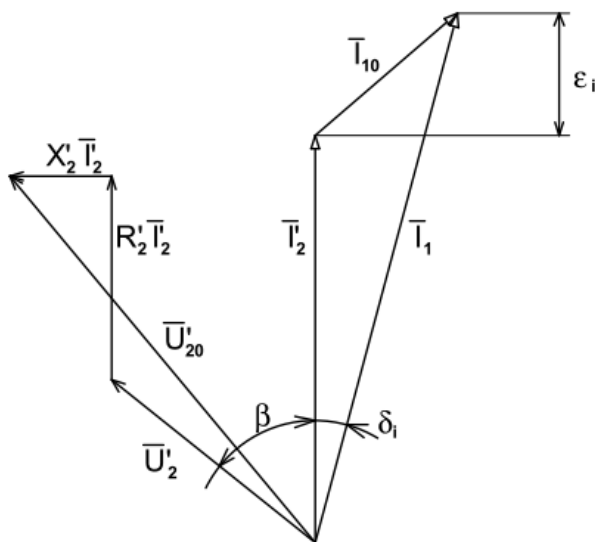
$$\overline{U}'_{20} = \overline{U}'_2 - R'_2 \cdot \overline{I}'_2 - jX'_2 \cdot \overline{I}'_2 \quad (25)$$

Nyní pokud dosadíme rovnice (24) a (25) do rovnice (22), tak po úpravě dostaneme rovnici:

$$\overline{U}_1 = \overline{U}'_2 + \overline{I}_1 \cdot (R_1 + jX_1) - \overline{I}'_2 \cdot (R'_2 - jX'_2) \quad (26)$$

Dále rovnici (23) dosadíme do rovnice (26) a vyjde vztah:

$$\overline{U}_1 = \overline{U}'_2 + \overline{I}_{10} \cdot (R_1 + jX_1) - \overline{I}'_2 \cdot (R_1 + R'_2 + jX_1 - jX'_2) \quad (27)$$



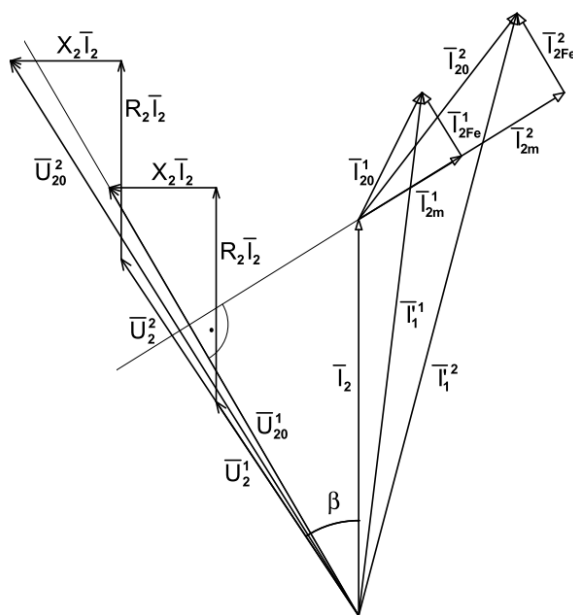
Obrázek 11: Fázorový diagram - znázornění chyby transformátoru proudu

Na obr. 11 je znázorněn fázorový diagram přístrojového transformátoru proudu pootočený tak, aby byl fázor proudu I'_2 , který je v tomto případě výchozí, na svislé ose. Z tohoto fázorového diagramu je patrné, které veličiny jsou důležité, protože mají rozhodující vliv na celkovou chybu transformátoru proudu. Jak už bylo zmíněno výše, jde o fázor proudu I_{10} , který lze rozložit na chybu proudu (převodu) ϵ_i a chybu úhlu δ_i . Proud I_{10} má stejnou fyzikální podstatu a souvisí tedy s indukovaným napětím U_{20}' , které je rozhodující pro magnetickou indukci v magnetickém obvodu. Proud I_{10} se skládá z proudu na krytí ztrát v železe I_{Fe} a proudu magnetizačního I_m . [2]

Dále je důležité, že se změnou zátěže se mění velikost i fáze proudu I_{10} . Pokud se změní zátěž na sekundárních svorkách transformátoru, změní se i napětí U_2' (proud I_2' je určen převodem transformátoru) a tím tedy i napětí indukované U_{20}' . Tomuto indukovanému napětí je přímo úměrná hodnota mag. indukce v mag. obvodu (dle indukčního zákona), této magnetické indukci pak odpovídá určité magnetické napětí (budící proudění) a tím i proud I_{10} . Z výše uvedeného tedy plyne, že s větší zátěží roste proud I_{10} a tím i celková chyba transformátoru proudu. Závislost ovšem není lineární, protože je důležité, v jaké části magnetizační charakteristiky se pohybujeme.

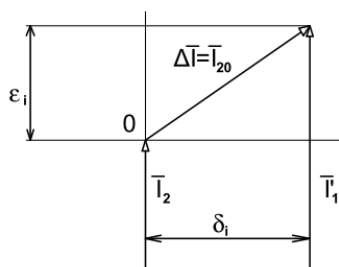
2.1 Chyba transformátoru proudu

Na obr. 12 je znázorněn fázorový diagram pro dvě různé zátěže přístrojového transformátoru proudu. Jako výchozí jsou uvažovány sekundární veličiny – všechny veličiny byly přepočítány na počet závitů sekundárního vinutí. V koncovém bodě fázoru I_2 je počátek souřadnicového systému a rozdíl mezi fázory I_2 a I_1' je celková chyba proudu ΔI . Tato chyba se potom dělí na chybu proudu ε_i a chybu úhlu δ_i (dle kapitoly 1.2). Podle tabulky dovolených chyb pro jednotlivé třídy přesnosti jde o úhly do 120min – z tohoto důvodu lze považovat fázory I_1' a I_2 za rovnoběžné a oblouk se středem v počátku fázoru I_2 o poloměru I_2 za přímku kolmou na fázor I_2 . [2]

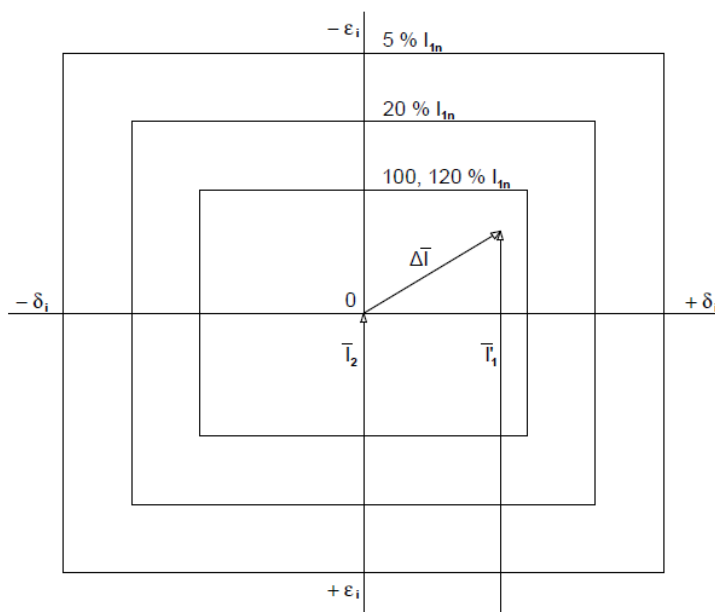


Obrázek 12: Fázorový diagram transformátoru proudu pro dvě různé zátěže

Dále na obr. 13 je znázorněn diagram, který je základem komplexního diagramu chyb a je na něm zobrazena chyba proudu a chyba úhlu současně. Na dalším obr. 14 je plošně zobrazený komplexní diagram chyb. V tomto diagramu je jako parametr uveden proud, pro který příslušná hranice chyb platí. Koncový bod pro danou třídu přesnosti se musí vždy pohybovat uvnitř příslušného pole chyb podle toho při jakém proudu od $0,1I_n$ do $1,2I_n$ bylo měření prováděno. Podle nakresleného komplexního diagramu chyb lze rozhodovat o kvalitě magnetického materiálu při jednotlivých zátěžích. Bylo by zde také poznat mechanické poškození (např. stlačení) magnetického jádra – fázorová chyba by se zvětšila.



Obrázek 13: Diagram chyb - podstata



Obrázek 14: Komplexní diagram chyb

2.2 Souvislost břemene, nadproudového čísla a třídy přesnosti

Konkrétní přístrojové transformátory proudu musí splňovat požadavky na dovolenou chybu, ale také musí splňovat požadavek na velikost nadproudového čísla při daném zatížení transformátoru. Pokud uvažujeme, že indukce nasycení je pro daný materiál konstantní, tak je zřejmá souvislost mezi nadproudovým číslem a zatížením transformátoru proudu. Pro nadproudové číslo n platí vztah:

$$n = \frac{B_m}{0,9 \cdot B_n} \quad [- , T] \quad (28)$$

kde B_n je jmenovitá indukce při jmenovité zátěži a jmenovitém proudu

B_m indukce nasycení pro konkrétní magnetické materiály (viz tab. 5)

Po vynásobení rovnice (28) Z_c vyjde vztah:

$$Z_c \cdot n = \frac{B_m \cdot Z_c}{0,9 \cdot B_n} \quad [- , \Omega , T] \quad (29)$$

Dále lze dosadit za Z_c :

$$Z_c = \frac{U_{20}}{I_{2N}} = \frac{4,44 \cdot f \cdot B_n \cdot S \cdot N_2}{I_{2N}} \quad [\Omega , V , A , H_z , T , m^2] \quad (30)$$

Rovnice (30) se dosadí do rovnice (29):

$$Z_c \cdot n = \frac{B_m \cdot 4,44 \cdot f \cdot B_n \cdot S \cdot N_2}{0,9 \cdot B_n \cdot I_{2N}} = \frac{4,9 \cdot f \cdot B_m \cdot S \cdot N_2}{I_{2N}} \quad [\Omega , T , A , H_z , m^2] \quad (31)$$

Z rovnice (31) plyne, že součin nadproudového čísla a břemene je konstantní při zachování přesnosti. Chceme – li tedy zachovat třídu přesnosti a potřebujeme zvětšit zátěž pak musíme počítat se snížením nadproudového čísla a naopak. Je zde tedy zřejmá souvislost mezi zátěží, třídou přesnosti a nadproudovým číslem. Pokud volíme dvě z těchto veličin, pak třetí z nich je tím vlastně určena. V technické praxi je však obvyklé, že zákazník si zvolí dle potřeby všechny tři veličiny – v tomto případě se musí správně zvolit rozměr magnetického jádra. Toto tvrzení je také důkaz, že správné rozměry magnetického jádra jsou důležité pro vlastnosti přístrojových transformátorů proudu. [2]

2.3 Provedení přístrojových transformátorů proudu

Přístrojový transformátor proudu se v podstatě skládá ze čtyř základních částí:

- Magnetické jádro
- Primární vinutí
- Sekundární vinutí
- Epoxidová pryskyřice

Další části jako například základová deska, primární svorky (u průchozího transformátoru nejsou), sekundární svorkovnice, materiály spojovací, materiály zabraňující zatečení hmoty a materiály používané k odpružení magnetického jádra se postupně přidávají k výše uvedeným základním částem v průběhu výroby transformátoru.

2.3.1 Magnetické obvody a sekundární vinutí transformátorů proudu

Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tak volba materiálu magnetického obvodu má velký vliv na konečné vlastnosti transformátoru a je proto velice důležitá. Protože požadavky na měřicí a jisticí transformátory se liší, používají se tedy odlišné materiály.

Pro **měřicí jádra** přístrojových transformátorů proudu, u kterých je požadavek na vysokou permeabilitu a velkou indukci nasycení se obecně používají nanocrystalová jádra (Nc), jádra Permalloy (Py) nebo klasická železná jádra kvality Super Extra (Su-Ex). Hodnoty relativní permeability a indukce nasycení zmíněných materiálů uvádí tabulka 5. Nanokrystalického jádra se většinou používá u měřicích jader třídy přesnosti 0,2S ; 0,2 a 0,5S. Na třídu přesnosti 0,5 se obecně používá materiál Su-Ex.

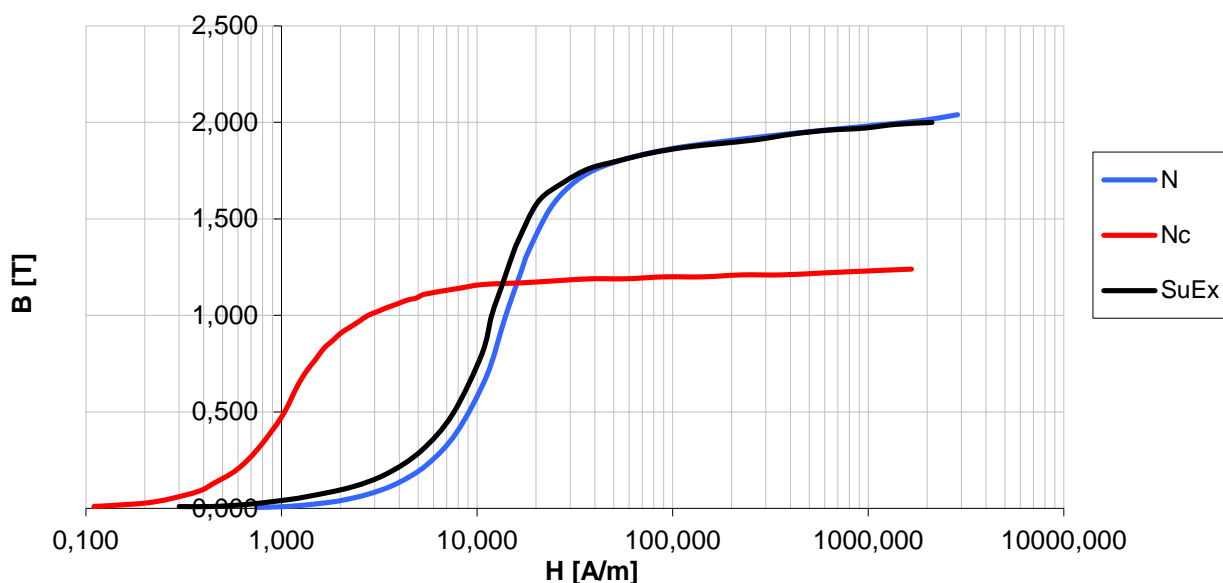
Materiál	Relativní permeabilita μ_r	Indukce nasycení
Nanocrystal	8000 – 200 000	1,1 T
Permalloy	50 000 – 140 000	0,75 T
Železo	300 – 10 000	1,8 T

Tabulka 5: Magnetické materiály pro jádra přístrojových transformátorů proudu

Jako materiál **jisticích jader** se používají jádra železná kvality Normal (N) a to do třídy přesnosti 10P i 5P. Výjimečně se používají do třídy přesnosti 5P jádra kvality Su-Ex.

Magnetická jádra se umisťují do speciálních pouzder, která je chrání před mechanickým stlačením při vytvrzovacím procesu epoxidové pryskyřice.

Obecně také platí, že se zvětšujícím se průřezem jádra roste nadproudové číslo a naopak. Tuto skutečnost potvrzuje například vzorec (59).



Obrázek 15: Magnetizační charakteristiky různých materiálů

Jako **sekundární vinutí** se obecně používá smaltovaný měděný vodič různých průměrů. Pro převod na sekundární proud I A se používají vodiče průměru menšího než $1,6$ mm, pro převod na sekundární proud 5 A používají vodiče od průměru většího než $1,6$ mm včetně. Pro lepší korekci přesnosti se používá dvoudrátového provedení – kombinace většího a menšího průměru vodičů, např. $\varnothing 1,8\text{mm} + \varnothing 0,6\text{mm}$. Potom se přidáním nebo odebráním závitů tenčího vodiče koriguje pole chyb (závitová korekce). Volba průřezu vodiče má také vliv na nadproudový činitel ALF, čehož se s oblibou využívá u jisticích jader – s větším průřezem sekundárního vodiče roste nadproudový činitel, což plyne ze vztahů (50), (51), (58), (59), (60).

2.3.2 Primární vinutí

Jako primární vodič se obvykle používá měděných pásků o určitých rozměrech. Mezi závitů je umístěn izolační proklad. Počet pásků je dán velikostí primárního a zkratového proudu (viz kapitola 2.4). Pro větší primární proudy (kolem 2000 A) se používá měděného litého vodiče. U průchozích transformátorů slouží jako primární vodič měděný pas.

2.3.3 Epoxidová pryskyřice

Směs epoxidové pryskyřice plní u epoxidových transformátorů funkci nejen elektroizolační, ale i mechanickou. Do odlitku transformátoru jsou zality zalévací matice, za které se transformátor připevňuje k základové desce a prostřednictvím této desky i na místo určení. Při zalévání funkčních částí transformátoru epoxidovou pryskyřicí, která má předepsanou teplotu, jsou i konkrétně předepsané teploty, na které se musí funkční části a forma transformátoru předeheat, aby při tuhnutí hmoty nedocházelo k vytvoření bublin v izolačním předělu nebo kdekoli jinde v těle transformátoru, protože tyto bubliny potom tvoří elektrické výboje, díky kterým transformátor nevyhoví na kusovou zkoušku – měření částečných výbojů.

2.4 Postup při návrhu transformátoru proudu

Při návrhu přístrojového transformátoru proudu je nutné uvažovat hlediska *funkční* (musí splňovat požadované parametry), *konstrukční* (jednoduchá a spolehlivá konstrukce), *technologická* (přípravky, formy, technologické postupy) a *ekonomická* (kladen důraz na nízkou výrobní cenu).

Zadaný transformátor bude navržen v jednozávitovém průchozím provedení s epoxidovou izolací. Takový transformátor bývá obvykle zadán následujícími parametry:

- Jmenovitý výkon (zátěž) P
- Třída přesnosti T_p
- Nadproudové číslo n
- Jmenovitý primární proud I_{1N}
- Jmenovitý sekundární proud I_{2N}
- Jmenovité napětí rozvodné soustavy
- Jmenovitý krátkodobý tepelný proud I_{th} (jednosekundový)

Tloušťka vrstvy izolačního předělu t_i mezi primárním a sekundárním vinutím z epoxidové pryskyřice je dána pro jednotlivá nejvyšší napětí sítě dle tabulky 6:

Nejvyšší napětí sítě [kV]	Izolační předěl [mm]
12	9 – 10
25	14 – 16
38	22 – 25

Tabulka 6: Velikost izolačního předělu



V technické praxi se k výše uvedeným hodnotám v tab. 6 přidává určitá rezerva z různých konstrukčních důvodů.

Pro jmenovitý převod transformátoru platí vztah:

$$k_i = \frac{I_{1N}}{I_{2N}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (32)$$

V případě průchozího provedení transformátoru je $N_1 = I$.

Návrh primárního vodiče

Průřez primárního vodiče S_1' potřebný k tomu, aby odolal krátkodobému tepelnému proudu (jednosekundovému) se určí podle vztahu:

$$S_1' = \frac{I_{th}}{\sigma_{th}} \quad [\text{mm}^2, \text{A}, \text{A} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (33)$$

kde je I_{th} je krátkodobý tepelný proud (jednosekundový)

σ_{th} je proudová hustota vodičů primárního vinutí při jmenovitém krátkodobém proudu I_{th} (jednosekundovém), pro měď 180 A/mm^2

Při určování rozměrů (průřezu) primárního vodiče (pasu) s ohledem na dlouhodobé dovolené proudové zatížení se odečtou rozměry, poloha a počet pasů z tabulky pro dovolené proudové zatížení měděných plochých vodičů (viz příloha 1).

Konečný průřez primárního vodiče musí vyhovět na požadavek krátkodobého tepelného proudu i na dlouhodobé proudové zatížení, tzn. primární vodič se dimenzuje na větší z uvedených průřezů. Určením rozměrů primárního vodiče je také v podstatě určen průměr průchozího otvoru zadaného transformátoru D_{ji} .

Postup návrhu magnetického obvodu

Na měřicí jádro se obvykle používá nanokrystalických jader nebo případně železných jader kvality Super - Extra (viz kapitola 2.3.1). Hodnota maximální magnetické indukce B_m u nanokrystalického jádra je $1,25T$ a u železného jádra Su-Ex a N je $2T$.

Hodnota jmenovité magnetické indukce B_n se určí podle vztahu:

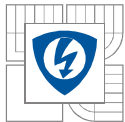
$$B_n = \frac{B_m}{0,9 \cdot n} \quad [\text{T}] \quad (34)$$

kde je B_m je hodnota maximální magnetické indukce materiálu

n je nadproudové číslo (pro měřicí jádro FS, pro jisticí jádro ALF)

Předběžný průřez magnetického jádra S' je dán vztahem:

$$S' = \frac{1,3 \cdot P}{4,44 \cdot f \cdot B_n \cdot N_2 \cdot \xi \cdot I_{2N}} \quad [\text{m}^2, \text{VA}, \text{Hz}, \text{T}, \text{A}] \quad (35)$$



kde je P je zátěž transformátoru proudu

f je frekvence

B_n je jmenovitá magnetická indukce

N_2 je počet sekundárních závitů

ζ je činitel plnění magnetického obvodu

$1,3$ vyjadřuje předběžné ztráty v sekundárním vinutí

Z vypočteného předběžného průřezu jádra lze určit předběžná šířka a výška magnetického jádra.

Nejmenší možný vnitřní průměr magnetického obvodu s navinutým sekundárním vinutím D_{2i}' se určí podle vztahu:

$$D_{2i}' = D_{1i} + 2 \cdot t_i \quad [\text{mm}] \quad (36)$$

kde je D_{1i} je průměr průchozího otvoru transformátoru

t_i je tloušťka izolačního předělu mezi primárním a sekundárním vinutím

Počet vrstev sekundárního vinutí n_2 bude potom dán vztahem:

$$n_2 = \frac{N_2}{\pi \cdot D_{2i}' \cdot \xi_1} \cdot d_{2i} \quad [-, \text{mm}] \quad (37)$$

kde je ξ_1 činitel plnění při skládání vodičů vedle sebe (0,9 – 0,93)

d_{2i} je průměr sekundárního vodiče

Počet vrstev vinutí n_2 se zaokrouhlí na nejbližší vyšší celé číslo a potom výška sekundárního vinutí t_2 bude dána vztahem:

$$t_2 = n_2 \cdot d_{2i} \cdot \xi_2 \quad [\text{mm}] \quad (38)$$

kde je ξ_2 činitel nárůstu výšky vinutí

Předběžný vnitřní průměr pouzdra magnetického obvodu D_{3i}' se určí podle vztahu:

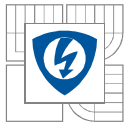
$$D_{3i}' = D_{2i}' + 2 \cdot t_2 \quad [\text{mm}] \quad (39)$$

Předběžný vnitřní průměr magnetického jádra D_i' je tedy dán vztahem:

$$D_i' = D_{3i}' + 2 \cdot s \quad [\text{mm}] \quad (40)$$

kde je s vzdálenost stěny magnetického jádra od stěny pouzdra

Hodnota D_i' se zaokrouhlí nahoru na násobky 10 a tak dostaneme konečný rozměr vnitřního průměru magnetického jádra D_i .



Ze znalosti vnitřního průměru magnetického jádra D_i lze určit vnitřní průměr pouzdra D_{3i} :

$$D_{3i} = D_i - 2 \cdot s \quad [\text{mm}] \quad (41)$$

Vnitřní průměr magnetického obvodu s vinutím D_{2i} potom bude:

$$D_{2i} = D_{3i} - 2 \cdot t_2 \quad [\text{mm}] \quad (42)$$

Obecné podmínky pro volbu rozměrů jádra jsou následující:

- Výška jádra h se volí jako násobek čísla 5,
- Šířka jádra b se volí jako sudé číslo, přičemž platí předpoklad $h > b$.

Z různých technologických důvodů je v technické praxi obvykle snaha dodržet rozměry jádra, které jsou ve výrobě již běžně zavedeny (pokud se nejedná o nový nebo speciální druh transformátoru).

Při dodržení uvedených podmínek jeden z rozměrů zvolíme a druhý vypočteme z následujícího vztahu:

$$S' = h \cdot b \quad [\text{m}^2, \text{m}] \quad (43)$$

Po zaokrouhlení musí platit vztah:

$$S = h \cdot b \geq S' \quad [\text{m}^2, \text{m}] \quad (44)$$

Vnější průměr jádra D_e se potom určí podle vztahu:

$$D_e = D_i + 2 \cdot b \quad [\text{mm}] \quad (45)$$

Střední průměr jádra D bude potom:

$$D = D_i + b \quad [\text{mm}] \quad (46)$$

Výška zapouzdřeného jádra H :

$$H = h + 2 \cdot r \quad [\text{mm}] \quad (47)$$

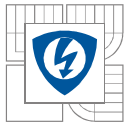
kde je r vzdálenost stěny magnetického jádra od stěny pouzdra

Šířka zapouzdřeného jádra B :

$$B = b + 2 \cdot s \quad [\text{mm}] \quad (48)$$

Konečné rozměry magnetického jádra jsou potom:

VNĚJŠÍ PRŮMĚR x VNITŘNÍ PRŮMĚR x VÝŠKA



Po určení konečných rozměrů magnetického jádra je nutné zvážit, zda jsou jeho rozměry v souladu s následnou technologií výroby transformátoru. Pokud by bylo jádro například příliš tenké, tak by mohlo dojít tomu, že po zalití do epoxidové pryskyřice (při jejím vytvrzování), dojde k mechanickému poškození (promáčknutí) magnetického jádra.

Kontrola nadproudového čísla a výpočet chyb transformátoru proudu

V dnešní době se ke kontrole nadproudového čísla a výpočtu chyb transformátoru používají speciální výpočetní programy. Většina těchto programů je však založena na tomto numerickém výpočtu.

Střední délka závitu sekundárního vinutí l_2 se určí ze vztahu:

$$l_2 = 2 \cdot (B + H) + \pi \cdot t_2 \quad [\text{mm}] \quad (49)$$

Odpor sekundárního vinutí R_2 , což je vlastně vnitřní břemeno transformátoru, se určí ze vztahu:

$$R_2 = \frac{N_2 \cdot l_2 \cdot \rho}{S_2} \quad [\Omega, \text{m}, \Omega \cdot \text{m}, \text{m}^2] \quad (50)$$

kde je ρ měrný odpor mědi

S_2 je průřez vodiče sekundárního vinutí

Induktivní reaktance sekundárního vinutí se zanedbává z důvodu, že jde o toroidní jádro s rovnoměrným rozložením vinutí po celém obvodu.

Vnitřní zátěž při jmenovité proudu P_i je pak dána vztahem:

$$P_i = R_2 \cdot I_{2N}^2 \quad [\text{VA}, \Omega, \text{A}] \quad (51)$$

kde je I_{2N} jmenovitý sekundární proud

Jmenovité břemeno Z_n ($\cos \varphi = 0,8$) se určí podle vztahu:

$$Z_n = \frac{P_n}{I_{2N}^2} \quad [\Omega, \text{VA}, \text{A}] \quad (52)$$

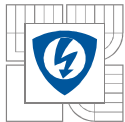
kde je P_n jmenovitá zátěž transformátoru

Činná složka jmenovitého břemene R je pak dána vztahem:

$$R = Z_n \cdot \cos \beta \quad [\Omega] \quad (53)$$

Jalová složka jmenovitého břemene X je dána vztahem:

$$X = Z_n \cdot \sin \beta \quad [\Omega] \quad (54)$$



Příčemž musí platit:

$$Z_N = \sqrt{R^2 + X^2} \quad [\Omega] \quad (55)$$

Činná složka jmenovité zátěže P_c bude:

$$P_c = P_N \cdot \cos\varphi \quad [\text{VA}] \quad (56)$$

Jalová složka jmenovité zátěže P_j :

$$P_j = P_N \cdot \sin\beta \quad [\text{VA}] \quad (57)$$

Celková zátěž transformátoru při jmenovitém proudu P_c :

$$P_c = \sqrt{(P_c + P_i)^2 + P_j^2} \quad [\text{VA}] \quad (58)$$

Hodnota jmenovité magnetické indukce při jmenovité zátěži a jmenovitém proudu B_n :

$$B_n = \frac{P_c}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot I_2} \quad [\text{T}, \text{VA}, \text{Hz}, \text{m}^2, \text{A}] \quad (59)$$

Pro kontrolu nadproudového čísla n platí vztah:

$$n = \frac{B_m}{0,9 \cdot B_n} \quad [-] \quad (60)$$

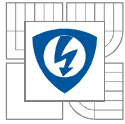
Pokud po kontrole nadproudového čísla nejsou splněny podmínky zadání nebo normy ČSN EN 60044 – 1 musí být upraven průřez magnetického jádra, případně průřez sekundárního vodiče.

Nyní se provede kontrola chyb zadaného transformátoru. Dle normy ČSN EN 60044 – 1 se vypočítají chyby pro 25% a 100% jmenovitého břemene a 5, 20, 100 a 120% jmenovitého proudu. Tyto chyby musí ležet v dovoleném rozmezí chyb dle tab. 1 a 4.

Skutečná hodnota magnetické indukce B_n pro 5% jmenovitého proudu a 100% jmenovitého břemene se určí podle vztahu:

$$B_n^{0,05} = \frac{\sqrt{[(R+R_2) \cdot (0,05 \cdot I_{2N})^2]^2 + [X \cdot (0,05 \cdot I_{2N})^2]^2}}{222 \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot 0,05 \cdot I_{2N}} \quad [\text{T}, \Omega, \text{A}, \text{m}^2] \quad (61)$$

Nyní se pro toto vypočtené B_n určí celková intenzita magnetického pole H_0 z magnetizační charakteristiky (příloha 2). Dále potom se vypočte činná složka intenzity magnetického pole H_g podle vztahu:



$$H_g = \frac{p \cdot \gamma}{4,44 \cdot f \cdot B_n} \quad [\text{A/m, W/kg, kg/m}^3, \text{Hz, T}] \quad (62)$$

kde jsou p měrné ztráty při magnetické indukci B_n , určeno z charakteristiky (příloha 2)
 γ měrná hmotnost feromagnetického materiálu [kg/m^3]

Nyní lze vypočítat celková chyba transformátoru proudu přepočtená na sekundární počet závitů I_{20} :

$$I_{20} = H_0 \cdot l_m \cdot \frac{1}{N_2} \quad [\text{A, A/m, m}] \quad (63)$$

kde l_m je střední délka magnetického jádra

Střední délka magnetického jádra l_m :

$$l_m = \pi \cdot D \quad [\text{m}] \quad (64)$$

Úhel β_c se vypočte dle vztahu:

$$\beta_c = \arctg \frac{X}{R+R_2} \quad [^\circ, \Omega, \Omega, \Omega] \quad (65)$$

Úhel γ lze vypočíst:

$$\gamma = \arcsin \frac{H_g}{H_0} \quad [^\circ, \text{A/m, A/m}] \quad (66)$$

Pro další úhel α platí vztah:

$$\alpha = 90 - (\beta_c + \gamma) \quad [^\circ] \quad (67)$$

Nyní lze určit chyba proudu ε_i :

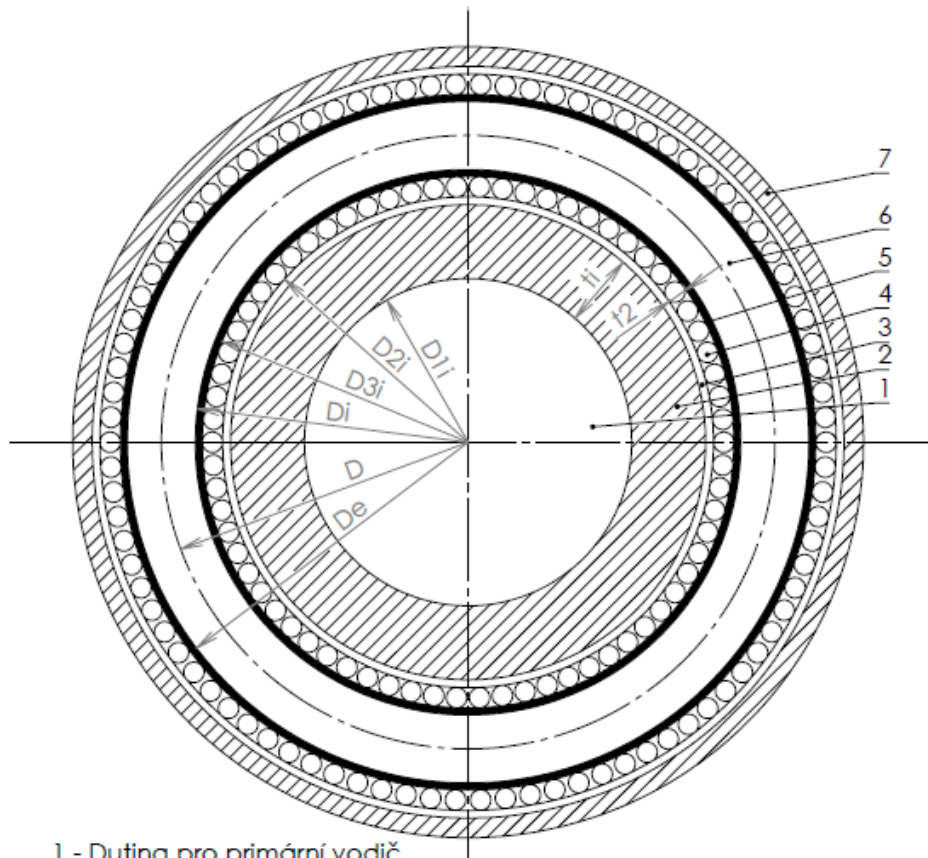
$$\varepsilon_i = - \frac{I_{20}}{0,05 \cdot I_{2N}} \cos \alpha \cdot 100 \quad [\%, \text{A, A}] \quad (68)$$

Chyba úhlu δ_i :

$$\delta_i = 3440 \cdot \frac{I_{20}}{0,05 \cdot I_{2N}} \cdot \sin \alpha \quad [\%, \text{A, A}] \quad (69)$$

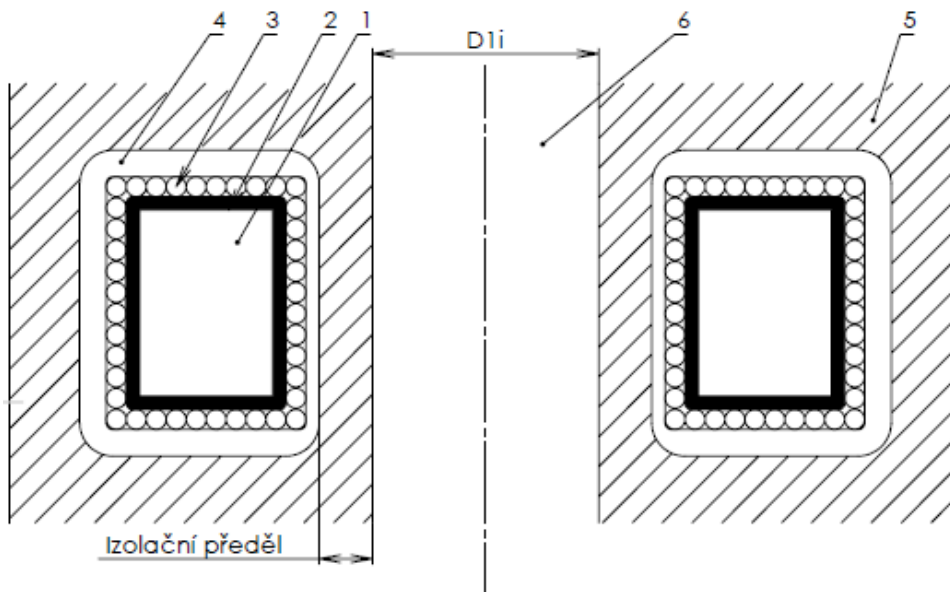
Stejným způsobem musí být vypočítány všechny výše zmíněné chyby proudu a chyby úhlu, které musí ležet v povolených mezích.

Na obrázcích 16 a 17 jsou načrtnuty řezy transformátorem, na kterých jsou zakótovány některé důležité rozměry.



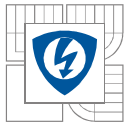
- 1 - Dutina pro primární vodič
- 2 - Izolační předěl
- 3 - Odpružení
- 4 - Sekundární vinutí
- 5 - Pouzdro
- 6 - Magnetické jádro
- 7 - Epoxid

Obrázek 16: Řez transformátoru proudu bez primárního vodiče



- 1 - Magnetické jádro
- 2 - Pouzdro
- 3 - Sekundární vinutí
- 4 - Odpružení
- 5 - Epoxid
- 6 - Dutina pro primární vodič

Obrázek 17: Řez transformátorem proudu 2



3 NÁVRH PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU PROUDU

Přístrojové transformátory proudu se obecně navrhují podle těchto základních technických parametru:

- jmenovitý primární proud $I_{1N} = 4000A$
- jmenovitý sekundární proud $I_{2N} = 5A$
- jmenovitý kmitočet $f = 50Hz$
- jmenovité napětí rozvodné soustavy $10kV$
- $I_{th}/I_{dyn} = 50/125kA$
- **Měřicí jádro:**
 - jmenovitá zátěž $P_n = 15VA$
 - třída přesnosti $0,5$
 - nadproudové číslo $FS10$
- **Jisticí jádro:**
 - jmenovitá zátěž $P_n = 15VA$
 - třída přesnosti $5P$
 - nadproudový činitel (ALF) 20

Na základě vztahů z kapitoly 1 a 2 bude proveden návrh transformátoru.

Nejdříve je tedy nutné zvolit, v jakém provedení bude zadaný transformátor navržen. Jelikož jde o výrobek, který si trh žádá (dohoda se zákazníkem), bude zvoleno provedení **průchozí** (obr. 2).

Výpočet převodu transformátoru se provede dle vztahu (32):

$$k_i = \frac{I_{1N}}{I_{2N}} = \frac{4000}{5} = 800$$

Jde o transformátor s jedním primárním závitem $N_1 = 1$, z čehož plyne počet sekundárních závitů dle vztahu (32):

$$N_2 = k_i \cdot N_1 = 800 \cdot 1 = 800$$

Návrh primárního vodiče:

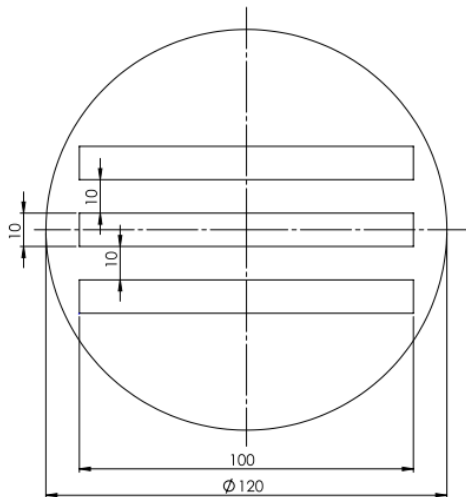
Průřez primárního vodiče S_1' potřebný k tomu, aby odolal krátkodobému tepelnému proudu (jednosekundovému) dle vztahu (33):

$$S_1' = \frac{I_{th}}{\sigma_{th}} = \frac{50 \cdot 10^3}{180} = 277,78 \text{ mm}^2$$

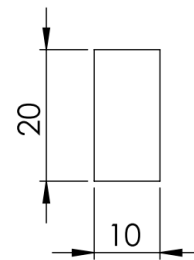
S ohledem na dlouhodobé dovolené proudové zatížení primárních vodičů se odečetl z tabulky v příloze 1 průřez a poloha měděných pasů pro proud $I_{IN} = 4000A$. Odečtený průřez je:

$$S'_1 = 3 \cdot 100 \cdot 10 = 3000 \text{ mm}^2$$

Jelikož je průřez na dlouhodobé proudové zatížení větší, než na krátkodobý tepelný proud (jednosekundový), bude se primární vodič dimenzovat podle něj. Tyto měděné pasy budou tři vodorovně pod sebou tak, jak ukazuje obr. 19.



Obrázek 19: Schématické zobrazení polohy primárního vodiče v transformátoru



Obrázek 18: Předběžný průřez měřicího jádra transformátoru

Z polohy a počtu pasů primárního vodiče byl určen průměr průchozího otvoru pro primární vodič $D_{Ii} = 120 \text{ mm}$.

Návrh měřicího jádra:

Pro měřicí jádro bylo zvoleno nanokrystalové jádro, které má $B_m = 1,25 \text{ T}$.

Hodnota jmenovité magnetické indukce B_n se určí dle vztahu (34):

$$B_n = \frac{B_m}{0,9 \cdot FS} = \frac{1,25}{0,9 \cdot 10} = 0,1389 \text{ T}$$

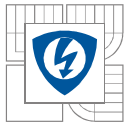
Předběžný průřez magnetického jádra S'_n se určí podle vztahu (35):

$$S'_n = \frac{1,3 \cdot P_n}{4,44 \cdot f \cdot B_n \cdot \xi \cdot I_{2N} \cdot N_2} = \frac{1,3 \cdot 15}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,1389 \cdot 0,75 \cdot 5 \cdot 800} = 2,108 \text{ cm}^2$$

Z vypočteného předběžného průřezu jádra lze určit předběžná šířka a výška magnetického jádra viz obr. 18.

Tloušťka izolačního předělu byla zvolena $t_i = 20 \text{ mm}$. Tato hodnota obsahuje určitou rezervu kvůli konstrukčním důvodům.

Nejmenší možný vnitřní průměr magnetického obvodu s navinutým sekundárním vinutím D_{2i} bude podle vztahu (36):



$$D'_{2i} = D_{1i} + 2 \cdot t_i = 120 + 2 \cdot 20 = 160 \text{ mm}$$

Jako sekundární vodič je zvolen měděný drát o průměru $d_{2i} = 1,6 \text{ mm}$.

Počet vrstev sekundárního vinutí n_2 dle vztahu (37) bude:

$$n_2 = \frac{N_2}{\pi \cdot D'_{2i} \cdot \xi_1} \cdot d_{2i} = \frac{800}{\pi \cdot 160 \cdot 0,9} \cdot 1,6 = 2,83 \approx 3$$

Výška sekundárního vinutí t_2 dle vztahu (38) bude:

$$t_2 = n_2 \cdot d_{2i} \cdot \xi_2 = 3 \cdot 1,6 \cdot 1,15 = 5,52 \text{ mm}$$

Předběžný vnitřní průměr pouzdra magnetického obvodu D'_{3i} bude vypočítán dle vztahu (39):

$$D'_{3i} = D'_{2i} + 2 \cdot t_2 = 160 + 2 \cdot 5,52 = 171,04 \text{ mm}$$

Předběžný vnitřní průměr jádra D'_i se určí dle vztahu (40):

$$D'_i = D'_{3i} + 2 \cdot s = 171,04 + 2 \cdot 5 = 181,04 \text{ mm}$$

Vnitřní průměr magnetického jádra tedy bude $D_i = 190 \text{ mm}$.

Vnitřní průměr pouzdra D_{3i} se vypočte ze vztahu (41):

$$D_{3i} = D_i - 2 \cdot s = 190 - 2 \cdot 5 = 180 \text{ mm}$$

Vnitřní průměr magnetického obvodu s vinutím D_{2i} se vypočte dle vztahu (42):

$$D_{2i} = D_{3i} - 2 \cdot t_2 = 180 - 2 \cdot 5,52 = 168,96 \text{ mm}$$

Podle podmínek pro volbu výšky a šířky jádra v kapitole 2.4 byly zvoleny následující rozměry:

Výška jádra $h = 20 \text{ mm}$

Šířka jádra $b = 12 \text{ mm}$

Po určení těchto hodnot musí platit vztah (44):

$$S = h \cdot b \geq S' \Rightarrow 240 \text{ mm}^2 = 20 \cdot 12 \geq 210,8 \text{ mm}^2$$

Vnější průměr jádra D_e se vypočte dle vztahu (45):

$$D_e = D_i + 2 \cdot b = 190 + 2 \cdot 12 = 214 \text{ mm}$$

Střední průměr jádra D se vypočte dle vztahu (46):

$$D = D_i + b = 190 + 12 = 202 \text{ mm}$$

Výška zapouzdřeného jádra H se vypočte dle vztahu (47):

$$H = h + 2 \cdot r = 20 + 2 \cdot 5 = 30 \text{ mm}$$

Šířka zapouzdřeného jádra B se vypočte dle vztahu (48):

$$B = b + 2 \cdot s = 12 + 2 \cdot 5 = 22 \text{ mm}$$

Konečné rozměry magnetického jádra jsou:

214 x 190 x 20 mm

Kontrola nadproudového čísla a výpočet chyb měřicího jádra

Střední délka závitů sekundárního vinutí l_2 se vypočte dle vztahu (49):

$$l_2 = 2 \cdot (B + H) + \pi \cdot t_2 = 2 \cdot (22 + 30) + \pi \cdot 5,52 = 121,34 \text{ mm}$$

Odpor sekundárního vinutí R_2 se určí dle vztahu (50):

$$R_2 = \frac{N_2 \cdot l_2 \cdot \rho}{S_2} = \frac{800 \cdot 0,12134 \cdot 1,78 \cdot 10^{-8}}{2,01 \cdot 10^{-6}} = 0,86 \Omega$$

Průřez sekundárního vodiče S_2 se vypočte ze známého vztahu:

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d_{i2}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,6^2}{4} = 2,01 \text{ mm}^2$$

Vnitřní zátěž při jmenovitém proudu P_i se určí dle vztahu (51):

$$P_i = R_2 \cdot I_{2N}^2 = 0,86 \cdot 5^2 = 21,5 \text{ VA}$$

Jmenovité břemeno Z_N se určí dle vztahu (52):

$$Z_N = \frac{P_N}{I_{2N}^2} = \frac{15}{5^2} = 0,6 \Omega$$

Činná složka jmenovitého břemene R se potom vypočte dle vztahu (53):

$$R = Z_N \cdot \cos\varphi = 0,6 \cdot 0,8 = 0,48 \Omega$$

Jalová složka jmenovitého břemene X je dána vztahem (54):

$$X = Z_N \cdot \sin\varphi = 0,6 \cdot 0,6 = 0,36 \Omega$$

Musí také platit vztah (55):

$$Z_N = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{0,48^2 + 0,36^2} = 0,6 \Omega$$

Činná složka jmen. zátěže P_ξ se dále určí vztahem (56):

$$P_\xi = P_N \cdot \cos\varphi = 15 \cdot 0,8 = 12 \text{ VA}$$

Jalová složka jmen. zátěže P_j se určí dle vztahu (57):

$$P_j = P_N \cdot \sin\beta = 15 \cdot 0,6 = 9 \text{ VA}$$

Celková zátěž transformátoru P_c při jmenovitém proudu je potom udána vztahem (58):

$$P_c = \sqrt{(P_\xi + P_i)^2 + P_j^2} = \sqrt{(12 + 21,5)^2 + 9^2} = 34,69 \text{ VA}$$

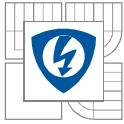
Hodnota jmenovité magnetické indukce při jmenovité zátěži a jmenovitém proudu B_n se vypočte dle vztahu (59):

$$B_n = \frac{P_c}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot I_2} = \frac{34,69}{4,44 \cdot 50 \cdot 240 \cdot 10^{-6} \cdot 0,75 \cdot 800 \cdot 5} = 0,217 \text{ T}$$

Kontrola nadproudového čísla pro měřicí jádro FS se vypočte vztahem (60):

$$FS = \frac{B_m}{0,9 \cdot B_n} = \frac{1,25}{0,9 \cdot 0,217} = 6,4$$

Nadproudové číslo FS pro měřicí jádro vyšlo v pořádku.



Skutečná hodnota mag. indukce pro 100% jmen. břemene a 5% jmen. proudu se určí dle (61):

$$B_n^{0,05} = \frac{\sqrt{[(R + R_2) \cdot (0,05 \cdot I_{2N})]^2 + [X \cdot (0,05 \cdot I_{2N})]^2}}{222 \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot 0,05 \cdot I_{2N}} \\ = \frac{\sqrt{[(0,48 + 0,86) \cdot (0,05 \cdot 5)]^2 + [0,36 \cdot (0,05 \cdot 5)]^2}}{222 \cdot 240 \cdot 10^{-6} \cdot 0,75 \cdot 800 \cdot 0,05 \cdot 5} = 10,9 \text{ mT}$$

Celková intenzita mag. pole $H_0 = 0,1274 \text{ A/m}$

Měrné ztráty $p_{Nc} = 0,11 \cdot 10^{-4} \text{ W/kg}$

Měrná hmotnost nanokrystalického materiálu $\gamma_{Nc} = 5614 \text{ kg/m}^3$

Činná složka intenzity mag. pole H_g se určí dle (62):

$$H_g = \frac{p_{Nc} \cdot \gamma_{Nc}}{4,44 \cdot f \cdot B_{sk}} = \frac{0,11 \cdot 10^{-4} \cdot 5614}{4,44 \cdot 50 \cdot 10,9 \cdot 10^{-3}} = 0,0255 \text{ A/m}$$

Celková chyba proudu přepočítaná na počet sekundárních závitů I_{20} dle (63):

$$I_{20} = H_0 \cdot l_m \cdot \frac{1}{N_2} = 0,1274 \cdot 0,6346 \cdot \frac{1}{800} = 1,0106 \cdot 10^{-4} \text{ A}$$

Střední délka magnetického jádra l_m se určí dle (64):

$$l_m = \pi \cdot D = \pi \cdot 202 = 634,6 \text{ mm}$$

Úhel β_c se určí dle (65):

$$\beta_c = \arctg \frac{X}{R + R_2} = \arctg \frac{0,36}{0,48 + 0,86} = 15,04^\circ$$

Úhel γ se určí dle (66):

$$\gamma = \arcsin \frac{H_g}{H_0} = \arcsin \frac{0,0255}{0,1274} = 11,55^\circ$$

Úhel α se určí dle (67):

$$\alpha = 90 - (\beta_c + \gamma) = 90 - (15,04 + 11,55) = 63,41^\circ$$

Chyba proudu ε_i je dle (68):

$$\varepsilon_i = -\frac{I_{20}}{0,05 \cdot I_{2N}} \cos \alpha \cdot 100 = -\frac{1,0106 \cdot 10^{-4}}{0,05 \cdot 5} \cdot \cos(63,41) \cdot 100 = -0,01809 \%$$

Chyba úhlu je dle (69):

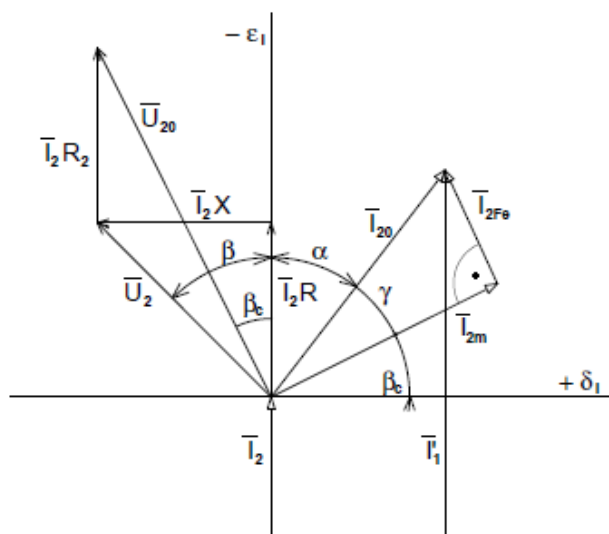
$$\delta_i = 3440 \cdot \frac{I_{20}}{0,05 \cdot I_{2N}} \cdot \sin \alpha = 3440 \cdot \frac{1,0106 \cdot 10^{-4}}{0,05 \cdot 5} \cdot \sin(36,41) = 1,24'$$

Chyba proudu ε_i a chyba úhlu δ_i pro 100% jmenovitého břemene a 5% jmenovitého proudu leží v dovolených mezích. Tento výpočet byl proveden pro všechny hodnoty, které vyžaduje

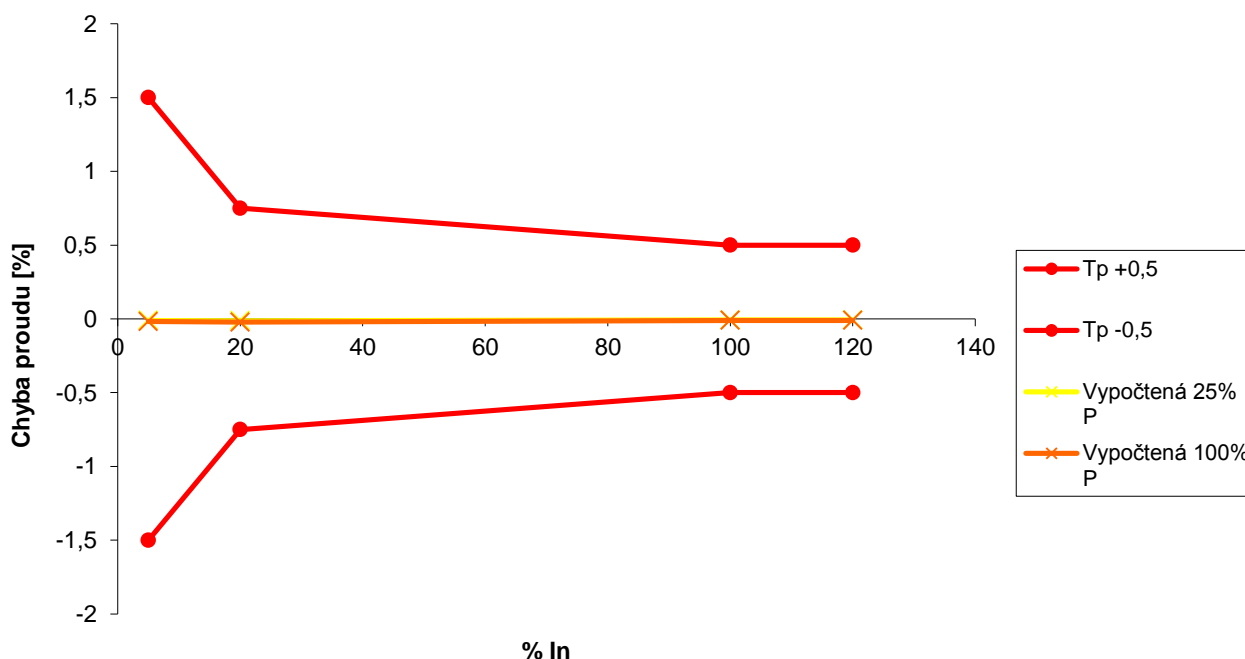
norma. Hodnoty jsou zapsány v tabulce 7 a zobrazeny na obr. 21 a 22. Obr. 20 je přiložen jako vysvětlující k výpočtu některých hodnot při určování chyby proudu a úhlu.

P=15VA	Chyba proudu [%]				Chyba úhlu [°]			
	5%I _n	20%I _n	100%I _n	120%I _n	5%I _n	20%I _n	100%I _n	120%I _n
100% P	-0,01809	-0,022	-0,0105	-0,00988	1,24	0,31	0,0892	0,0867
25% P	-0,01	-0,012	-0,00723	-0,00738	1	0,53	0,2	0,15

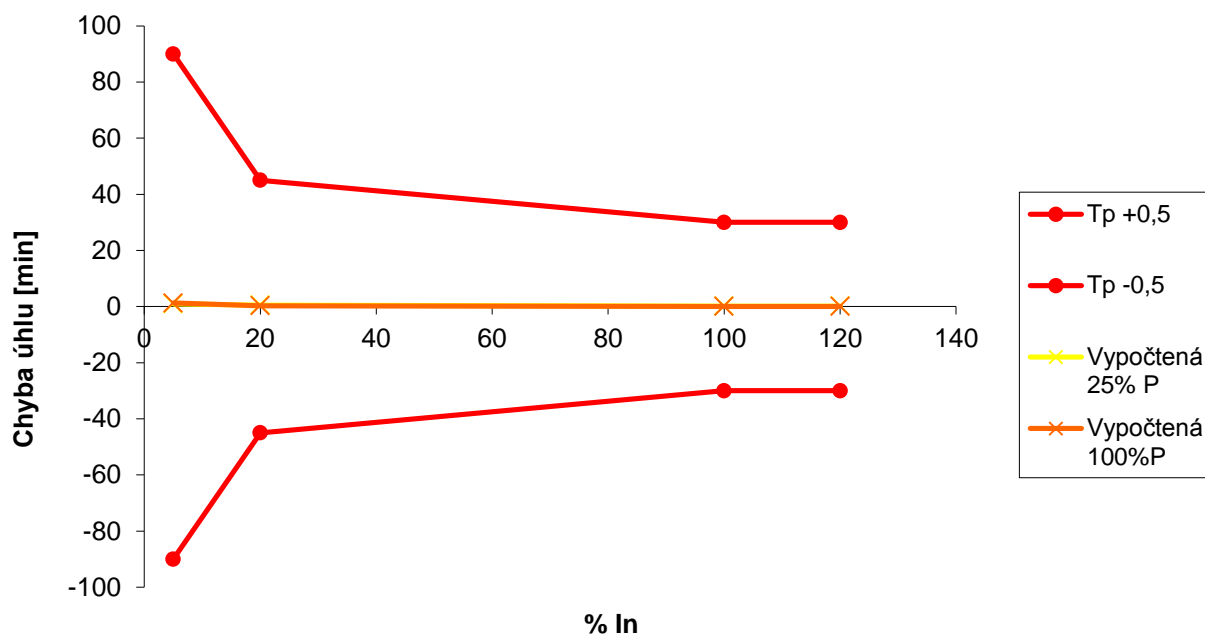
Tabulka 7: Vypočtené chyby proudu a úhlu měřicího jádra



Obrázek 20: Fázorový diagram – pro výpočet



Obrázek 21: Vypočtené chyby proudu měřicího jádra



Obrázek 22: Vypočtené chyby úhlu měřicího jádra

Z obr. 21 je patrné, že chyba proudu je velice malá a do třídy přesnosti 0,5 se vejde s velkou rezervou. Podobně tomu je i u chyby úhlu, kterou zobrazuje obr. 22.

Návrh jisticího jádra:

Jisticí jádro bude mít stejný vnější a vnitřní průměr jako jádro měřicí, řešit se bude pouze jeho výška (průřez).

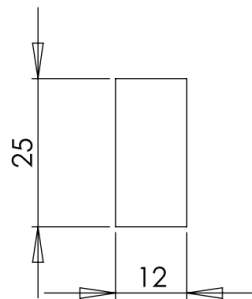
Hodnota jmenovité magnetické indukce B_n se určí podle vztahu (34):

$$B_n = \frac{B_m}{0,9 \cdot ALF} = \frac{1,97}{0,95 \cdot 20} = 0,10369 \text{ T}$$

Předběžný průřez magnetického jádra S_n' se určí dle vztahu (35):

$$S_n' = \frac{1,3 \cdot P_n}{4,44 \cdot f \cdot B_n \cdot \xi \cdot I_{2N} \cdot N_2} = \frac{1,3 \cdot 15}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,10369 \cdot 800 \cdot 0,97 \cdot 5} = 2,18 \text{ cm}^2$$

Z vypočteného předběžného průřezu jádra lze určit předběžná šířka a výška magnetického jádra viz obr. 23.



Obrázek 23: Předběžný průřez jisticího jádra transformátoru

Podle podmínek pro volbu výšky a šířky jádra v kapitole 2.4 byly zvoleny následující rozměry:

Výška jádra $h = 25 \text{ mm}$

Šířka jádra $b = 12 \text{ mm}$

Po určení těchto hodnot musí platit vztah (44):

$$S = h \cdot b \geq S' \Rightarrow 300 \text{ mm}^2 = 25 \cdot 12 \geq 218 \text{ mm}^2$$

Výška zapouzdřeného jádra se vypočte ze vztahu (47):

$$H = h + 2 \cdot r = 25 + 2 \cdot 5 = 35 \text{ mm}$$

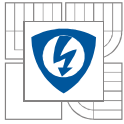
Vnější průměr jádra D_e , střední průměr jádra D , vnitřní průměr jádra D_i a šířka zapouzdřeného jádra B mají stejnou velikost jako u jádra měřicího:

$$D_e = 214 \text{ mm}$$

$$D = 202 \text{ mm}$$

$$D_i = 190 \text{ mm}$$

$$B = 22 \text{ mm}$$



Jako sekundární vodič je zvolen měděný drát o průměru $d_{2i} = 1,8 \text{ mm}$.

Počet vrstev sekundárního vinutí n_2 bude dle vztahu (37):

$$n_2 = \frac{N_2}{\pi \cdot D_{2i} \cdot \xi_1} \cdot d_{2i} = \frac{800}{\pi \cdot 190 \cdot 0,9} \cdot 1,8 = 2,68 \approx 3$$

Výška sekundárního vinutí t_2 dle vztahu (38) bude:

$$t_2 = n_2 \cdot d_{2i} \cdot \xi_2 = 3 \cdot 1,8 \cdot 1,15 = 6,21 \text{ mm}$$

Kontrola nadproudového činitele a výpočet chyb jisticího jádra:

Střední délka závitů sekundárního vinutí l_2 se vypočte dle vztahu (49):

$$l_2 = 2 \cdot (B + H) + \pi \cdot t_2 = 2 \cdot (22 + 35) + \pi \cdot 6,21 = 133,5 \text{ mm}$$

Odpor sekundárního vinutí R_2 se určí dle vztahu (50):

$$R_2 = \frac{N_2 \cdot l_2 \cdot \rho}{S_2} = \frac{800 \cdot 0,1335 \cdot 1,78 \cdot 10^{-8}}{2,55 \cdot 10^{-6}} = 0,76 \Omega$$

Průřez sekundárního vodiče S_2 se vypočte ze známého vztahu:

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d_{i2}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,8^2}{4} = 2,55 \text{ mm}^2$$

Vnitřní zátěž při jmenovitém proudu P_i se určí dle vztahu (51):

$$P_i = R_2 \cdot I_{2N}^2 = 0,76 \cdot 5^2 = 19 \text{ VA}$$

Jmenovité břemeno Z_n a jeho složky (R , X , P_c , P_j) mají stejnou velikost jako u měřicího jádra: $Z_n = 0,6 \Omega$

$$R = 0,48 \Omega$$

$$X = 0,36 \Omega$$

$$P_c = 12 \text{ VA}$$

$$P_j = 9 \text{ VA}$$

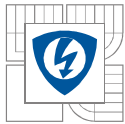
Celková zátěž transformátoru P_c při jmenovitém proudu je potom udána vztahem (58):

$$P_c = \sqrt{(P_c + P_i)^2 + P_j^2} = \sqrt{(12 + 19)^2 + 9^2} = 32,28 \text{ VA}$$

Hodnota jmenovité magnetické indukce při jmenovité zátěži a jmenovitém proudu B_n se vypočte dle vztahu (59):

$$B_n = \frac{P_c}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot I_2} = \frac{32,28}{4,44 \cdot 50 \cdot 300 \cdot 10^{-6} \cdot 0,97 \cdot 800 \cdot 5} = 0,1249 \text{ T}$$

Kontrola nadproudového činitele pro jisticí jádro ALF se vypočte vztahem (60):



$$ALF = \frac{B_m}{0,9 \cdot B_{sk}} = \frac{1,97}{0,95 \cdot 0,1249} = 16,6$$

Nadprůdový činitel ALF nedosahuje požadované hodnoty, která je 20, proto se musí zvětšit průřez magnetického obvodu. Nové rozměry magnetického obvodu byly zvoleny následovně:

$$h = 50 \text{ mm}$$

$$b = 12 \text{ mm}$$

$$S = h \cdot b = 50 \cdot 12 = 600 \text{ mm}^2$$

Nyní se znovu přepočítají potřebné hodnoty, aby se zjistilo, zda je nový průřez magnetického obvodu dostačující.

Výška zapouzdřeného jádra se vypočte ze vztahu (47):

$$H = h + 2 \cdot r = 50 + 2 \cdot 5 = 60 \text{ mm}$$

Střední délka závitu sekundárního vinutí l_2 se vypočte dle vztahu (49):

$$l_2 = 2 \cdot (B + H) + \pi \cdot t_2 = 2 \cdot (22 + 60) + \pi \cdot 6,21 = 183,5 \text{ mm}$$

Odpor sekundárního vinutí R_2 se určí dle vztahu (50):

$$R_2 = \frac{N_2 \cdot l_2 \cdot \rho}{S_2} = \frac{800 \cdot 0,1835 \cdot 1,78 \cdot 10^{-8}}{2,55 \cdot 10^{-6}} = 1,03 \Omega$$

Vnitřní zátěž při jmenovitém proudu P_i se určí dle vztahu (51):

$$P_i = R_2 \cdot I_{2N}^2 = 1,03 \cdot 5^2 = 25,75 \text{ VA}$$

Celková zátěž transformátoru P_c při jmenovitém proudu je potom udána vztahem (58):

$$P_c = \sqrt{(P_\xi + P_i)^2 + P_j^2} = \sqrt{(12 + 25,75)^2 + 9^2} = 38,81 \text{ VA}$$

Hodnota jmenovité magnetické indukce při jmenovité zátěži a jmenovitém proudu B_n se vypočte dle vztahu (59):

$$B_n = \frac{P_c}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot I_2} = \frac{38,81}{4,44 \cdot 50 \cdot 600 \cdot 10^{-6} \cdot 0,97 \cdot 800 \cdot 5} = 0,075 \text{ T}$$

Kontrola nadprůdového činitele pro jisticí jádro ALF se vypočte vztahem (60):

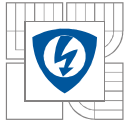
$$ALF = \frac{B_m}{0,9 \cdot B_n} = \frac{1,97}{0,95 \cdot 0,075} = 27,7$$

Nyní už je ALF dostačující. Zvětšení průřezu magnetického obvodu pomohlo.

Konečné rozměry jisticího jádra jsou tedy:

$$\mathbf{214 \times 190 \times 50 \text{ mm}}$$

Skutečná hodnota mag. indukce pro 100% jmen. břemene a 100% jmen. proudu se určí dle (61):



$$B_n^{100} = \frac{\sqrt{[(R + R_2) \cdot (1 \cdot I_{2N})^2]^2 + [X \cdot (1 \cdot I_{2N})^2]^2}}{222 \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot 0,05 \cdot I_{2N}}$$
$$= \frac{\sqrt{[(0,48 + 1,03) \cdot (1 \cdot 5)^2]^2 + [0,36 \cdot (1 \cdot 5)^2]^2}}{222 \cdot 600 \cdot 10^{-6} \cdot 0,97 \cdot 800 \cdot 1 \cdot 5} = 75,1 \text{ mT}$$

Celková intenzita mag. pole $H_0 = 2,0013 \text{ A/m}$

Měrné ztráty $p_{Fe} = 0,00183 \text{ W/kg}$

Měrná hmotnost nanokrystalického materiálu $\gamma_{Fe} = 7650 \text{ kg/m}^3$

Činná složka intenzity mag. pole H_g se určí dle (62):

$$H_g = \frac{p_{Fe} \cdot \gamma_{Fe}}{4,44 \cdot f \cdot B_{sk}} = \frac{0,00183 \cdot 7650}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0751} = 0,84 \text{ A/m}$$

Celková chyba proudu přepočítaná na počet sekundárních závitů I_{20} dle (63):

$$I_{20} = H_0 \cdot l_m \cdot \frac{1}{N_2} = 2,0013 \cdot 0,6346 \cdot \frac{1}{800} = 1,5876 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

Střední délka magnetického jádra l_m se určí dle (64):

$$l_m = \pi \cdot D = \pi \cdot 202 = 634,6 \text{ mm}$$

Úhel β_c se určí dle (65):

$$\beta_c = \arctg \frac{X}{R + R_2} = \arctg \frac{0,36}{0,48 + 1,03} = 13,41^\circ$$

Úhel γ se určí dle (66):

$$\gamma = \arcsin \frac{H_g}{H_0} = \arcsin \frac{0,84}{2,0013} = 24,82^\circ$$

Úhel α se určí dle (67):

$$\alpha = 90 - (\beta_c + \gamma) = 90 - (13,41 + 24,82) = 51,77^\circ$$

Chyba proudu ε_i je dle (68):

$$\varepsilon_i = -\frac{I_{20}}{1 \cdot I_{2N}} \cos \alpha \cdot 100 = -\frac{1,5876 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 5} \cdot \cos(51,77) \cdot 100 = -0,02 \%$$

Chyba úhlu je dle (69):

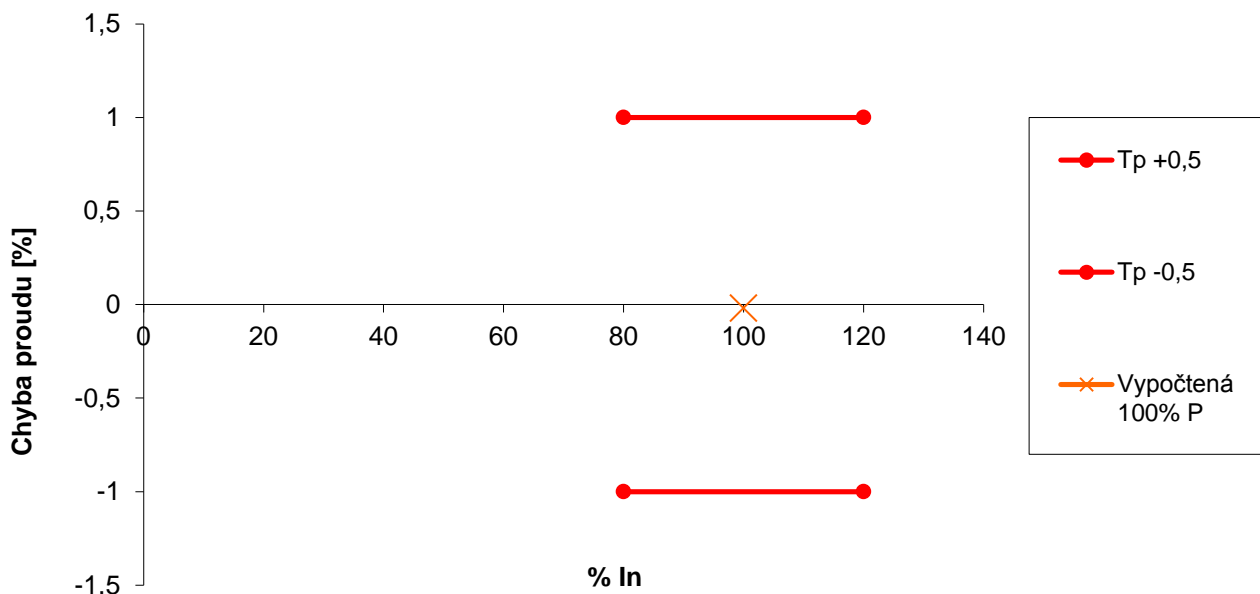
$$\delta_i = 3440 \cdot \frac{I_{20}}{1 \cdot I_{2N}} \cdot \sin \alpha = 3440 \cdot \frac{1,5876 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 5} \cdot \sin(51,77) = 0,86'$$

Chyba proudu ε_i a chyba úhlu δ_i pro 100% jmenovitého břemene a 100% jmenovitého proudu leží v dovolených mezích. Více hodnot se již počítat nemusí, jelikož pro jisticí jádra

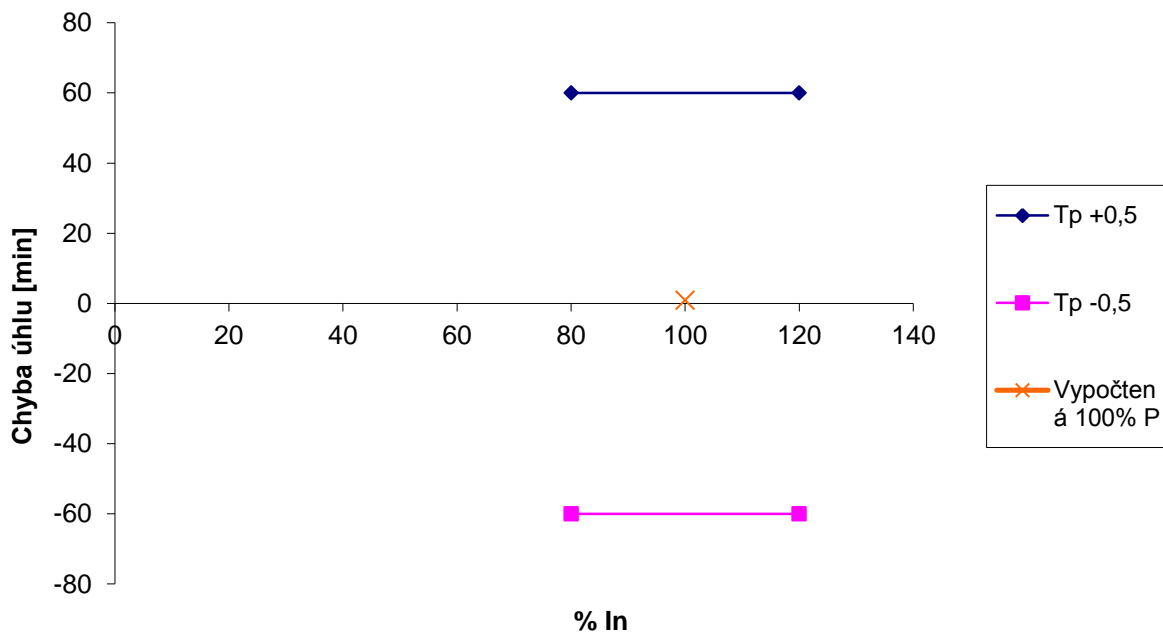
udává norma jen jednu hodnotu. Vypočtené hodnoty jsou zapsány v tabulce 8 a zobrazeny na obr. 24 a 25.

Vypočtené hodnoty		
Tp	Chyba proudu [%]	Chyba úhlu [']
	100%I _n	100%I _n
5P	-0,02	0,86

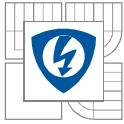
Tabulka 8: Vypočtené chyby proudu a úhlu pro jisticí jádra



Obrázek 24: Vypočtené chyby proudu jisticího jádra



Obrázek 25: Vypočtené chyby úhlu jisticího jádra

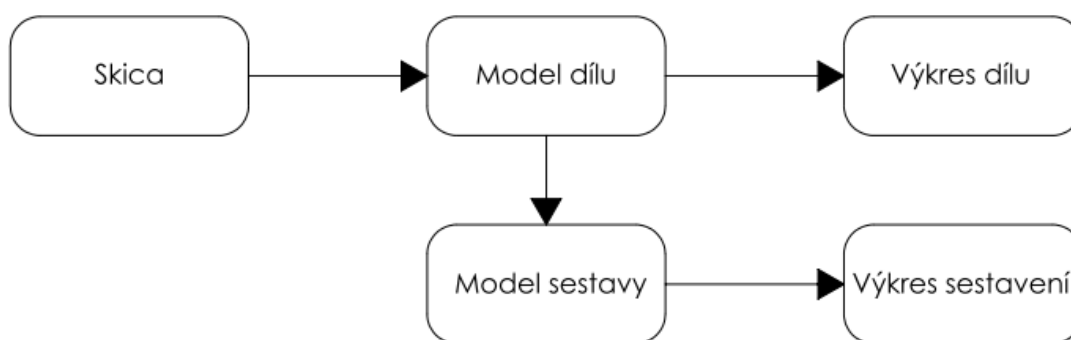


Podobně, jak tomu bylo u měřicího jádra, tak i u jistícího jádra je chyba proudu a chyba úhlu velice malá a s velkou rezervou se vejdou do zadané třídy přesnosti 5P.

4 3D MODEL TRANSFORMÁTORU PROUDU

Pro vytvoření 3D modelu navrženého transformátoru byl použit program SolidWorks Standard 2014. Jde o parametrický 3D modelář, který umožňuje objemové a plošné modelování, práci s rozsáhlými sestavami a automatické generování výrobních výkresů. SolidWorks umožňuje spojení mezi modelováním dílu, sestavy a vytvoření výkresu. Asociativita mezi dílem, sestavou a výkresem znamená, že změny provedené v jednom se promítnou do dalších – všechny díly, sestavy a výkresy jsou tedy neustále aktuální. [7]

Při práci v SolidWorks se začíná vytvořením skici, následně se vytvoří model dílu, na něm se provedou úpravy a definují vlastnosti. Na základě vymodelovaného dílu se vytvoří výkres dílu. Z více vymodelovaných dílu se vytvoří model sestavy a z něj následně výkres sestavení. [7]

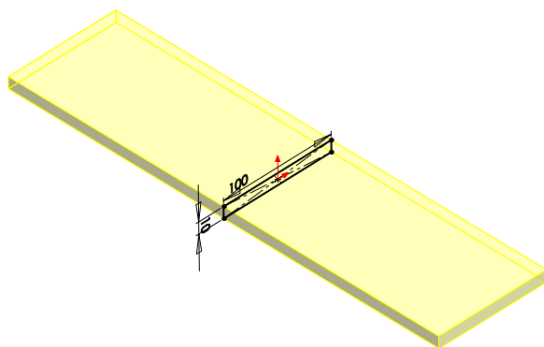


Obrázek 26: Princip SolidWorks

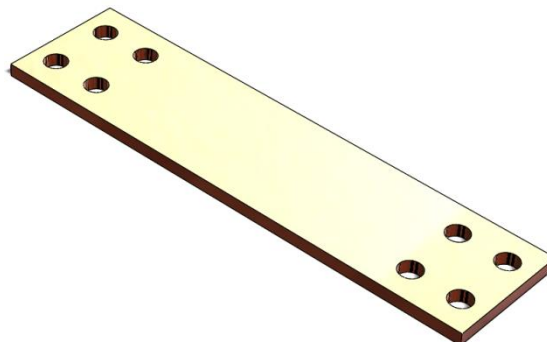
Při 3D modelování lze obecně dosáhnout výsledku různými způsoby, v této kapitole bude popsán pouze jeden z nich.

4.1 Primární vodič

Princip modelování primárního vodiče je naznačen na obr. 27 a 28. Nejdříve se nakreslila jednoduchá 2D skica ve tvaru obdélníku, ze které se následně použitím funkce *přidání vysunutím* udělal 3D díl. Pomocí funkce *průvodce dírami* byly do dílu udělány díry. Jako poslední se zvolil dílu materiál *měď* z knihovny SolidWorks.



Obrázek 27: Primární pas - skica

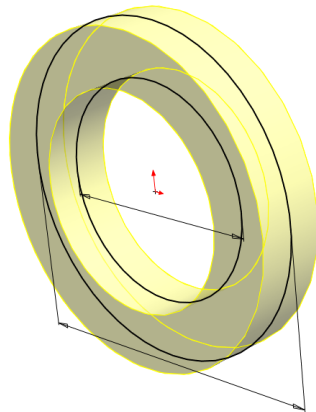


Obrázek 28: Primární pas - 3D

4.2 Magnetické jádro

Princip modelování magnetického jádra je opět naznačen na obr. 29. Byla nakreslena jednoduchá 2D skica tvaru mezikružích, ze které se následně pomocí funkce *přidání vysunutím* udělal 3D díl. Pomocí funkce *zaoblit* byly dílu zaoblény hrany pro reálnější vzhled.

Obr. 30 je modelem magnetického jádra už navinutého a po bandáži. Model jádra, na kterém by bylo pouze sekundární vinutí, sice možné namodelovat je, nicméně v praxi se takový model nepoužívá, protože z hlediska celkového principiálního 3D modelu transformátoru je to zbytečné.



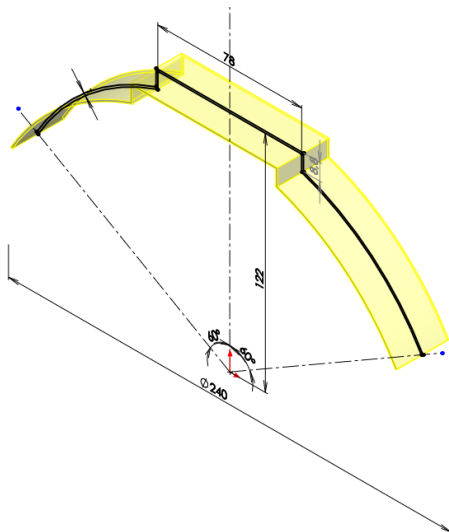
Obrázek 29: Magnetické jádro - skica



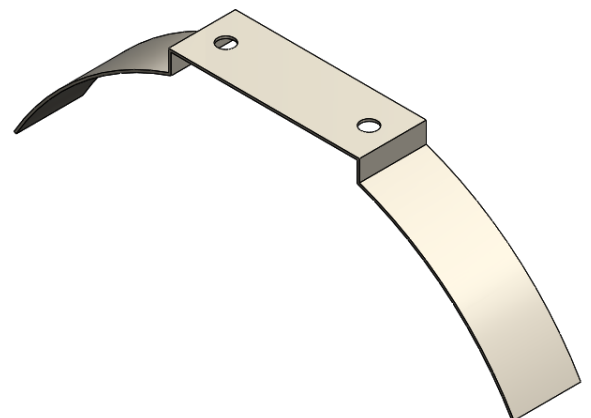
Obrázek 30: Magnetické jádro – 3D

4.3 Obruč pro uchycení magnetického jádra

Obr. 31 popisuje princip modelování obruče na uchycení magnetických jader do formy transformátoru. Opět byla nakreslena 2D skica, ze které se pomocí funkce *přidání vysunutím* udělal 3D díl. Pomocí funkce *průvodce dírami*, byly vloženy do dílu díry.



Obrázek 31: Obruč pro uchycení mag. jádra - skica



Obrázek 32: Obruč pro uchycení mag. jádra–3D

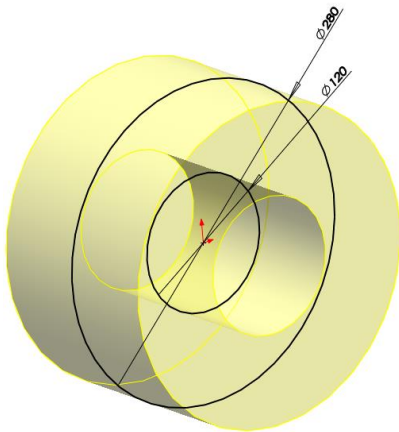
4.4 Epoxidový odlitek

Základem modelu epoxidového odlitku je 2D skica znázorněná na obr. 33. Nakreslením dvou kružnic a použitím funkce *přidání vysunutím* vytvoříme 3D díl. Pod tímto dílem se nakreslí další 2D skica takovým způsobem, aby jejím orotováním podle vhodně zvolené osy (funkce *přidání rotací*) došlo k výsledku, který znázorňuje obr. 34. Osa rotace je v tomto případě ve středu odlitku. Základ těla odlitku je hotov.

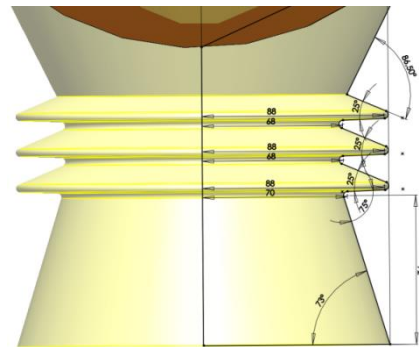
Pro vytvoření modelu svorkovnice, jež je součástí odlitku, bylo potřeba vysunout kvádr ze stopky těla transformátoru (funkce *přidání vysunutím*). Toto je zobrazeno na obr. 35. Poté se pomocí funkce *odebrání vysunutím* domodeloval potřebný tvar, jak je znázorněno na obr. 36.

Jako poslední byl do odlitku přidán „límeček“. Pro jeho vytvoření byly použity funkce *přidat vysunutím* a *odebrat tažením po křivce*. Tuto situaci znázorňují obr. číslo 37 a 38.

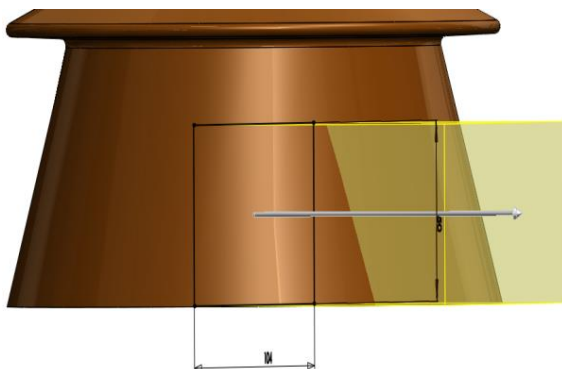
Po dokončení odlitku (obr. 39) se provádí drobné úpravy, jako například zkosení a zaoblění hran (funkce *zkosit*, *zaoblit*).



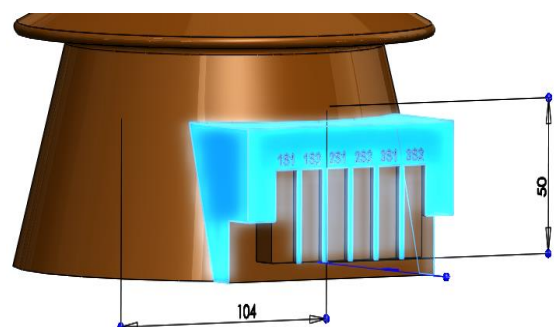
Obrázek 33: Část odlitku z epoxidu 1



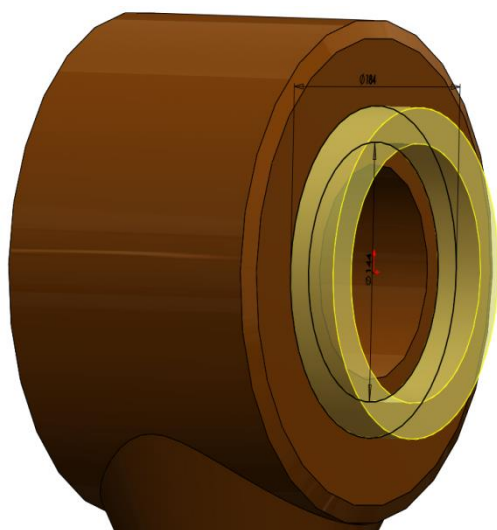
Obrázek 34: Část odlitku z epoxidu 2



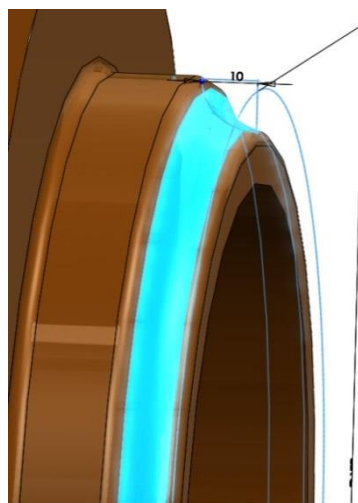
Obrázek 35: Část odlitku z epoxidu 3



Obrázek 36: Část odlitku z epoxidu 4



Obrázek 37: Část odlitku z epoxidu 5



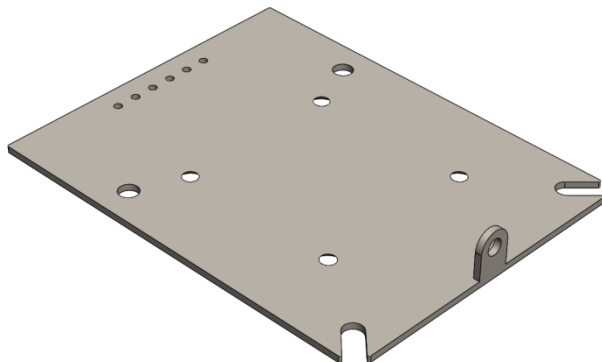
Obrázek 38: Část odlitku z epoxidu 6



Obrázek 39: Kompletní epoxidový odlitek

4.5 Základová deska a šablona primárních vodičů

Postup modelování základové desky (obr. 40) a šablony primárních vodičů (obr. 41) je obdobný jako v bodech 4.1 a 4.2.



Obrázek 40: Základová deska 3D



Obrázek 41: Šablona primárních vodičů 3D

4.6 Svorkovnice

Obr. 42 znázorňuje svorkovnici transformátoru i s označením svorek. V konkrétním případě zadaného transformátoru zůstanou svorky pro třetí jádro (3S1 a 3S2) nevyužity.



Obrázek 42: Svorkovnice 3D

4.7 Sestava 3D modelu transformátoru

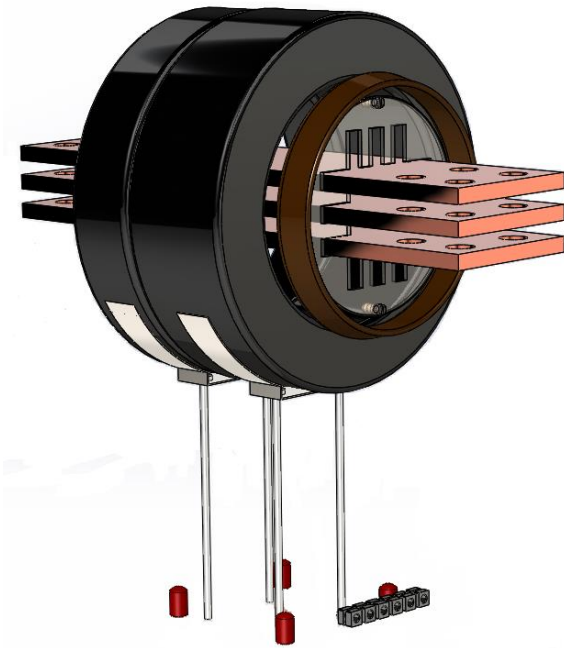
Po namodelování všech 3D dílů transformátoru se vytvoří sestava těchto dílů. Jednotlivé díly se k sobě připojí pomocí geometrických vazeb, jako jsou například *vazba sjednocená*, *vazba vystředěním*, *vazba symetrická*, *vazba rovnoběžná*, *vazba soustředná* atd.

Obr. 43 znázorňuje sestavu funkčních částí transformátoru tak, jak budou umístěny ve formě a následně zality epoxidovou pryskyřicí. V tomto obrázku můžeme dále vidět dva druhy zalévacích matic. Čtveřice větších matic (se zaobleným koncem) slouží k uchycení těla transformátoru k základové desce. Šestice menších matic (hranatých), slouží k vyvedení začátků

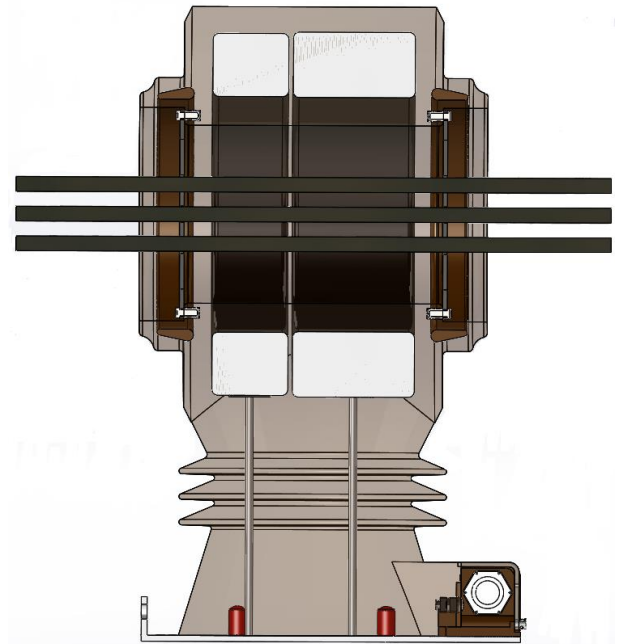
a konců sekundárních vinutí do svorkovnice. Je zde také vidět stínění (zelené kolečko) ze speciálního polovodivého materiálu.

Na obr. 45 je vidět přesné umístění funkčních částí v průhledném těle transformátoru. Řez transformátorem je na obr. 44.

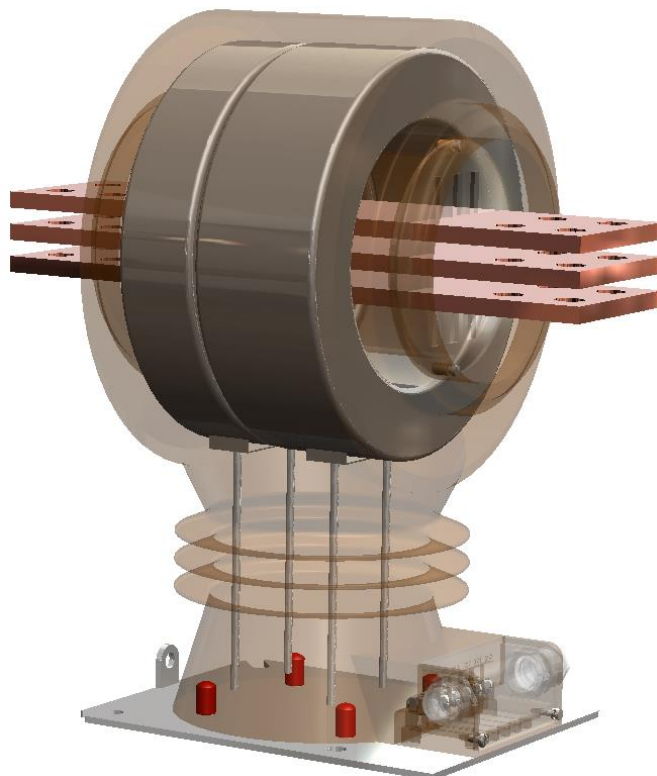
Celkový 3D model transformátoru proudu je na obr. 46.



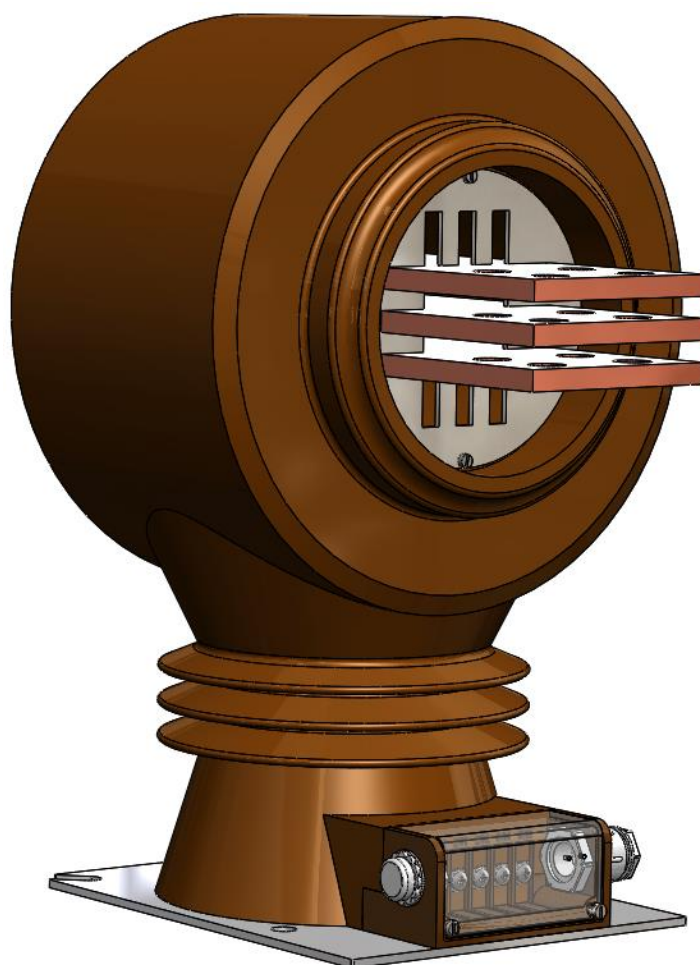
Obrázek 43: Funkční části transformátoru



Obrázek 44: Řez transformátorem



Obrázek 45: Průhledný pohled na transformátor



Obrázek 46: Přístrojový transformátor proudu CTT 12

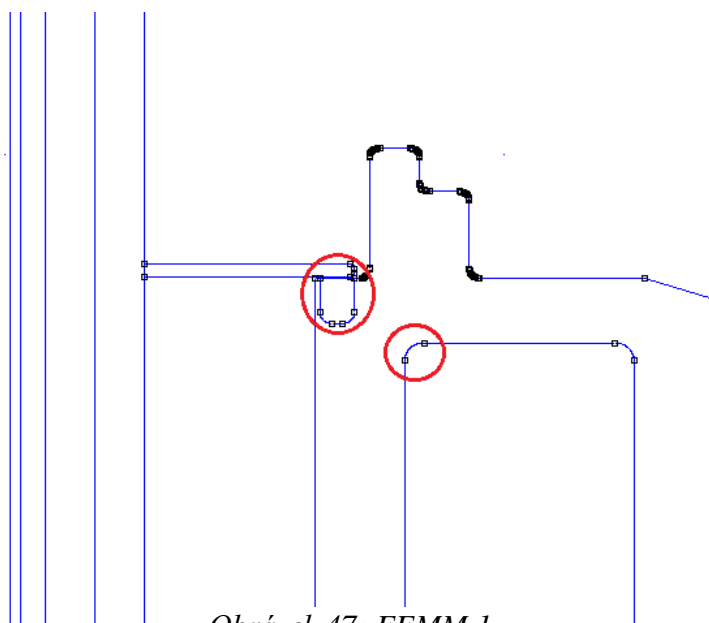
5 ELEKTROSTATICKÁ SIMULACE V PROGRAMU FEMM

V předcházejících kapitolách byl vypočítán a následně namodelován zadaný přístrojový transformátor proudu. Součástí takového vývojového úkolu je i elektrostatická simulace daného transformátoru. Pro tuto simulaci lze využít různý software. Mezi nejpoužívanější patří například Ansoft Maxwell, ElectroMagnetic simulation od ElectroMagneticWorks (nadstavba SolidWorks) nebo FEMM. První dva zmíněné programy umožňují 3D simulace, software FEMM umožňuje pouze 2D simulaci (např. symetrickou kolem jedné osy). Pro potřeby zadané elektrostatické simulace postačí free software FEMM.

Nejdříve je potřeba nakreslit vhodný řez transformátorem v programu SolidWorks a ten potom uložit jako soubor typu DXF, který lze importovat do programu FEMM. Následně je ve FEMMu potřeba vhodně nastavit parametry pro simulaci. Při nastavování elektrostatické simulace lze postupovat následovně:

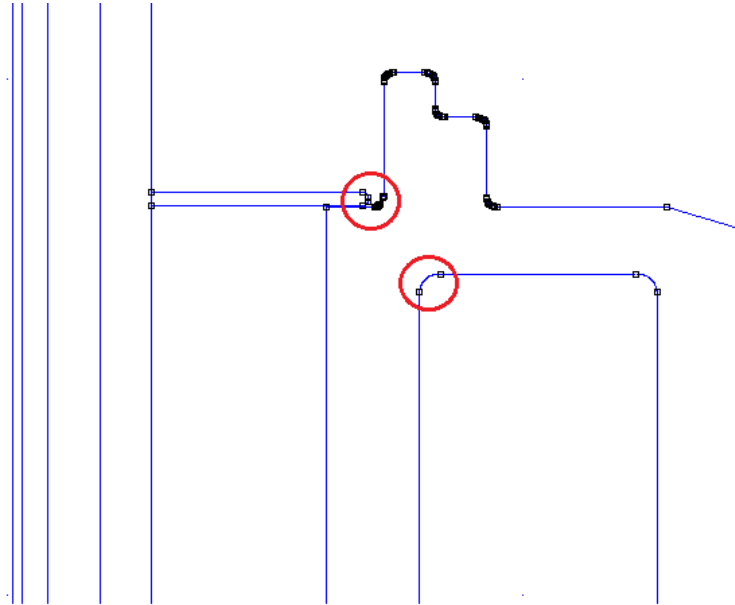
- Nastavit elektrostatický problém symetrický podle jedné osy
- Vložit vhodnou geometrii (řez transformátorem)
- Nastavit použité materiály (epoxid $\epsilon_r = 4$, vzduch $\epsilon_r = 1$)
- Nastavit příslušná napětí na určená místa geometrie transformátoru ($U = 0kV$ na magnetický obvod, $U = 14,5kV$ na primární vodič a vše, co je s ním na stejném potenciálu)
- Vygenerovat mesh
- Spustit výpočet
- Analýza výsledků

Po analyzování všech simulací vyplynulo, že v zadaném transformátoru jsou z pohledu intenzity elektrického pole dvě nebezpečná místa. Tyto místa jsou nebezpečná z toho důvodu, že je mezi nimi největší intenzita elektrického pole a proto by mohli činit potíže při části kusové zkoušky – měření částečných výbojů, která souvisí s typovou zkouškou transformátoru, je to část izolační zkoušky (viz kapitola 6). Na obr. 47 a 48 jsou nebezpečná místa vyznačena.



Obrázek 47: FEMM 1

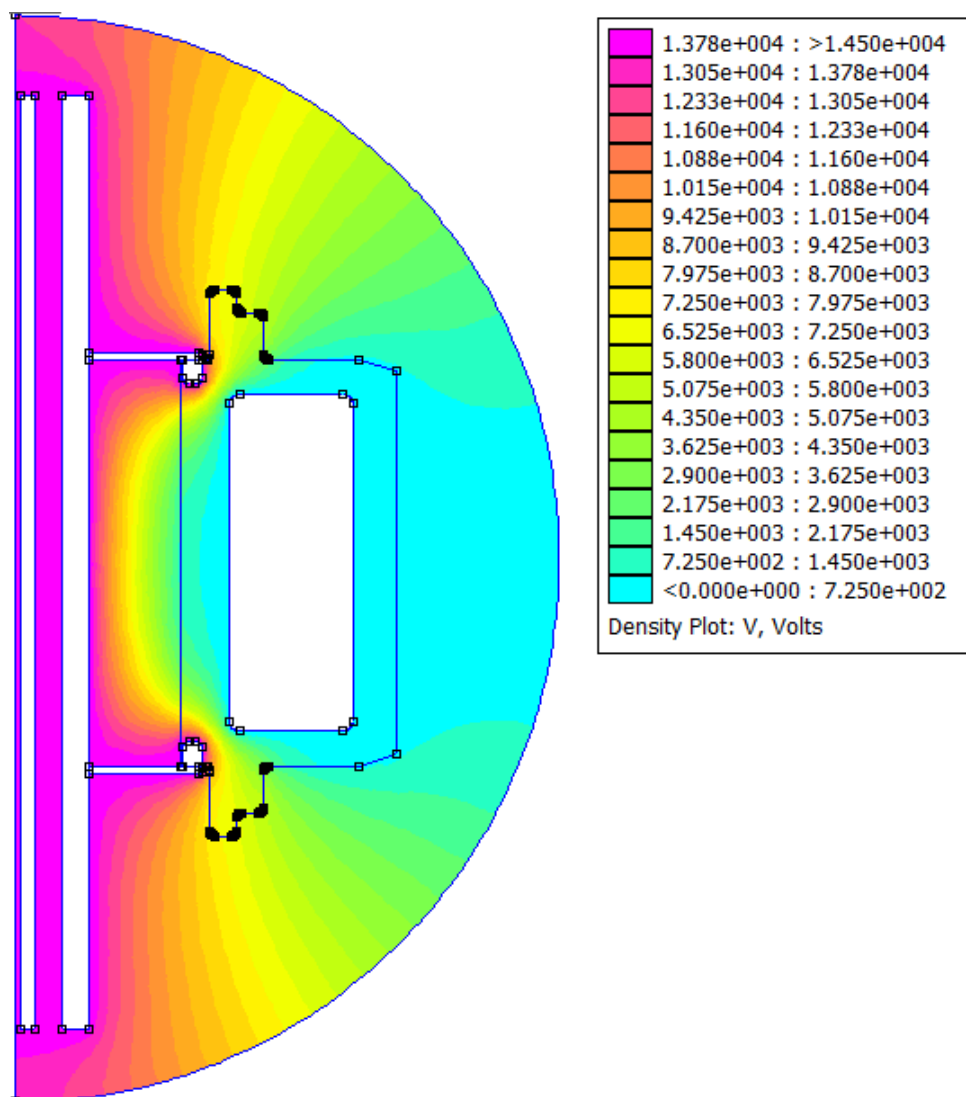
V místě, kde se nachází zalévací matice (obr. 47), která drží víčko transformátoru a je na potenciálu primárního vinutí se mezi touto maticí a navinutým magnetickým jádrem (na potenciálu země) uzavírá elektrostatické pole, mezi těmito body, jak bude později ukázáno v simulaci, je tedy nebezpečná intenzita elektrického pole. Zalévací matice ovšem drží víčko jen na dvou bodech (nad a pod primárním vodičem). Proto se tedy musí počítat i s variantou, kde zalévací matice není. Tuto variantu popisuje obr. 48. V místě mezi víčkem, které není ideálně přitlačeno k epoxidu, vzniká malá vzduchová mezera – v této mezeře, jak ukáží následující simulace, je intenzita elektrického pole největší.



Obrázek 48: FEMM 2

5.1 Transformátor bez stínění se zalévací maticí

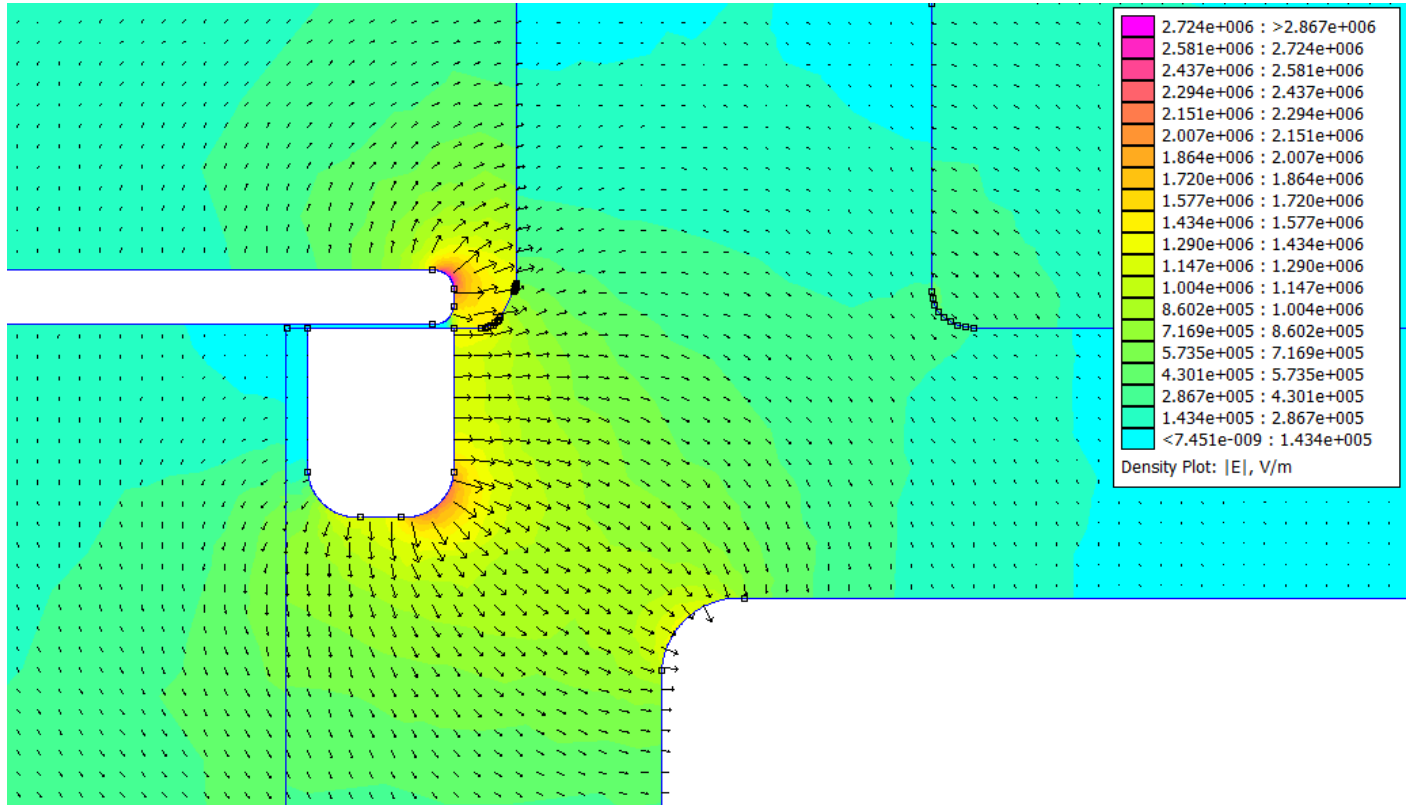
V tomto případě je napětí v transformátoru rozloženo dle následujícího obrázku.



Obrázek 49: Transformátor bez stínění - rozložení napětí 1

Na obr. 49 je patrné, že primární vodič, víčko a zalévací matice jsou na stejném potenciálu 14,5 kV. Navinuté magnetické jádro je na potenciálu země 0 V. Z rozložení napětí je také jasně vidět, že v oblasti jádra je napětí rozloženo nerovnoměrně.

Na obr. 50 je potom vidět jakým způsobem se uzavírá elektrostatické pole mezi zalévací maticí a navinutým magnetickým jádrem. Největší intenzita elektrického pole v tomto případě dosahuje $E = 2,724 \text{ kV/mm}$ a je na vnějším rádiuse víčka transformátoru.

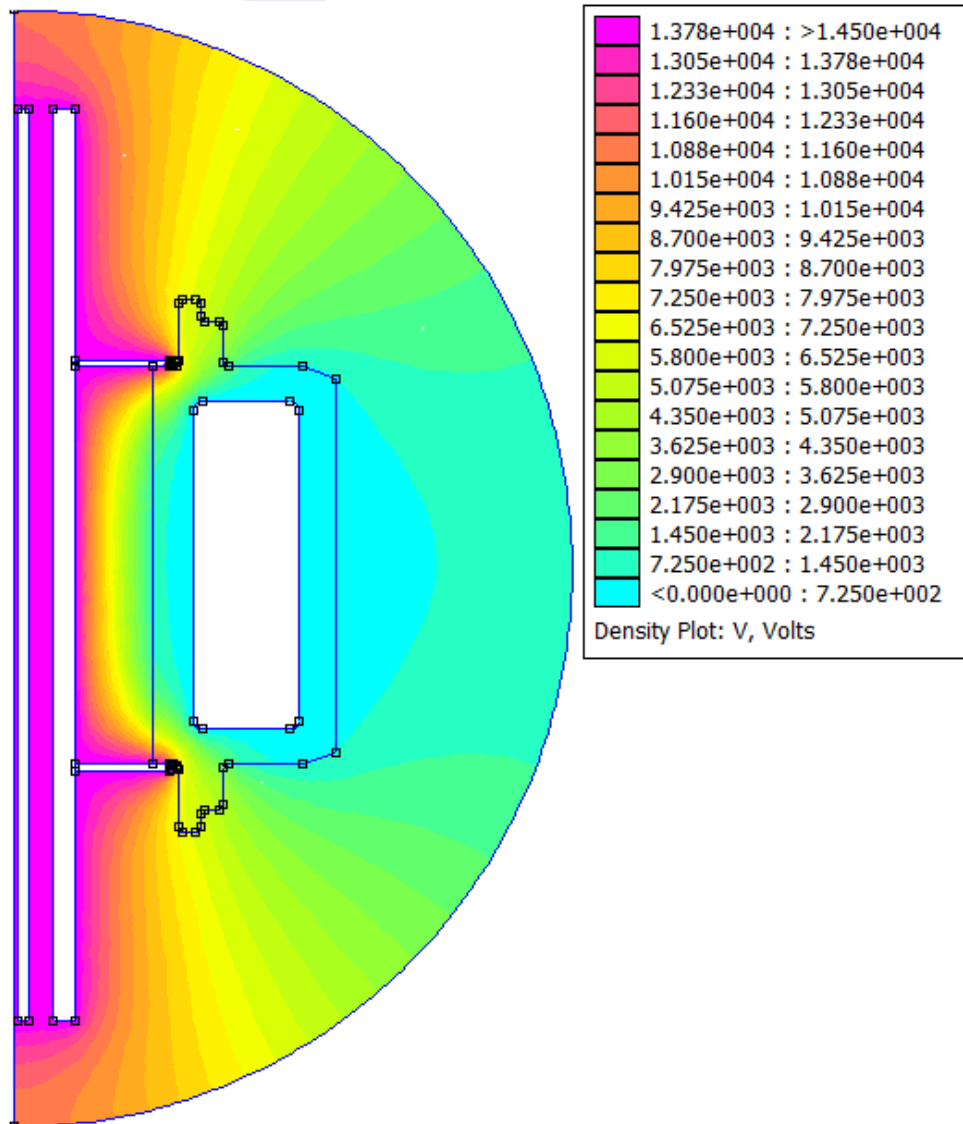


Obrázek 50: Transformátor bez stínění - intenzita elektr. pole 1

5.2 Transformátor bez stínění a bez zalévací matice

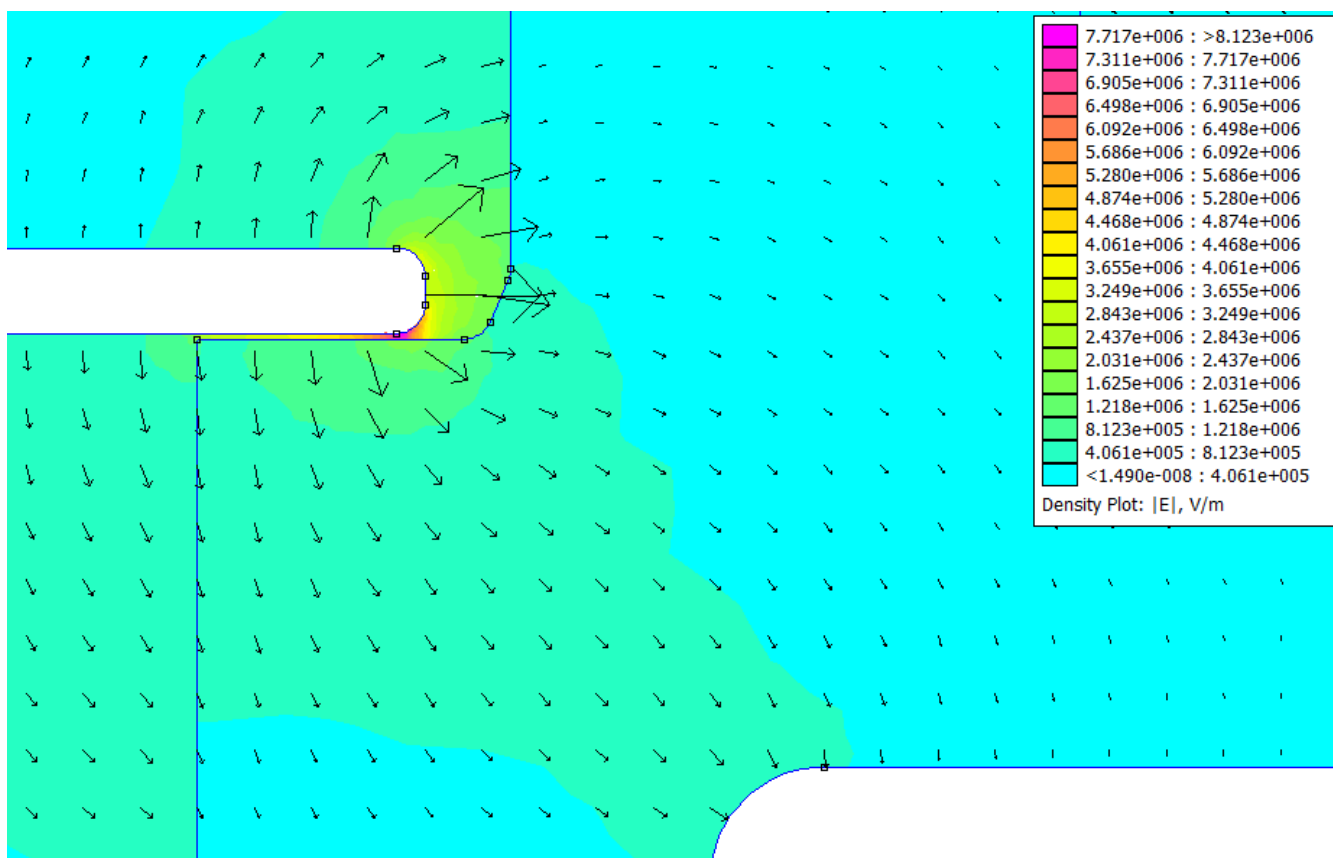
V tomto případě je napětí v transformátoru rozloženo dle obr. 51.

Zde je vidět mírná změna rozložení napětí v transformátoru v místě, kde není zalévací matice. Rozložení napětí v oblasti magnetického jádra transformátoru je opět nerovnoměrné.



Obrázek 51: Transformátor bez stínění - rozložení napětí 2

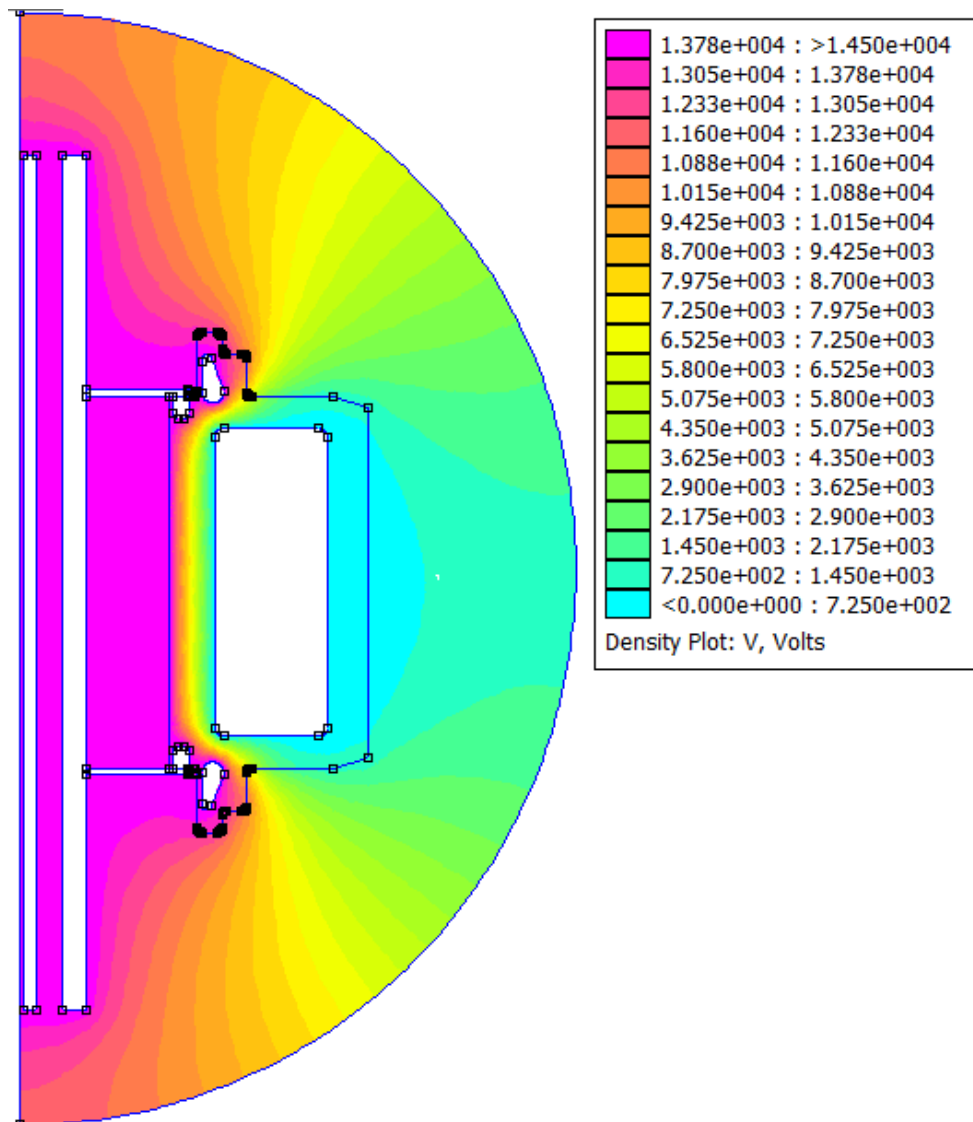
Jak ukazuje obr. 52, jde o nejhorší situaci, jaká může nastat, protože intenzita elektrického pole v nebezpečném místě dosahuje hodnoty $E = 7,717 \text{ kV/mm}$. Pokud by byl transformátor konstruován v tomto provedení bez stínění, hrozil by vznik např. koróny. Pokud by navíc víčko nemělo sraženou hranu, tak by intenzita elektrického pole ještě více narostla.



Obrázek 52: Transformátor bez stínění - intenzita elektr. pole 1

5.3 Transformátor se stíněním a zalévací maticí

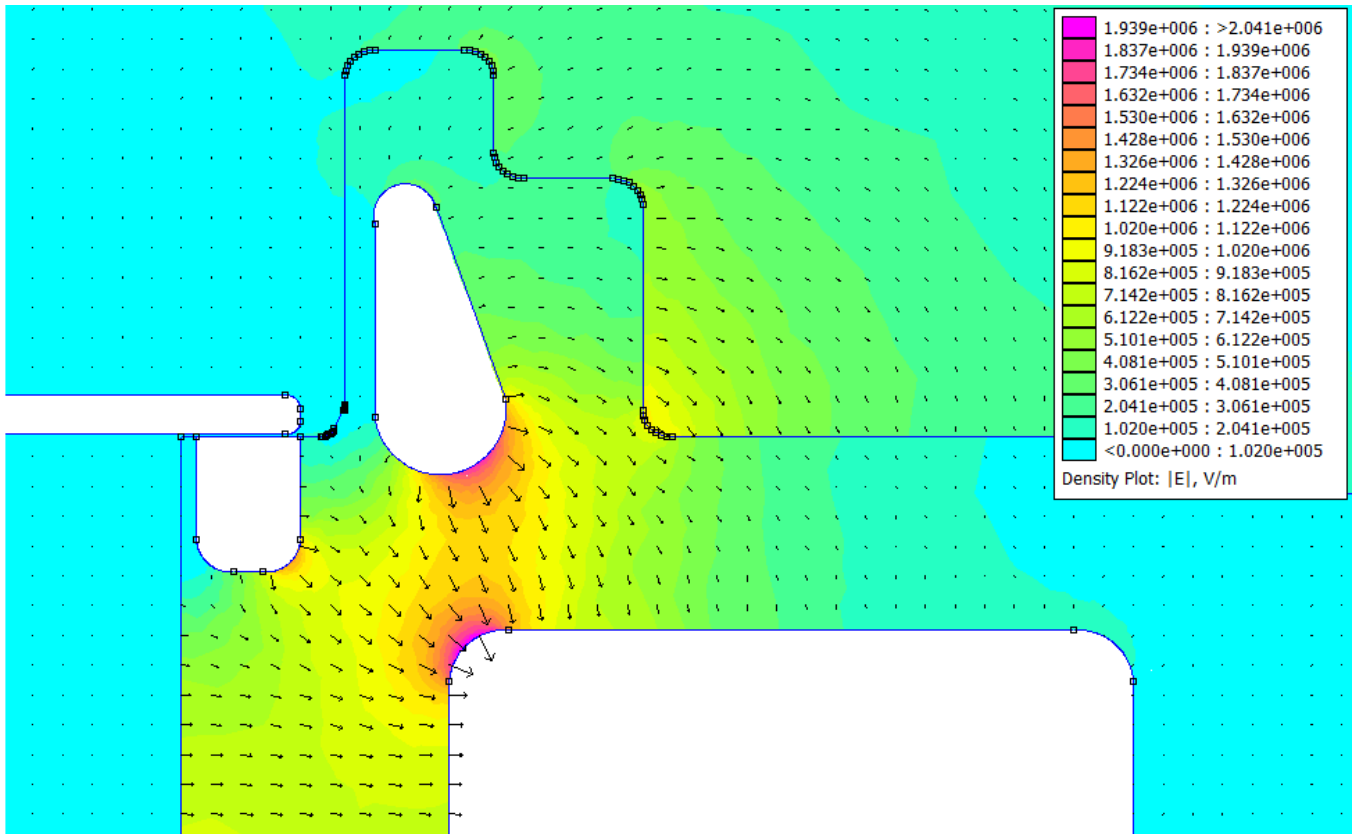
Problém s intenzitou elektrického pole lze vyřešit za pomoci stínění ze speciálního polovodivého materiálu. Použitím stínění bude elektrostatické pole částečně potlačeno od nebezpečných míst a tím dojde ke zmenšení intenzity elektrického pole. Problém bude opět řešen pro místa se zalévací maticí a bez ní. Rozložení napětí v transformátoru v místě se zalévací maticí zobrazuje obr. 53.



Obrázek 53: Transformátor se stíněním - rozložení napětí 1

Na obr. 53 je také patrné, kde je umístěno stínění. První část stínění je v dutině transformátoru a je na potenciálu primárního vodiče. Druhá část stínění je nad zalévací maticí a víčkem transformátoru také na potenciálu primárního vodiče. Tímto se dosáhlo rovnoměrného rozložení napětí v oblasti magnetického jádra.

Z dalšího obr. 54 je potom vidět, jakým způsobem se uzavírá elektrostatické pole za použití stínění. Stínění nad zalévací maticí má účelně velký rádius, aby se intenzita elektrického pole rozložila co možná nejvíce rovnoměrně po jeho obvodu. Intenzita elektrického pole v tomto případě nabývá hodnot $E = 1,939 \text{ kV/mm}$. Další simulace ukázaly (nejsou zobrazeny v této práci), že je důležité, aby stínění nad zalévací maticí a víčkem mělo co největší rádius, protože čím byl rádius menší, tím bylo stínění ostřejší (vytvářelo hrot proti magnetickému obvodu) a na tomto hrotu se objevovala velká intenzita elektrického pole (stínění by potom ztratilo význam).

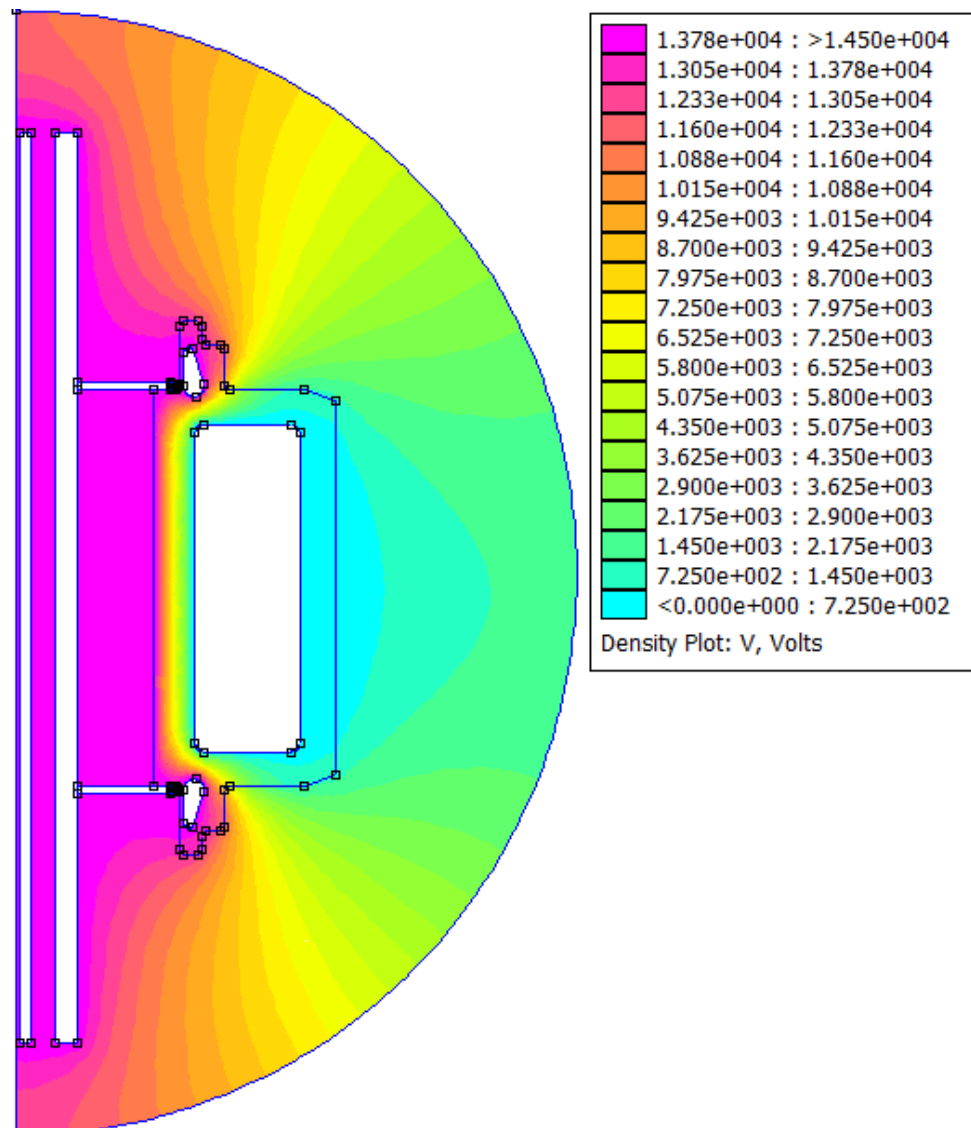


Obrázek 54: Transformátor se stíněním - intenzita elektr. pole 1

5.4 Transformátor se stíněním bez zalévací matice

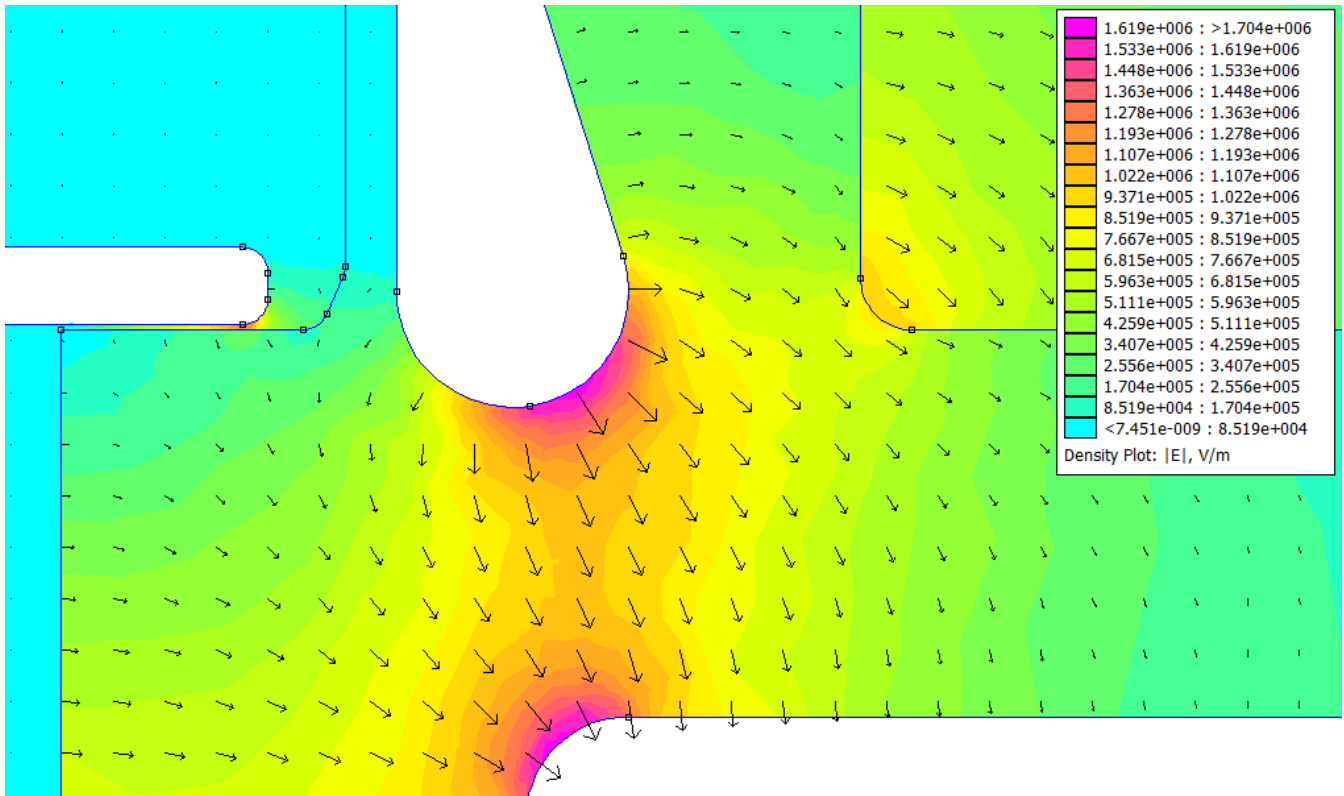
V kapitole 5.2 bylo simulací dokázáno, že intenzita elektrického pole ve variantě bez stínění a bez zalévací matice dosahuje velkých hodnot až $E = 7,717 \text{ kV/mm}$ a je tedy nejrizikovější. Nyní bude nasimulováno, jak se tato intenzita bude chovat po přidání stínění. Rozložení napětí zobrazuje obr. 55.

Rozložení napětí bez zalévací matice, ale se stíněním, je opět rovnoměrné.



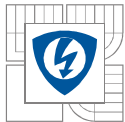
Obrázek 55: Transformátor se stíněním - rozložení napětí 2

Největší intenzita elektrického pole je v tomto případě pouze $E = 1,619 \text{ kV/mm}$, což je mnohem méně, než u varianty bez stínění (kap. 5.2). Intenzita elektrického pole v nebezpečném místě vzduchové mezery se v tomto případě pohybuje kolem hodnoty $E = 1 \text{ kV/mm}$. Elektrostatické pole se uzavírá převážně mezi stíněním a magnetickým jádrem. Situaci zobrazuje obr. 56.



Obrázek 56: Transformátor se stíněním - intenzita elektr. pole 2

Všechny výše uvedené simulace tedy jasně dokazují, že stínění je v transformátoru nutné a musí tam být tedy umístěno. Zavedení stínění do konstrukce transformátoru přidá sice na pracnosti výrobního procesu transformátoru, což prodražuje jeho výrobu, ale z hlediska elektrických vlastností je nutností.



6 ČÁSTEČNÁ TYPOVÁ ZKOUŠKA A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Norma ČSN EN 60044 – 1, dle které je zadaný proudový transformátor navržen, dělí zkoušky na:

- **Typová zkouška** – tato zkouška se provádí na každém typu transformátoru a má prokázat, že všechny transformátory vyrobené dle stejných podkladů vyhovují požadavkům, které neuvádí kusová zkouška [3]
- **Kusová zkouška** – této zkoušce je podroben každý transformátor [3]
- **Zvláštní zkouška** – zkouška dohodnutá mezi výrobcem a zákazníkem [3]

6.1 Typová zkouška přístrojového transformátoru proudu

Typová zkouška přístrojového transformátoru se skládá z několika dílčích zkoušek. V následujících odstavcích budou tyto dílčí zkoušky stručně popsány. V příloze 3 je umístěn protokol o typové zkoušce zadaného transformátoru. Tento transformátor u typové zkoušky **VYHOVĚL**.

6.1.1 Zkouška krátkodobými proudy

Pro zkoušku krátkodobým tepelným proudem I_{th} musí být transformátor na výchozí teplotě mezi 10 °C a 40 °C. Zkouška musí být provedena se zkratovaným sekundárním vinutím a s proudem I po dobu t takovým, že hodnota součinu (I^2t) nebude menší než (I_{th}^2) a doba t bude mezi 0,5 s a 5 s. [3]

Dynamická zkouška musí být provedena se zkratovaným sekundárním vinutím a s vrcholovou hodnotou primárního proudu, která není menší než jmenovitý dynamický proud I_{dyn} alespoň v prvním vrcholu. [3]

Transformátor vyhověl při této zkoušce, jestliže po ochlazení na okolní teplotu (mezi 10 °C a 40 °C) splňuje následující požadavky:

- Není viditelně poškozen
- Jeho chyby po demagnetizaci se neliší od chyb zaznamenaných před zkouškami o více než polovinu mezních chyb v jeho třídě přesnosti
- Při prohlídce izolace vedle povrchu přívodů se neukazuje významné poškození
- Vyhovuje dielektrickým zkouškám (zkouška střídavým napětím, měření částečných výbojů, zkoušky mezi sekcemi primárního a sekundárních vinutí a sekundárních vinutí napětím průmyslového kmitočtu, přepětová zkouška mezizávitové izolace – všechny zmíněné zkoušky jsou části kusové zkoušky) [3]

V příloze 3 na listu č. 2 je uvedena zkouška krátkodobými proudy, která byla provedena na zkratovně ETD transformátory a.s. a to proudy $I_{th} = 50 \text{ kA}$ (1s), $I_{dyn} = 125 \text{ kA}$. Transformátor podle tohoto protokolu zkoušce **vyhověl**.

6.1.2 Oteplovací zkouška

Norma ČSN EN 60044 – 1 udává požadavky na oteplení transformátoru, které nesmí být překročeny. Oteplovací zkouška trvá tak dlouho, než transformátor dosáhne ustálené teploty (jestliže přírůstek teploty za hodinu nepřesáhne 1 K). Teplota okolí v místě zkoušky musí být

mezi 10 °C a 30 °C. Transformátor musí být sestaven tak, jak bude sestaven v provozu. Oteplení vinutí musí být měřeno změnou odporu a oteplení jiných částí než jsou vinutí může být měřeno pomocí teploměrů nebo termočlánků. [3]

V příloze 3 na listu č. 2 je uvedena oteplovací zkouška navrhovaného transformátoru. Transformátor u zkoušky **vyhověl** s oteplením sekundárního vinutí 38 K a oteplením primárního vinutí 60 °C.

6.1.3 Zkouška primárního vinutí impulsním napětím

Zkušební napětí musí být přivedeno mezi svorky primárního vinutí a zem. Kostra, jádro a všechny svorky sekundárního vinutí musí být uzemněny. Impulsní zkoušky obecně sestávají z přivedení referenčních a zkušebních impulsů. Referenční impulsní napětí musí mít amplitudu mezi 50% a 75% jmenovitého zkušební napětí. Při zkoušce musí být zaznamenávány vrcholová hodnota a tvar impulsního napětí. Důkaz o poruše je dán změnou tvaru průběhu impulsního napětí u referenčních a zkušebních impulsů. [3]

U zkoušky **atmosférickými impulsy** musí mít zkušební napětí odpovídající hodnotu podle nejvyššího napětí pro zařízení a podle stanovené izolační hladiny. Pro případ zadaného transformátoru se jedná o napětí podle tabulky 9. Tato zkouška se musí provést s impulsy kladné i záporné polarity. Přiloží se 15 po sobě následujících impulsů každé polarity bez korekce na atmosférické podmínky. Transformátor **vyhověl** při této zkoušce, když při obou polaritách: [3]

- Nedošlo k průrazu vnitřní, samoseneobnovující izolace
- Nedošlo k přeskočení podél vnější, samoseneobnovující izolace
- Nedošlo k více než dvěma přeskokům podél vnější, samoseneobnovující izolace
- Nebyl zjištěn žádný jiný důkaz poruchy izolace (např. nedošlo ke změnám ve tvaru průběhu zaznamenávaných veličin) [3]

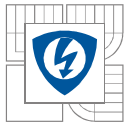
Nejvyšší napětí pro zařízení U_m (efektivní hodnota)	Jmenovité zkušební střídavé napětí (efektivní hodnota)	Jmenovité zkušební napětí atmosférického impulsu (vrcholová hodnota)
[kV]	[kV]	[kV]
12	28	75

Tabulka 9: Zkušební napětí pro transformátory do sítě 10 kV [3]

V příloze 3 na listu č. 2 je uvedena zkouška atmosférickým impulzem. Zadaný transformátor podle ní **vyhověl**, když nedošlo k ani jednomu přeskočení.

6.1.4 Izolační zkouška sekundárních vinutí střídavým napětím průmyslového kmitočtu

Zkouška byla provedena zkušebním střídavým napětím 3 kV (50Hz) po dobu 60s mezi zkratovanými sekundárními svorkami a uzemněnou montážní deskou, dále také mezi zkratovanými sekundárními svorkami 1S1 – 1S2 a 2S1 – 2S2. Transformátor u této zkoušky **vyhověl**. Záznam o této zkoušce je v příloze 3 na listu č. 4.



6.1.5 Přepět'ová zkouška mezizávitové izolace

Při této zkoušce se postupně přivádí na primární svorky jmenovitý primární proud a na sekundárním vinutí se měří napětí, toto napětí nesmí překročit zkušební napětí 4,5 kV. Až se dosáhne jedné z těchto hodnot (I_N nebo 4,5kV), potom se 60s čeká a pokud nedojde k průrazu, tak transformátor zkoušky **vyhověl**. Záznam o této zkoušce je v příloze 3 na listu č. 4.

6.1.6 Zkouška primárního vinutí střídavým napětím průmyslového kmitočtu

Při této zkoušce se zkratují primární svorky a zbytek transformátoru se uzemní. Potom se na primární svorky přivede izolační napětí, které je dané normou, v tomto případě 28 kV. Transformátor u zkoušky vyhověl, nedojde-li k průrazu po dobu 60s.

Zadaný transformátor u této zkoušky **vyhověl**. Záznam o této zkoušce je v příloze 3 na listu č. 4.

6.1.7 Měření částečných výbojů

Tato zkouška přímo souvisí se zkouškou popsanou v kapitole 6.1.6, protože obě tvoří izolační zkoušku. Po tom, co transformátor vydržel 28 kV po dobu 60s bez průrazu se napětí sníží na první napět'ovou hladinu pro měření částečných výbojů $1,2 \cdot U_N$ a na této hladině nesmí hodnota částečných výbojů překročit 50 pC po dobu 30s. Pokud transformátor vydrží, tak se napětí opět sníží na druhou napět'ovou hladinu pro měření částečných výbojů $1,2 \cdot (U_N/\sqrt{3})$ a zde musí být opět po 30s hodnota částečných výbojů pod 50 pC. Zadaný transformátor u zkoušky **vyhověl**. Záznam o této zkoušce je v příloze 3 na listu č. 4.

6.1.8 Kontrola značení správnosti svorek

Správné značení svorek musí identifikovat: a) primární a sekundární vinutí

b) sekce vinutí

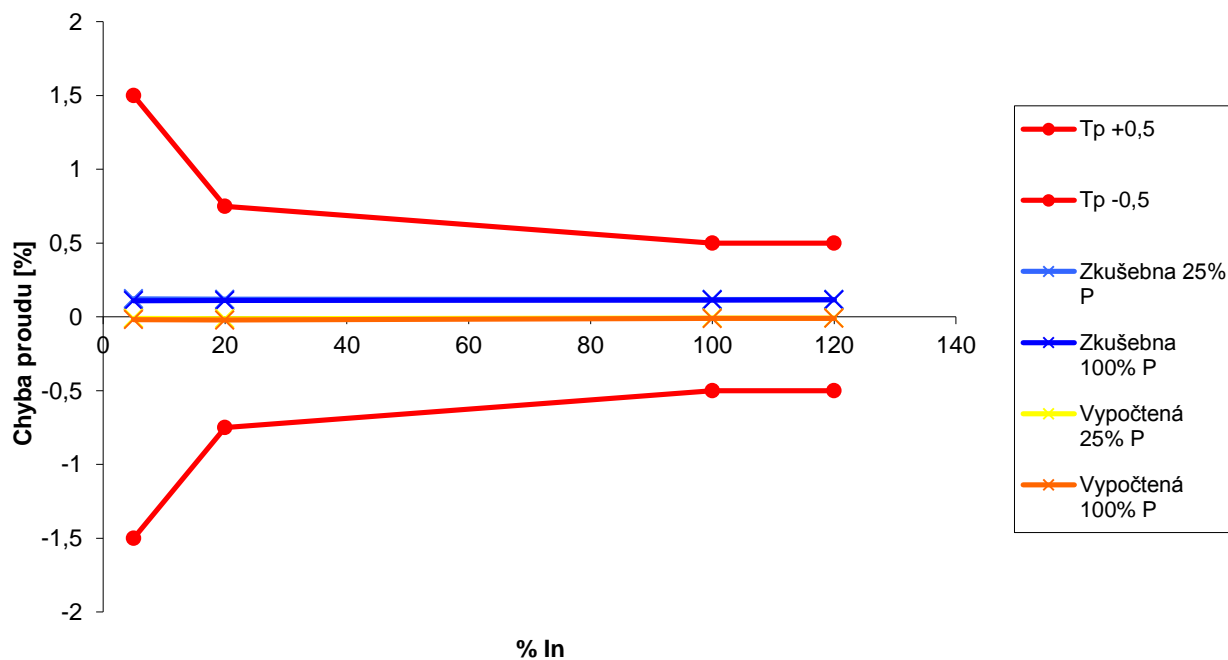
c) polarity vinutí

d) střední odbočky, pokud jsou

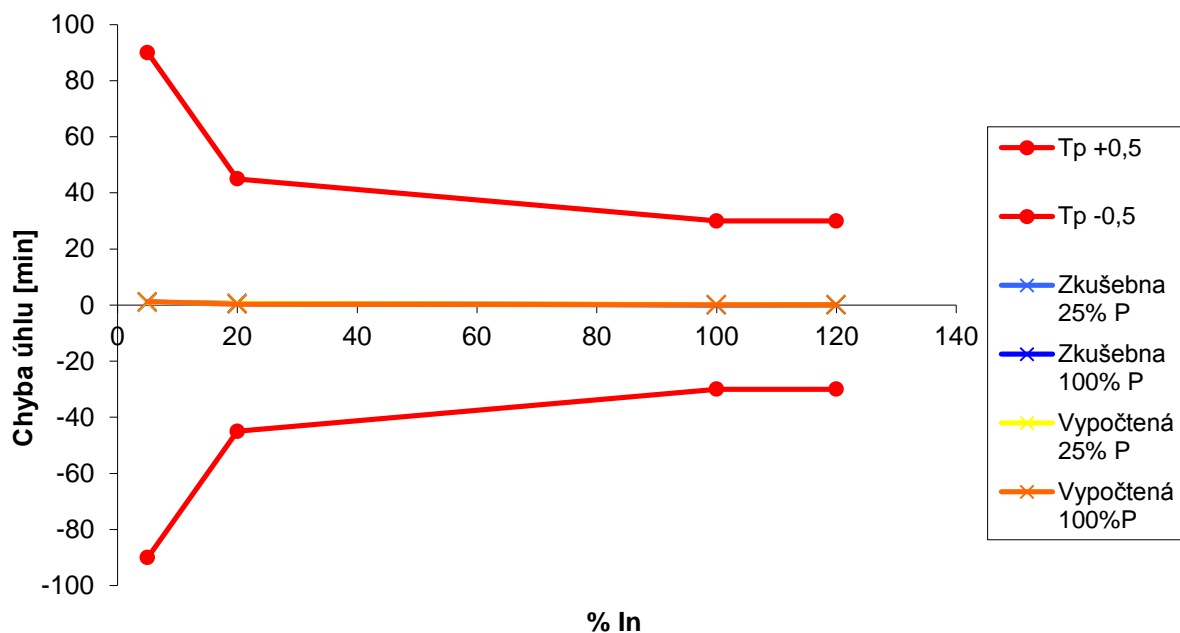
Správný způsob značení svorek je popsán v normě ČSN EN 60044 – 1. Zadaný transformátor u zkoušky **vyhověl**. Záznam o zkoušce je v příloze 3 na listu č. 4.

6.1.9 Měření chyb

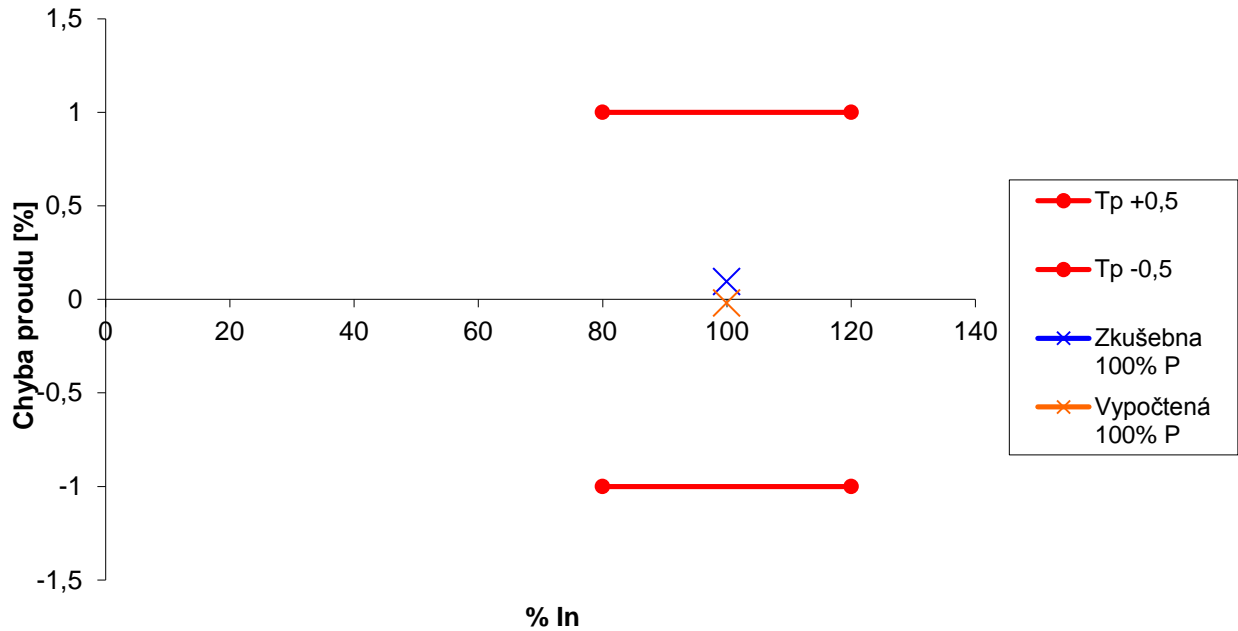
Při této zkoušce se transformátor připojí na měřicí přístroj, který proměří celé jeho pole chyb. Pokud leží jeho pole chyb v dovolených mezích, potom transformátor u zkoušky vyhověl. Jak ukazují obr. 57, 58, 59, 60, tak zadaný transformátor u této zkoušky bez problému **vyhověl**. V grafech je vidět porovnání numericky vypočítaných hodnot a hodnot naměřených zkušebníou. Je patrné, že se hodnoty mírně liší, což může být dáno různorodostí magnetizačních charakteristik jednotlivých jader. Tyto charakteristiky nejsou vždy naprosto totožné. Dále je drobná odchylka dána závitovou korekcí. Odebráním jednoho sekundárního závitu se celé pole chyb posune do kladných hodnot.



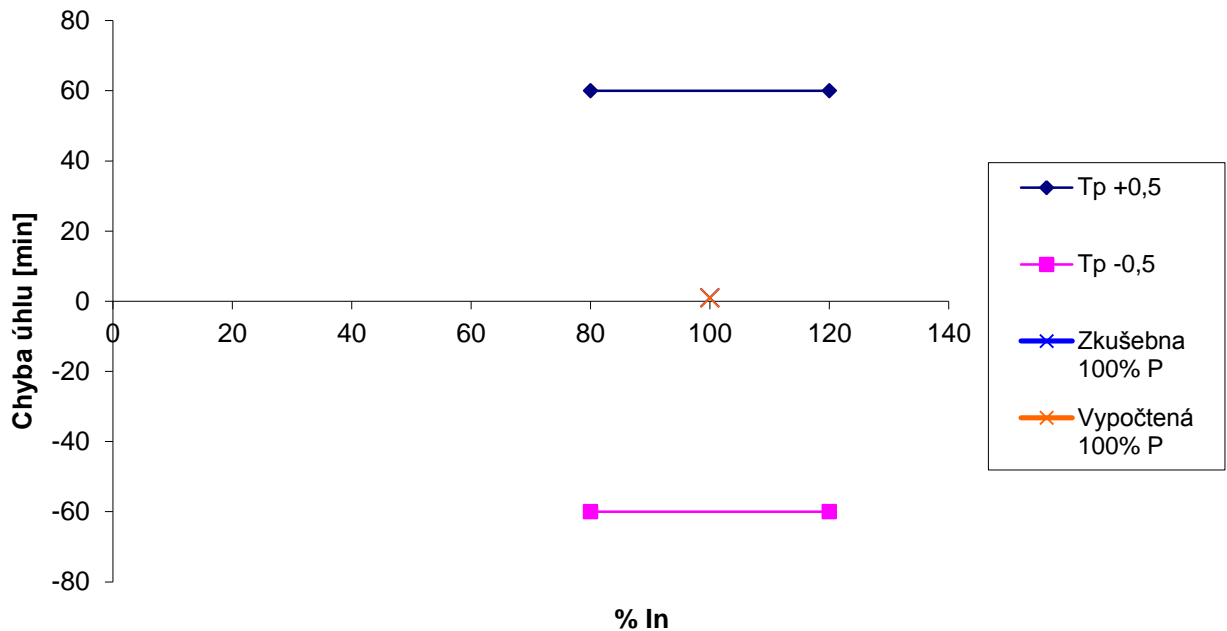
Obrázek 57: Chyba proudu měřicího jádra - srovnání



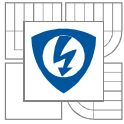
Obrázek 58: Chyba úhlu měřicího jádra - srovnání



Obrázek 59: Chyba proudu jisticího jádra - srovnání



Obrázek 60: Chyba úhlu jisticího jádra - srovnání



6.1.10 Měření nadproudového čísla a celkové chyby

Numericky vypočtené nadproudové číslo FS vyšlo 6,4 a nadproudové číslo naměřené zkušebnou vyšlo FS 4,5. Vzhledem k zadání (FS10) transformátor opět u zkoušky **vyhověl**. Z porovnání výsledků je také patrné, že numerický výpočet počítá s rezervou.

Numericky vypočtený nadproudový činitel ALF vyšel 27,7 a nadproudový činitel naměřený zkušebnou vyšel 24,3. Vzhledem k zadání (ALF20) transformátor u zkoušky **vyhověl**. Záznam o zkoušce je v příloze 3 na listu č. 5.

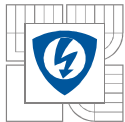
7 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo provést teoretický rozbor, numerický návrh a výpočet, příslušné simulace a vyrobit funkční prototyp přístrojového transformátoru proudu s převodem 4000//5/5A. Vývoj a výroba prototypu probíhala ve spolupráci s firmou KPB Intra s.r.o. Tento prototyp má reprezentovat novou řadu přístrojových transformátorů proudu v nabídce KPB Intra s.r.o. pro český a zejména zahraniční trh. Důvodem k vývoji zadaného prototypu byla nezanedbatelná poptávka zákazníků na tento typ proudového transformátoru pro velké primární proudy, který do této doby chyběl v nabídce KPB Intra s.r.o. Na základě konzultací se zákazníky bylo zvoleno průchozí provedení transformátoru a byly navrženy typické hodnoty zátěže a ostatních vlastností transformátoru, pro které byl následně vyroben prototyp. Zadání bylo tedy následující:

- CTT 12
- 4000//5/5A
- 12/28/75 kV
- 50 Hz
- 50/125 kA (1s)
- 15 VA 0,5FS5
- 15 VA 5P20

V 1. a 2. kapitole jsou vysvětleny některé důležité pojmy a normou dané hodnoty pro přístrojové transformátory proudu. Dále je vysvětlen princip funkce přístrojových transformátorů proudu, jejich pracovní oblasti a chyby. Výsledkem je důležitý poznatek, že existuje přímá souvislost mezi zátěží, nadproudovým číslem a třídou přesnosti. Roste-li zátěž, zmenšuje se nadproudové číslo a roste chyba (horší třída přesnosti) přístrojového transformátoru proudu. A naopak pokud se zmenší zátěž, musí se počítat s tím, že nadproudové číslo bude vyšší a chyba se bude zmenšovat (lepší třída přesnosti). Dále z této části plyne, že magnetický obvod je pomyslným srdcem transformátoru proudu, protože vhodně zvolená geometrie magnetického jádra má zásadní vliv na vlastnosti transformátoru. V dalších odstavcích jsou popsány důležité části proudových transformátorů a materiály, které se obecně používají. Následně je teoreticky popsán postup návrhu průchozího přístrojového transformátoru proudu i s vysvětlujícími obrázky některých důležitých rozměrů.

V kapitole 3 je navržen zadaný proudový transformátor. Výpočet vycházel z kapitoly 2.4. Opakující se výpočty zde nejsou zapsány, ale výsledky jsou zobrazeny v souhrnných tabulkách v kapitole 3 (tab. 7 a 8). Výstupem této části práce jsou geometrické rozměry jader, počty sekundárních závitů a další geometrické rozměry transformátoru nutné k tomu, aby splňoval požadavky zadání. Dále zde bylo ověřeno, že takto navržený transformátor bude splňovat třídu přesnosti a velikost nadproudového čísla, popřípadě nadproudového činitele. Výsledky jsou zobrazeny tabelárně v tab. 7 a 8 nebo graficky obr. 21, 22, 24 a 25.

**Měřicí jádro:**

- 214 x 190 x 20 mm (vnější průměr x vnitřní průměr x výška)
- materiál nanocrystal
- 800 sekundárních závitů ϕ 1,6 mm
- nadproudové číslo 6,4

Jisticí jádro:

- 214 x 190 x 50 mm (vnější průměr x vnitřní průměr x výška)
- materiál železo
- 800 sekundárních závitů ϕ 1,8 mm
- nadproudový činitel 27,7

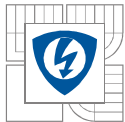
Na základě výpočtů z kapitoly 3, byl namodelován 3D model transformátoru v softwaru SolidWorks. V kapitole 4 je popsán postup při modelování některých důležitých částí. Na konci kapitoly je potom nejen konečný model transformátoru, ale je zde i vidět umístění funkčních částí uvnitř průhledného odlitku transformátoru. Tento model byl následně použit pro tvorbu formy, do které se odlil prototyp.

V kapitole 5 byla provedena elektrostatická simulace v programu FEMM. Tato simulace je velice důležitá, protože prozradila, že konstrukce transformátoru musí obsahovat stínění. Simulace porovnává velikost intenzity elektrického pole ve dvou případech. V prvním případě je transformátor simulován bez stínění. Velikost intenzity elektrického pole v kritickém místě vyšla $E = 7,717 \text{ kV/mm}$, což je příliš, protože by hrozilo, že transformátor by nevyhověl u zkoušky částečných výbojů, která je dílčí zkouškou typové zkoušky. Ve druhém případě, kdy bylo do transformátoru umístěno stínění, vyšla intenzita elektrického pole v kritickém místě pouze $E = 1 \text{ kV/mm}$, což už je z hlediska částečných výbojů přijatelné. Vše je dokumentováno vysvětlujícími obrázky z programu FEMM.

V poslední kapitole je potom stručně popsána celá typová zkouška zadaného transformátoru. V příloze 3 je také přiložena kopie protokolu o této typové zkoušce, která potvrzuje, že vyrobený transformátor splnil všechny požadavky normy ČSN EN 60044 – 1 a VYHOVĚL tak u typové zkoušky. Každá dílčí část zkoušky je stručně popsána a v některých částech je uvedeno srovnání mezi vypočtenými a zkušebními změřenými hodnotami.

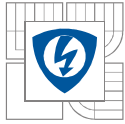
V příloze 4 je umístěn katalogový list, jenž se posílá zákazníkům, aby se seznámili s vlastnostmi vyvinutého přístrojového transformátoru proudu, který dostal název CTT 12.

Dále v příloze 5 je přiloženo několik fotografií reálně vyrobeného a odzkoušeného prototypu.



LITERATURA

- [1] KOPEČEK, J., DVOŘÁK, M. *Přístrojové transformátory (měřicí a jisticí)*. Praha: ACADEMIA, 1966.
- [2] KRÁL, J., VANĚK, J. *Elektromagnetické přístroje*. Brno: VUT, 1984. Učební texty vysokých škol.
- [3] ČSN EN 60044 - 1. *Přístrojové transformátory – Část 1: Transformátory proudu*. Listopad 2001
- [4] ČSN EN 60044 – 1 ZMĚNA A1. *Přístrojové transformátory – Část 1: Transformátory proudu*. Listopad 2001
- [5] ČSN EN 60044 – 1 ZMĚNA A2. *Přístrojové transformátory – Část 1: Transformátory proudu*. Zář 2003
- [6] MERAK, V. *MT – poradna [online]*. 2002, [cit. 2013-9-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.mtbrno.cz/index.php?l=cs&k=poradna>>
- [7] VLÁČILOVÁ, H., VILÍMKOVÁ, M., HENCL, L. *Základy práce v CAD systému SolidWorks*. Brno: Computer Press, a.s., 2006. ISBN 80-251-1314-0.
- [8] KOČMAN, K., HOLBA, J., IHLÁR, A., MRAVEC, R. *Elektrické stroje a přístroje 1*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1990.
- [9] GROSS A KOLEKTIV. *Laboratorní a numerická cvičení z elektrických přístrojů*. Brno: VUT, 1983.



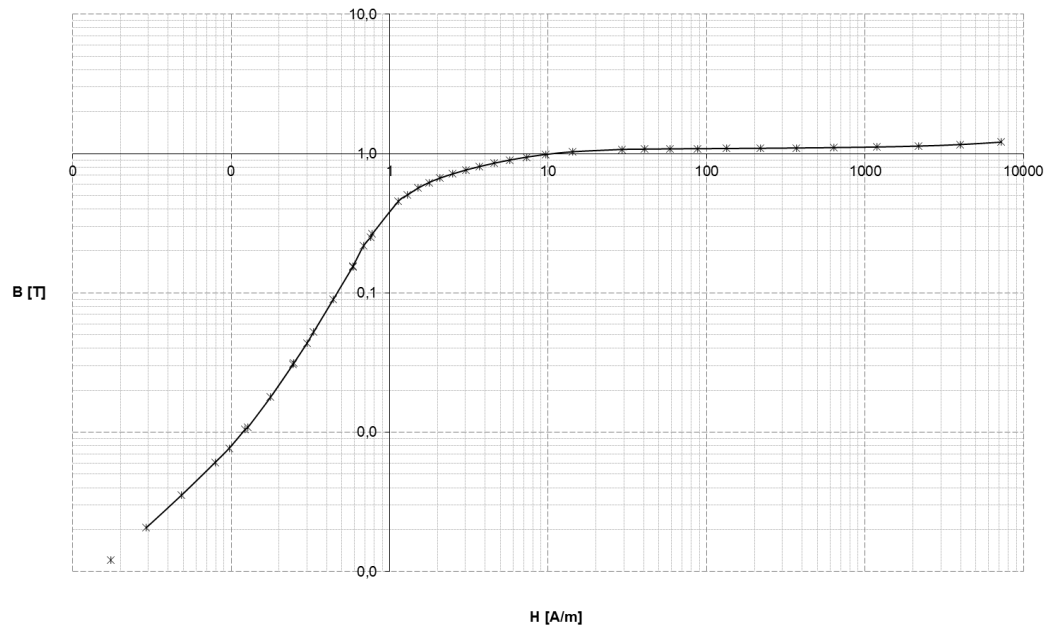
PŘÍLOHY

7.1 Příloha 1 – určení průřezu primárního vodiče

Tab. 2. DOVOLENÉ PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ NATŘENÝCH VODOROVNĚ VEDENÝCH MĚDĚNÝCH PLOCHÝCH VODIČŮ V ROZVÁDEČÍCH

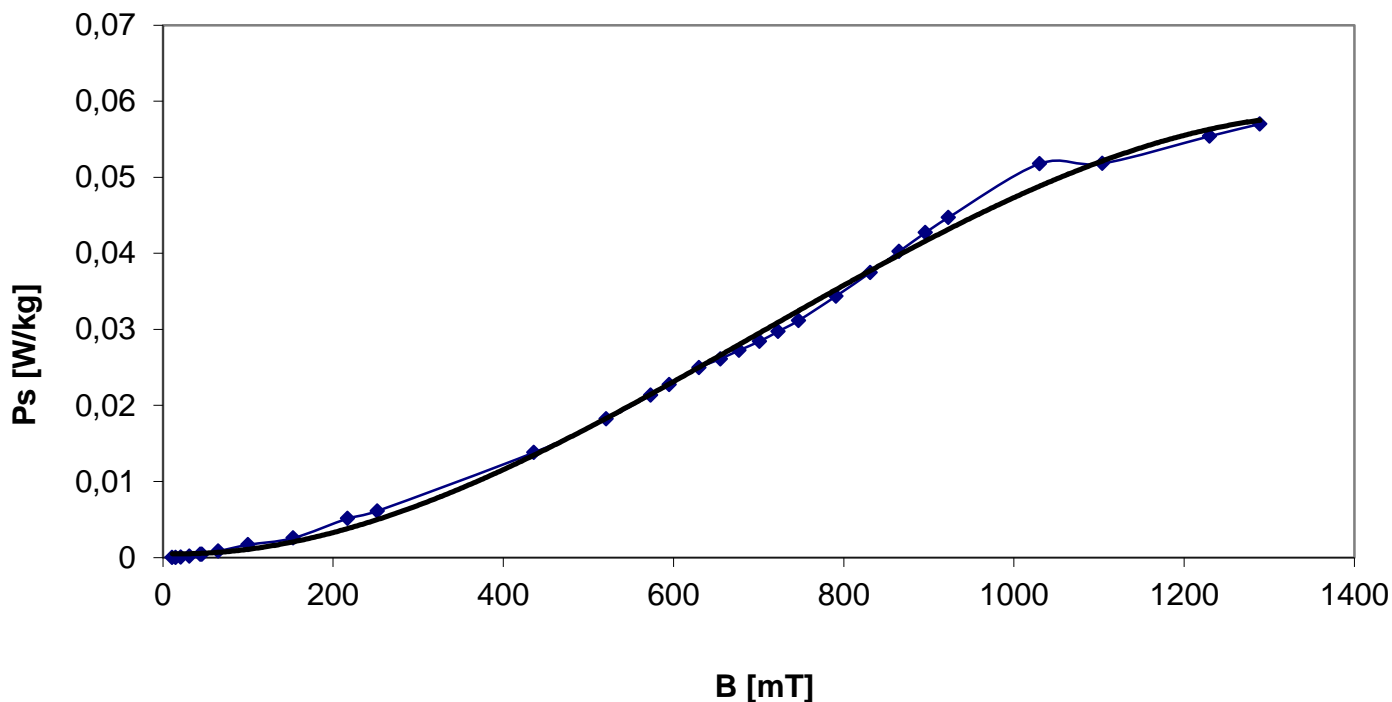
Vodič				Dovolené proudové zatížení I v A při provozní teplotě 85 °C																		
a x b řídka	Prů- řez mm ²	Hmot- nost kg/m	I _N A	Počet a uložení vodičů – teplota prostředí uvnitř rozváděče																		
				35 °C						45 °C						85 °C						
m				I	II	III	—	=	≡	I	II	III	—	=	≡	I	II	III	—	=	≡	
12	x 2	24	0,21	125	155	263		140	224		139	236		125	200		98	168		90	140	
16	x 3	48	0,43	200	248	422		220	360		222	376		200	320		156	265		140	225	
	5	80	0,71	280	347	590		310	500		310	527		280	450		218	370		195	315	
	8	128	1,14	360	448	757		400	645		400	680		360	580		281	478		250	405	
20	x 2	40	0,36	205	254	432		230	365		228	388		205	330		160	272		145	230	
	3	80	0,53	245	304	516		270	440		272	462		245	390		192	328		175	280	
	5	100	0,86	325	404	688		360	585		380	610		325	520		254	432		230	365	
25	x 3	75	0,87	300	372	632		335	535		333	566		300	480		234	398		210	340	
	5	125	1,11	395	490	833		440	710		440	748		395	635		308	524		280	445	
	8	200	1,78	520	645	1100		580	935		577	980		520	835		406	690		365	585	
32	x 5	160	1,42	480	595	1010		535	860		532	900		480	785		374	635		340	540	
	8	255	2,28	630	780	1325		700	1125		700	1190		630	1010		492	835		440	710	
60	x 3	120	1,06	480	570	670		510	825		510	855		480	735		356	610		320	520	
	5	200	1,77	600	744	1260		670	1070		666	1130		600	980		488	795		420	685	
	8	320	2,85	750	930	1580		840	1340		832	1410		750	1200		585	995		525	845	
10		400	3,58	850	1055	1780	2840	950	1520	2240	945	1605	2380	850	1365	2000	684	1130	1660	600	880	1310
8		250	2,23	720	890	1515	2230	800	1290	1890	800	1380	2000	720	1155	1700	580	955	1400	500	610	1190
10	x 5	400	3,58	900	1115	1895	2870	1000	1610	2440	990	1680	2480	890	1460	2110	700	1190	1750	630	1010	1490
10		500	4,45	1030	1275	2170	3080	1150	1850	2600	1140	1940	2730	1035	1650	2320	800	1365	1925	720	1180	1640
5		300	2,87	850	1055	1790	2530	950	1520	2150	945	1605	2260	850	1360	1920	680	1120	1590	609	950	1355
60	x 3	480	4,27	1050	1305	2220	3130	1175	1890	2690	1165	1980	2800	1060	1680	2380	820	1390	1970	740	1160	1680
10		600	5,34	1200	1490	2530	3580	1340	2150	3040	1300	2220	3130	1170	1890	2680	935	1590	2240	840	1350	1910
20	x 5	480	3,58	1070	1325	2260	3050	1190	1910	2800	1185	2010	2720	1070	1710	2310	835	1420	1920	750	1210	1630
8		640	5,70	1250	1550	2630	3580	1395	2240	3020	1385	2305	3180	1250	1980	2700	875	1660	2340	880	1410	1910
10		800	7,12	1560	1930	3080	4440	1735	2820	3780	1730	2770	3980	1555	2350	3360	1215	1940	2600	1090	1850	2380
20	x 5	500	4,44	1350	1670	2670	3680	1500	2270	2940	1500	2400	3300	1350	2040	2640	1055	1690	2320	950	1435	1860
8		800	7,12	1650	2045	3270	4500	1840	2780	3500	1830	2830	4000	1650	2480	3200	1285	2050	2630	1160	1740	2285
10		1000	8,90	1880	2330	3730	5125	2100	3160	4100	2090	3340	4600	1860	2840	3680	1485	2340	3220	1320	1990	2580
30	x 10	1200	10,87	2200	2730	4370	5730	2480	3720	4580	2440	3900	5120	2200	3320	4100	1710	2720	3600	1540	2310	2880
60	x 10	1800	14,20	2800	3480	5570	7300	3130	4730	5480	3100	4960	6500	2800	4210	4870	2190	3500	4600	1970	2970	3850
16		2560	22,78	3600	4460	7140	9360	4005	6070	7000	4000	6400	8400	3600	5450	6300	2810	4500	5900	2530	3820	4430

7.2 Příloha 2 – Magnetizační charakteristika Nc

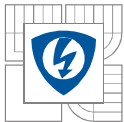


B_m	H_{ef}	B_m	H_{ef}
[T]	[A/m]	[T]	[A/m]
1,2098911	7229,8092	0,5043836	1,2945695
1,1613744	3990,2927	0,4553122	1,1358179
1,1327028	2173,8801	0,2654019	0,777319
1,1154799	1179,5089	0,2604	0,7711
1,1048374	631,72908	0,217	0,683
1,0975563	366,68415	0,185	0,6491
1,0924574	218,09673	0,1547139	0,5856524
1,088438	133,95751	0,1539	0,5845
1,0851631	87,216951	0,0901786	0,441146
1,0817049	58,73904	0,0525654	0,3316222
1,0772695	40,417236	0,0434	0,3
1,0704209	29,098365	0,0312835	0,248017
1,0312192	14,302174	0,03079	0,246
0,9864489	9,6866173	0,0178557	0,1769047
0,9434841	7,3104498	0,010851	0,1273503
0,899355	5,727788	0,0104324	0,1220041
0,854456	4,5698331	0,00769	0,0971
0,8086215	3,6960633	0,0060815	0,079193
0,7620067	3,0180693	0,0035448	0,0486478
0,7142146	2,4843299	0,0020662	0,0290954
0,6669497	2,0718129	0,0012043	0,0173589
0,620098	1,7706601		
0,565961	1,511058		

7.3 Příloha 2 – měrné ztráty při magnetické indukci Nc



B	Ps	B	Ps
mT	W/kg	mT	W/kg
8	0,000007	630	0,02495
11	0,000011	655	0,02612
15	0,000016	677	0,027243
21	0,000054	701	0,028426
31	0,000161	723	0,029728
44	0,00041	747	0,031172
46	0,000437	791	0,034373
65	0,00083	831	0,037461
100	0,001673	865	0,04023
153	0,002555	896	0,042715
185	0,003841	923	0,044706
217	0,005131	1030	0,051776
260	0,006921	1104	0,051814
436	0,013809	1230	0,055402
521	0,018211	1289	0,057005
573	0,02133		
595	0,022746		



7.4 Příloha 3 – Protokol o typové zkoušce

ivep[®]

IVEP, a.s.
619 00 Brno, Vídeňská 117a

LABORATOŘ MĚŘICÍCH TRANSFORMÁTORŮ

PROTOKOL O ZKOUŠCE č.: 73-0158/14

Přístrojový transformátor proudu typu CTT 12



Ing. Rada Vlastimil
vedoucí laboratoře měřicích transformátorů
IVEP, a.s.

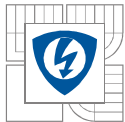
V Brně dne: 5.5.2014


Změny a doplňky v tomto protokolu mohou být provedeny pouze v laboratoři měřicích transformátorů IVEP, a.s.

Autorizované metrologické středisko
IVEP, a.s.

telefon: + 420547136698
fax: + 420547136402

e-mail: ams@ivep.cz
<http://www.ivep.cz>



	Protokol o zkoušce číslo: 73 – 0158/14	List: 1
	Předmět zkoušky: Přístrojový transformátor proudu CTT 12	Počet listů: 7
Typ: CTT 12	Druh zkoušky: typová zkouška	
Jmenovité hodnoty: Převod 4 000 // 5 / 5 A Jmenovitá zátěž 15 / 15 VA Třída přesnosti 0,5 FS10 / 5P20 Jmenovité izolační hladiny 12 / 28 / 75 kV Jmenovitý krátkodobý tepelný proud 50 kA Jmenovitý dynamický proud 125 kA Třída izolace E Jmenovitý kmitočet 50 Hz Číslo výkresu 132006001/1	Zkoušeno podle: ČSN EN 60044-1 IEC 60044-1	Zkoušku zadal: KPB INTRA, s.r.o. Ždánská 477 685 01 Bučovice
Výrobní číslo: 118066	Atmosférické podmínky: Teplota: °C Tlak: hPa Vlhkost vzduchu: %	
Výrobce výrobků: KPB INTRA, s.r.o. Ždánská 477 685 01 Bučovice	Vzorky dodány dne: Duben 2014	
Výsledek zkoušky: Přístrojový transformátor proudu typu CTT 12, výrobce KPB INTRA, s.r.o. , vyhověl podmínkám typové zkoušky podle ČSN EN 60044-1a IEC 60044-1.		
Datum zkoušky: duben 2014	Zkoušeli: Ing. Vlastimil Rada Ing. Mašková Hana	Vedoucí: Ing. Vlastimil Rada





Protokol o zkoušce číslo: 73 – 0158/14

List: 2

Předmět zkoušky: Přístrojový transformátor proudu CTT 12

Počet listů: 7

Na přístrojovém transformátoru proudu typu CTT 12, byla na zkratovně ETD transformátory a.s., na zkušební vvn a v laboratoři měřících transformátorů IVEP, a.s. provedena typová zkouška dle norem ČSN EN 60044-1 a IEC 60044-1.

Měřící transformátor byl vyroben dle výkresu sestavy č. 132006001.

Typová zkouška byla provedena v tomto rozsahu:

1. Zkouška krátkodobými proudy
2. Oteplovací zkoušky
3. Zkouška atmosférickým impulsem
4. Izolační zkouška sekundárních vinutí střídavým napětím průmyslového kmitočtu
5. Přepětová zkouška mezizávitové izolace
6. Zkouška primárního vinutí střídavým napětím průmyslového kmitočtu
7. Měření částečných výbojů
8. Kontrola správnosti značení svorek
9. Měření chyb
10. Měření nadproudového čísla
11. Měření celkové chyby

1. Zkouška krátkodobými proudy

Zkouška byla provedena na zkratovně ETD transformátory a.s. (viz protokol o zkoušce č. P_EZ/2014/074/01/CZ ze dne 22.4.2014).

Na základě vyhodnocení oscilografických průběhů primárních a sekundárních proudů, vyhovujících výsledků měření chyb po odmagnetování magnetických obvodů a opakovaných izolačních zkouškách střídavým napětím průmyslového kmitočtu včetně měření částečných výbojů a zevní prohlídce povrchu transformátorů, byl výsledek zkoušky vyhovující.

Zkratová zkouška byla provedena při těchto zkratových proudech:

Transformátor CTT 12, výrobní číslo 118066 – převod 4 000 // 5 / 5 A

$$I_{th} = 50 \text{ kA}_{ef} / 1 \text{ s}$$

$$I_{dyn} = 125 \text{ kA}_{max}$$

Přístrojový transformátor proudu typu CTT 12 **vyhoví** ČSN EN 60044-1 čl. 7.1 a IEC 60044-1 čl. 7.1.

2. Oteplovací zkouška

Oteplovací zkouška byla provedena v laboratoři měřících transformátorů IVEP, a.s. na přístrojovém transformátoru proudu typu CTT 12 v. č. 118066 při jmenovitém primárním proudu 4 000 A. Přístrojový transformátor proudu byl připojen ke zdroji šesti kabely o průřezu 500 mm². Sekundární vinutí 1S1-1S2 bylo zatíženo jmenovitou zátěží 15 VA s účinníkem $\cos\beta = 1$ a sekundární vinutí 2S1-2S2 bylo zatíženo jmenovitou zátěží 15 VA s účinníkem $\cos\beta = 1$. Oteplení sekundárních vinutí bylo měřeno změnou ohmického odporu mostem Wheatstone-Thomson typ 4102GB1D výrobce NORMA - Kalibrační list č. 884/2012. Naměřené hodnoty oteplení sekundárních vinutí:

Sekundární vinutí	Oteplení
1S1 - 1S2	37,98 K
2S1 - 2S2	37,32 K

Teplota primárních pasů, tělesa transformátoru a přívodních kabelů byla měřena pomocí termočlánků s kontinuálním záznamem teploty na PC. Označení měřených bodů je v tab. 1.

Průběh oteplení je na obr. 1.

Tab. 1

Měřené body	
11.	Přívodní kabel 1m od P1
12.	Pas na P1
13.	Přívodní kabel 1m od P2
14.	Pas na P2
15.	Těleso transformátoru
Tok	Teplota okolí



Protokol o zkoušce číslo: 73 – 0158/14

List: 3

Předmět zkoušky: Přístrojový transformátor proudu CTT 12

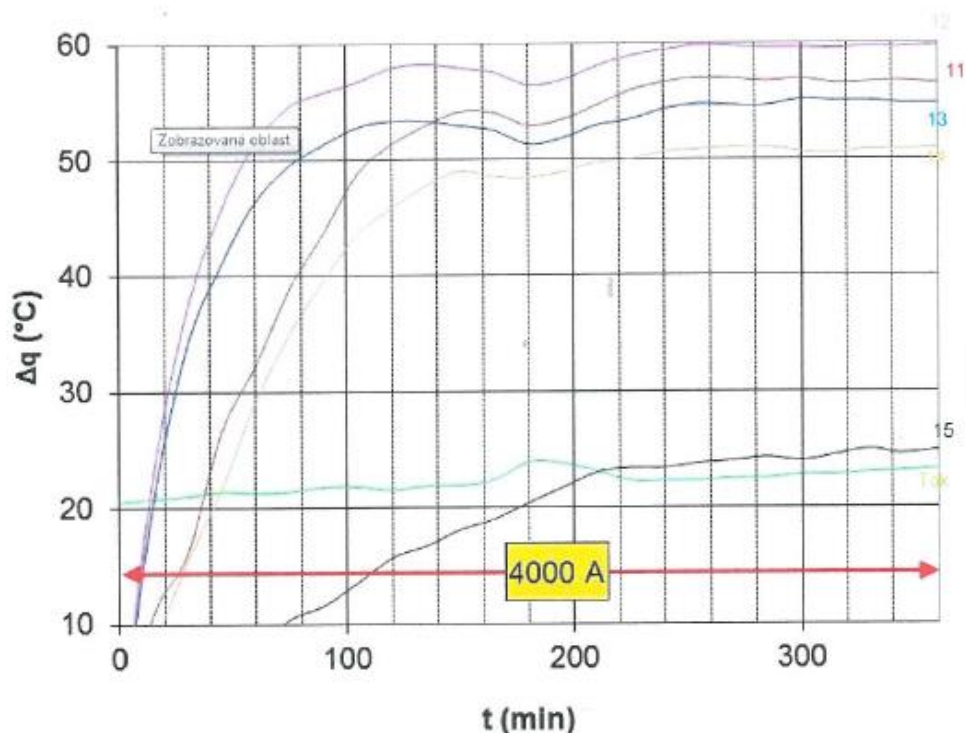
Počet listů: 7

Obr. 1

Průběh oteplení pro CTT 12

Soubor: CTT12_03

Zkoušeno dne: 6.5.2014



Přístrojový transformátor proudu typu CTT 12 vyhověl ČSN EN 60044-1 čl. 7.2 a IEC 60044-1 čl. 7.2 pro třídu izolace E.

3. Zkouška atmosférickým impulsem

Zkouška byla provedena na přístrojovém transformátoru proudu typu CTT 12 na zkušební vvn IVEP, a.s. Zkušební napětí přiloženo na primární Cu pasy, zkratované sekundární svorky spojeny s kostrou a se zemí. Průběh impulsního napětí byl v souladu s IEC 60060-1. Popis a podrobné výsledky zkoušky jsou uvedeny ve zkušebním protokolu č. 82-1625 (ze dne 5.5.2014).

Zkušební napětí	Počet impulsů	Počet přeskoků	Výsledek:
+ 75 kV	15	0	vyhovující
- 75 kV	15	0	vyhovující

Přístrojový transformátor proudu typu CTT 12 vyhověl ČSN EN 60044-1 čl. 7.3.2 a IEC 60044-1 čl. 7.3.2.



Protokol o zkoušce číslo: 73 – 0158/14

List: 4

Předmět zkoušky: Přístrojový transformátor proudu CTT 12

Počet listů: 7

4. Izolační zkouška sekundárních vinutí střídavým napětím průmyslového kmitočtu

Zkouška byla provedena v laboratoři měřicích transformátorů IVEP, a.s. zkušebním střídavým napětím 3 kV/50 Hz po dobu 1 minuty mezi zkratovanými sekundárním svorkami a za provozu uzemněnou montážní deskou a mezi zkratovanými sekundárními svorkami 1S1-1S2 a 2S1-2S2.

Přístrojový transformátor proudu typu CTT 12 vyhověl ČSN EN 60044-1 čl. 8.3 a IEC 60044-1 čl. 8.3.

5. Přepětová zkouška mezizávitové izolace

Zkouška byla provedena v laboratoři měřicích transformátorů IVEP, a.s. na přístrojovém transformátoru proudu typu CTT 12 při jednom sekundárním vinutí otevřeném a druhém vinutí zkratovaném. Vrcholová hodnota napětí 4,5 kV na otevřeném sekundárním vinutí byla měřena vrcholovým voltmetrem Siemens v.č. Z254 po dobu 60 sekund.

Svorky - vinutí	U _{max}	Primární proud	Výsledek:
1S1-1S2	4,5 kV	3 600 A	vyhovující
2S1-2S2	4,5 kV	3 140 A	vyhovující

Přístrojový transformátor proudu typu CTT 12 vyhověl ČSN EN 60044-1 čl. 8.4 a IEC 60044-1 čl. 8.4.

6. Zkouška primárního vinutí střídavým napětím průmyslového kmitočtu

Zkouška byla provedena na přístrojovém transformátoru proudu typu CTT 12 na zkušebně vvn IVEP, a.s. Zkušební napětí přiloženo na primární Cu pasy, zkratované sekundární svorky spojeny s kostrou a se zemí. Popis a podrobné výsledky zkoušky jsou uvedeny ve zkušebním protokolu č. 82-1625 (ze dne 5.5.2014).

Zkušební napětí	Kmitočet	Trvání zkoušky	Výsledek:
28 kV	50 Hz	60 sekund	vyhovující

Přístrojový transformátor proudu typu CTT 12 vyhověl ČSN EN 60044-1 čl. 8.2.1 a IEC 60044-1 čl. 8.2.1.

7. Měření částečných výbojů

Měření bylo provedeno zařízením TETTEX, typ 9124 dle zkušebního postupu metodou B uvedenou v IEC 60044-1 čl. 8.2 a ČSN IEC 60044-1 čl. 8.2, naměřené hodnoty vyhovují pro nejvyšší napětí pro zařízení 12 kV v sítích IT a kompenzovaných sítích.

	Zkušební napětí	Hodnota amplitudy částečných výbojů	Poznámka
Před zkratovou zkouškou	$U_{zk} = 1,2 U_m - 14,4kV$	$q = 2 pC$	Vyhovující
	$U_{zk} = 1,2 U_m / \sqrt{3} - 8,31kV$	$q < 2 pC$	Vyhovující
Po zkratovou zkoušce	$U_{zk} = 1,2 U_m - 14,4kV$	$q = 2 pC$	Vyhovující
	$U_{zk} = 1,2 U_m / \sqrt{3} - 8,31kV$	$q < 2 pC$	Vyhovující

Přístrojový transformátor proudu typu CTT 12 vyhověl ČSN EN 60044-1 čl. 8.2. a IEC 60044-1 čl. 8.2.

8. Kontrola správnosti značení svorek

Kontrola polarit primárního a sekundárního vinutí byla provedena v laboratoři měřicích transformátorů IVEP, a.s. při zkoušce přesnosti.

Značení primárních a sekundárních svorek přístrojového transformátoru typu CTT 12 vyhovělo ČSN EN 60044-1 čl. 8.1a IEC 60044-1 čl. 8.1.



Protokol o zkoušce číslo: 73 – 0158/14

List: 5

Předmět zkoušky: Přístrojový transformátor proudu CTT 12

Počet listů: 7

9. Měření chyb

Měření bylo provedeno diferenciální metodou zařízením od firmy Tettex na ověřování měřících transformátorů proudu typ 2761, v.č. 136'127 - Kalibrační list č. 8017-KL-T0072-12

Při měření bylo dále použito těchto zařízení:

Měřicí transformátor proudu - komparátor Tettex typ 4764, v. č. 135'233- Kalibrační list č. 1032-KL-10018-12

Proudová zátěž Tettex typ 3671/KK, v. č. 135'897 - Kalibrační list č. 8017-KL-T0107-10

Naměřené hodnoty chyb, proudu a úhlu před a po zkratové zkoušce jsou uvedeny v následující tabulce.

Výrobní číslo	Chyby	% jmenovitého primárního proudu					Zátěž [VA]
		1	5	20	100	120	
118066 1S1-1S2	ϵ_1 [%]	+ 0,1084	+ 0,1221	+ 0,1193	+ 0,1180	+ 0,1183	3,75 $\cos \beta=1$
	δ_1 [°]	+ 1,33	+ 0,84	+ 0,49	+ 0,15	+ 0,14	
	ϵ_1 [%]	+ 0,0989	+ 0,1098	+ 0,1111	+ 0,1144	+ 0,1147	15 $\cos \beta=0,8$
	δ_1 [°]	+ 1,64	+ 0,98	+ 0,60	+ 0,10	+ 0,09	
118066 1S1-1S2 po zkratové zkoušce	ϵ_1 [%]	+ 0,1273	+ 0,1241	+ 0,1183	+ 0,1148	+ 0,1134	3,75 $\cos \beta=1$
	δ_1 [°]	+ 0,88	+ 0,67	+ 0,40	+ 0,06	+ 0,05	
	ϵ_1 [%]	+ 0,1133	+ 0,1157	+ 0,1124	+ 0,1105	+ 0,1058	15 $\cos \beta=0,8$
	δ_1 [°]	+ 1,38	+ 0,85	+ 0,41	0	+ 0,04	
118066 2S1-2S2	ϵ_1 [%]				+ 0,0948	+ 0,0950	15 $\cos \beta=0,8$
	δ_1 [°]				+ 0,97	+ 0,94	
118066 2S1-2S2 po zkratové zkoušce	ϵ_1 [%]				+ 0,1123	+ 0,1117	15 $\cos \beta=0,8$
	δ_1 [°]				+ 0,50	+ 0,47	

Přístrojový transformátor proudu typu CTT 12 vyhověl ČSN EN 60044-1 čl. 11, 12.3 a IEC 60044-1 čl. 11, 12.3.

10. Měření nadproudového čísla

Měření nadproudového čísla přístrojového transformátoru proudu CTT 12 bylo provedeno nepřímou metodou, při otevřeném primárním vinutí a buzení sekundárního vinutí 1S1-1S2 sinusovým napětím průmyslového kmitočtu.

Výsledek měření je uveden v následující tabulce.

Výrobní číslo	Převod	Zátěž	FS	Zjištěné FS
				Nepřímá metoda
118066	4 000 // 5 A	15 VA	5	4,5

Přístrojový transformátor proudu typu CTT 12 vyhověl ČSN EN 60044-1 čl. 11.6 a IEC 60044-1 čl. 11.6.

11. Měření celkové chyby

Měření celkové chyby přístrojového transformátoru proudu CTT 12 bylo provedeno nepřímou metodou, při otevřeném primárním vinutí a buzení sekundárního vinutí 2S1-2S2 sinusovým napětím průmyslového kmitočtu.

Výsledek měření je uveden v následující tabulce

Výrobní číslo	Převod	Zátěž	Přesnost	ALF	Nepřímá metoda	
					Zjištěné ALF	Změřená celková chyba
118066	4 000 // 5 A	15 VA	5P	20	24,3	4,12%

Přístrojový transformátor proudu typu CTT 12 vyhověl ČSN EN 60044-1 čl. 12.5 a IEC 60044-1 čl. 12.5.



Protokol o zkoušce číslo: 73 – 0158/14

List: 6

Předmět zkoušky: Přístrojový transformátor proudu CTT 12

Počet listů: 7



Izolační zkouška



Výrobní štítek transformátoru



Měření přesnosti

	Protokol o zkoušce číslo: 73 – 0158/14	List: 7
	Předmět zkoušky: Přístrojový transformátor proudu CTT 12	Počet listů: 7

PRŮMYSLOVÉ SKŘÍTKY, INC. PRŮMYSLOVÝ PARK 1 KOTVICKÁ, ÚJEZD BRNO	KAPACITA 1000 μF 100 V 1000 VDC	MĚŘENÍ 1:4
CTT 12		132006001/1
KPB Intra (Industriální Transformátory)		

7.5 Příloha 4 – katalogový list CTT 12

KPB Intra
Instrument Transformers

KPB INTRA s.r.o. tel.: +420517380388
Zdiářská 477 e-mail: info@kpb intra.cz
685 01 Bužovice <http://www.kpb intra.cz>

PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR PROUDU CTT 12 TECHNICKÉ PARAMETRY



Přístrojový transformátor proudu CTT 12 je konstruován v jednozávitovém průchozím provedení a je určen k měření i jistění vnitřních rozvodných zařízení vn pro jmenovité primární proudy do 5000 A a nejvyšší napětí soustavy 12 kV.

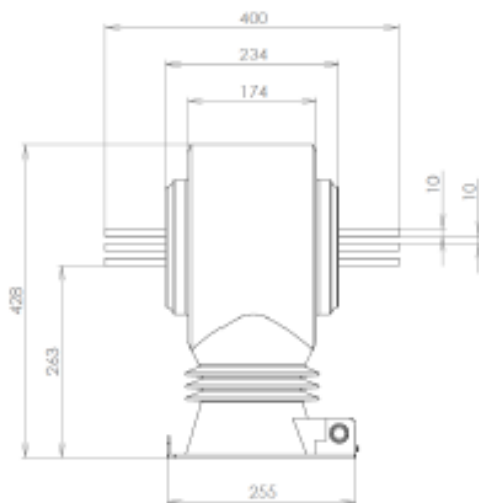
Izolátní napětí	12 kV
Zkušební napětí	28 kV
Zkušební napětí rázové	75 kV
Jmenovitý primární proud	1000 – 5000 A
Jmenovitý sekundární proud	5 (1) A
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Zatěž	5 – 60 VA
Třída přesnosti	0,2S ; 0,2 ; 0,5S ; 1 ; 3 ; 5P ; 10P ; PX ; TPX ; TPY
Jmenovitý krátkodobý tepelný proud (I_N)	50 kA
Hmotnost	3,2 kg

- Hodnota sekundárního proudu je 5 A nebo 1 A s možností kombinace.
- Třídy přesnosti pro měřicí obvody jsou 0,2S ; 0,2S ; 0,5S ; 0,5 ; 1 ; 3 a třídy přesnosti pro jistící obvody jsou 5P a 10P. Po vzájemné konzultaci se zadavatelem je možný návrh speciálních tříd PX ; TPX a TPY.
- Transformátory splňují požadovanou třídu přesnosti v rozmezí 25 % až 100 % jmenovité zátěže. Pro zátěže < 10 VA splňují požadovanou třídu přesnosti v rozmezí 0 až 100 %.
- Krajiní provozovací proud je 120 % I_N , po dohodě mezi výrobcem a zákazníkem je možno dodat i jiné hodnoty např. 200 % I_N .
- Sekundární vinutí je navinuto na magnetickém jádře z orientovaných slitin. Maximální počet jader je 3 dle přání zákazníka.
- Všechny aktivní části transformátoru jsou zality epoxidovou směsí, tato hmota plní funkci elektroizolační i mechanickou.
- Montážní plocha transformátoru je libovolná, upevnění se provede pomocí čtyř šroubů na základové desce (obr. 3).
- Počet a poloha primárních vodičů (měděný pas) je dána velikostí primárního proudu ($I_N \leq 4000$ A vodorovně, $I_N > 4000$ A svisle. Kontaktování je na obr. 4).
- K připojení na sekundární vývody doporučujeme použít kabelová oka dle použitého průřezu vodiče. Sekundární svorkovnice je opatřena krytem s plombovacím šroubem, uvnitř je uložen příbal, který obsahuje propojky a šroubky pro možnost uzemnění a vyzkratování vinutí (viz „Návod pro obsluhu a montáž“).
- Transformátory CTT 12 vyhověly všem zkouškám dle ČSN EN 61869 – 2.

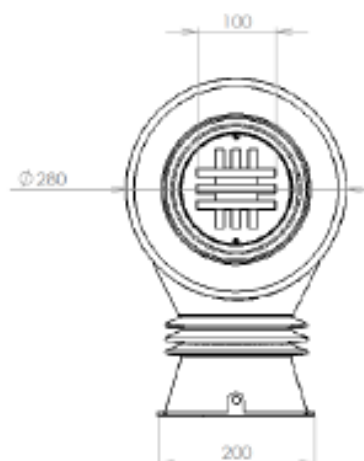
KPB Intra
Instrument Transformers

KPB INTRA s.r.o.
Žďárská 477
685 01 Bužovice

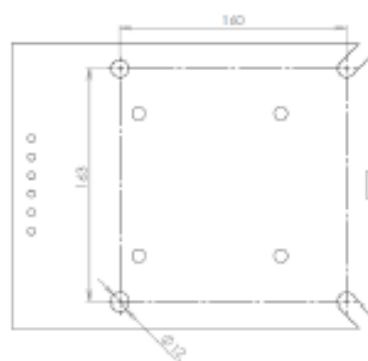
tel.: +420517380388
e-mail: info@kpb intra.cz
<http://www.kpb intra.cz>



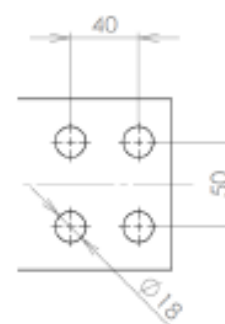
Obrázek 1



Obrázek 2



Obrázek 3



Obrázek 4

7.6 Příloha 5 – fotografie prototypu CTT 12

