



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MĚŘICÍ TRANSFORMÁTOR PROUDU 2500/1 A PRO SOUSTAVY S NEJVYŠŠÍM NAPĚTÍM 0,72 KV

CURRENT TRANSFORMER 2500/1 A FOR SYSTEMS WITH THE HIGHEST VOLTAGE OF 0.72 KV

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Vykoukal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Dostál

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Tomáš Vykoukal

ID: 162855

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Měřicí transformátor proudu 2500/1 A pro soustavy s nejvyšším napětím 0,72 kV

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte rozbor funkce přístrojového transformátoru proudu určených pro měření a jištění v energetických sítích.
2. Proveďte analýzu fyzikální podstaty přístrojového transformátoru proudu.
3. Navrhněte konstrukční části měřicího transformátoru proudu s následujícími parametry 15VA Třída přesnosti 0.5S FS10 50 Hz $I_{th} = 60 \times I_n$ Ext. 120%.
4. Vytvořte model transformátoru a analyzujte získané poznatky z (elektromagnetických) tepelných simulací při volbě různých primárních vodičů.
5. Vyroberte laboratorní vzorek transformátoru.
6. 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] Havelka, Otto a kol. : Elektrické přístroje učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických, SNTL 1985
- [4] Měřička J., Zoubek Z. : Elektrické stroje, skriptum ČVUT 1990
- [5] Patočka, Miroslav: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice, VUTIUM 2011

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Dostál

Konzultant:

doc. 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, analýzou, návrhem, výrobou a testováním přístrojového transformátoru proudu. Jedná se o měřicí transformátor proudu v jednozávitovém provedení s převodem 2500/1 A. Práce zahrnuje teorii, analýzu, numerický výpočet, tepelnou simulaci a částečnou typovou zkoušku měřicího transformátoru proudu. Vývoj tohoto transformátoru probíhá ve spolupráci s firmou zabývající se vývojem a výrobou přístrojových transformátorů KPB Intra s.r.o.

Klíčová slova

Přístrojový transformátor proudu, měřicí transformátor proudu, nadproudové číslo, chyba proudu, chyba úhlu, typová zkouška

Abstract

This thesis deals with the description, analysis, calculation, production and testing of current instrument transformer. It is a measuring current transformer in one turn primary winding with 2500/1 A transfer. This project includes theory, analysis, numerical calculation, thermal simulation and partial type test of the measuring current transformer. This transformer is developing in cooperation with KPB Intra s.r.o. KPB Intra is engaged in the development and production of instrument transformers.

Keywords

Current instrument transformer, measuring current transformer, over current factor, current error, angle error, type test

Bibliografická citace:

VYKOUKAL, Tomáš. *Měřicí transformátor proudu 2500/1 A pro soustavy s nejvyšším napětím 0,72 kV* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119724>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Lukáš Dostál.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Měřicí transformátor proudu 2500/1 A pro soustavy s nejvyšším napětím 0,72 kV 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **22. května 2019**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Lukášovi Dostálovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Děkuji konzultantovi diplomové práce Ing. Drahomírovi Tománkovi (KPB Intra s.r.o.) za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 22. května 2019

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Přístrojové transformátory	13
2.1	Dělení přístrojových transformátorů.....	13
2.2	Termíny a definice	14
2.2.1	Všeobecné definice	14
2.2.2	Definice základních veličin	14
2.2.3	Definice vztahující se k přesnosti	15
3	Přístrojové transformátory proudu	16
3.1	Dělení přístrojových transformátorů proudu.....	17
3.2	Normalizované hodnoty	18
3.3	Charakteristika funkce	21
3.3.1	Sestavení fázorového diagramu	22
3.3.2	Pracovní oblasti přístrojového transformátoru proudu	25
3.3.3	Transformátor proudu při zkratech	26
3.4	Náhradní schéma transformátoru	26
3.5	Chyby transformátoru proudu	28
3.5.1	Závislost chyb na jednotlivých veličinách.....	29
3.5.1.1	Závislost na proudu	29
3.5.1.2	Závislost na břemeni.....	29
3.5.1.3	Závislost na sekundárním účinníku.....	29
3.5.1.4	Závislost na frekvenci.....	29
3.6	Postup při návrhu transformátoru proudu	29
3.6.1	Návrh primárního vodiče	30
3.6.2	Návrh magnetického obvodu	30
3.6.3	Kontrola nadproudového čísla a výpočet chyb transformátoru proudu....	33
4	Návrh přístrojového transformátoru proudu	36
4.1	Požadavky na transformátor.....	36
4.1.1	Elektrické požadavky.....	36
4.1.2	Rozměrové požadavky.....	36
4.2	Návrh tvaru transformátoru.....	37

4.2.1	Postup návrhu tvaru transformátoru	37
4.2.2	Reálný návrh tvaru transformátoru proudu.....	38
4.3	Návrh primárního vodiče	40
4.4	Návrh magnetického obvodu	40
4.5	Kontrola nadproudového čísla a výpočet chyb transformátoru proudu	42
5	Tepelná simulace.....	44
5.1	Výpočet oteplení	44
5.2	Tepelná simulace v programu FEMM	46
5.2.1	Výpočet ustáleného oteplení	46
5.2.2	Výpočet přechodného tepelného jevu oteplování	49
6	Typová zkouška	52
6.1	Typová zkouška měřicího transformátoru proudu	52
6.1.1	Zkouška krátkodobými proudy	52
6.1.2	Oteplovací zkouška.....	53
6.1.3	Zkouška impulzním napětím na svorkách primárního vinutí	55
6.1.3.1	Všeobecně.....	55
6.1.3.2	Zkouška primárního vinutí atmosférickým impulzem pro přístrojové transformátory s $U_m < 300$ kV	56
6.1.4	Zkouška za deště pro transformátory určené do venkovního prostředí	56
6.1.5	Izolační zkouška sekundárního vinutí střídavým napětím průmyslového kmitočtu	57
6.1.6	Přepět'ová zkouška mezizávitové izolace	57
6.1.7	Kontrola správnosti značení svorek	58
6.1.8	Měření nadproudového čísla.....	58
6.1.9	Měření částečných výbojů	59
6.1.10	Měření chyb	59
6.2	Částečná typová zkouška	60
6.2.1	Oteplovací zkouška.....	60
6.2.2	Izolační zkouška sekundárního vinutí střídavým napětím průmyslového kmitočtu	65
6.2.3	Přepět'ová zkouška mezizávitové izolace	65
6.2.4	Kontrola správnosti značení svorek	65

6.2.5	Měření nadproudového čísla.....	65
6.2.6	Měření chyb	66
7	Závěr	68

Seznam obrázků

Obr. 3-1 Přístrojový transformátor proudu – podpěrný, průchodkový, průchozí (zleva doprava) [8].....	17
Graf 3-1 Znázornění chyb proudu pro třídu přesnosti 0,5S podle Tabulky 3-2	20
Graf 3-2 Znázornění chyb úhlu pro třídu přesnosti 0,5S podle Tabulky 3-2.....	20
Obr. 3-2 Principiální znázornění transformátoru proudu.....	21
Obr. 3-3 Náhradní schéma transformátoru proudu	22
Obr. 3-4 Fázorový diagram přístrojového transformátoru proudu při uvážení výše uvedených předpokladů	22
Obr. 3-5 Magnetizační charakteristika feromagnetického materiálu.....	24
Obr. 3-6 Závislost indukovaného napětí na budícím proudu.....	24
Obr. 3-7 Nadproudové charakteristiky transformátoru proudu	25
Obr. 3-8 Náhradní schéma transformátoru	26
Obr. 3-9 Fázorový diagram.....	27
Obr. 3-10 Diagram chyb – podstata.....	28
Obr. 3-11 Komplexní diagram chyb	28
Obr. 4-1 Části krytu transformátoru	38
Obr. 4-2 Model uložení jádra v krytu transformátoru.....	39
Obr. 4-3 Kompletní model transformátoru	39
Graf 5-1 Vypočtené oteplení samotného sekundárního vinutí transformátoru při 100% I_n a 120% I_n	45
Obr. 5-1 Model transformátoru použitý pro výpočet tepelné simulace v programu Femm	47
Obr. 5-2 Vysíťování modelu v programu Femm	48
Obr. 5-3 Počáteční stav transformátoru při simulaci	48
Obr. 5-4 Ustálený stav transformátoru při simulaci pro vodorovnou orientaci primárního vodiče a 100% I_n	49
Graf 5-2 Průběh oteplení při 100% I_n a vodorovné orientaci primárního vodiče získané simulací	50
Graf 5-3 Průběh oteplení při 120% I_n a vodorovné orientaci primárního vodiče získané simulací	50

Graf 5-4 Průběh oteplení při 100% I_n a svislé orientaci primárního vodiče získané simulací	51
Graf 5-5 Průběh oteplení při 120% I_n a svislé orientaci primárního vodiče získané simulací	51
Obr. 6-1 Umístění termočlánků uvnitř transformátoru	60
Obr. 6-2 Měření oteplovací zkoušky při orientaci primárního vodiče vodorovně ...	61
Obr. 6-3 Měření oteplovací zkoušky při orientaci primárního vodiče svisle	61
Graf 6-1 Průběh oteplení při 100% I_n při poloze primárního vodiče vodorovně viz zobrazení na Obr. 6-2.....	62
Graf 6-2 Průběh oteplení při 120% I_n při poloze primárního vodiče vodorovně viz zobrazení na Obr. 6-2.....	63
Graf 6-3 Průběh oteplení při 100% I_n při poloze primárního vodiče svisle viz zobrazení na Obr. 6-3.....	63
Graf 6-4 Průběh oteplení při 120% I_n při poloze primárního vodiče svisle viz zobrazení na Obr. 6-3.....	64
Graf 6-5 Vypočtené a změřené pole chyb proudu	67
Graf 6-6 Vypočtené a změřené pole chyb úhlu	67

Seznam tabulek

Tabulka 3-1 Dovolené chyby proudu a chyby úhlu pro měřicí transformátory proudu (třídy 0,1 – 1,0) [5].....	18
Tabulka 3-2 Dovolené chyby proudu a chyby úhlu pro měřicí transformátory proudu (třídy 0,2S a 0,5S) [5]	19
Tabulka 3-3 Dovolené chyby proudu a chyby úhlu pro měřicí transformátory proudu (třídy 3 a 5) [5].....	19
Tabulka 6-1 Meze oteplení pro různé části, materiály a dielektrika přístrojových transformátorů [4]	54
Tabulka 6-2 Tabulka hodnot získaných při oteplovací zkoušce.....	62
Tabulka 6-3 Vypočtené a změřené pole chyb.....	66

1 ÚVOD

V energetických sítích se užívá velká řada elektrických přístrojů. Ty jsou v takových sítích potřebné jednak k tomu, aby byl provoz co nejspolehlivější, ale také proto, aby byl provoz hospodárný. Elektrické přístroje se dělí na měřicí a jisticí. Měřicí přístroje se používají k měření různých elektrických veličin. Jisticí přístroje jsou stavěné k tomu, aby zajistili bezpečný chod nebo omezili poruchy, které mohou v sítích vznikat a snížili tak riziko vzniku škod. Velikost elektrických veličin v energetických soustavách se pohybuje ve velkém rozsahu. Z toho důvodu se tyto přístroje zapojují do sítí nepřímo přes přístrojové transformátory proudu a napětí, které jsou svou funkcí a konstrukcí uzpůsobeny zvláště k tomuto účelu. Přístrojové transformátory se stejně jako přístroje dělí na měřicí a jisticí. Často jsou obě tyto funkce spojeny v jednom transformátoru.

Primární i sekundární strana může mít několik rozsahů. V praxi se lze setkat s transformátorem, který má přepínání rozsahů jak na primární, tak na sekundární straně. Použití transformátoru se sekundárním či primárním přepínáním nebo použití obou možností se zdá z pohledu univerzality jako nejvhodnější řešení, ale toto řešení může představovat různé úskalí při montáži (může velmi lehce dojít k chybnému zapojení). Dalším problémem je samotná výroba takového transformátoru.

Přístrojové transformátory transformují hodnoty proudů a napětí měřených obvodů na hodnoty vhodné pro napájení měřicích nebo jisticích přístrojů. Dále izolují obvod energetické sítě (vn) od obvodů, které napájí měřicí nebo jisticí přístroje (nn), takže zajišťují i bezpečnost obsluhy těchto přístrojů. V okolí energetických sítí také vznikají silná magnetická a elektrická pole, které by mohly mít nepříznivé důsledky na přesnost měření. Díky přístrojovým transformátorům je pak zajištěna dostatečná vzdálenost přístrojů od těchto polí, čímž se vylučuje jejich nepříznivé působení na správnou funkci přístrojů. Pro jisticí účely lze snadno stanovit součty nebo rozdíly proudů či napětí v několika od sebe navzájem izolovaných obvodech. Vhodnou konstrukcí chrání systémy přístrojů před dynamickými i tepelnými účinky nadproudů. Dále je díky nim možné soustředit měřicí a jisticí přístroje ve velínech mimo prostory rozvodny, čímž přispívají ke snadnému ovládní provozu rozvodny a celých sítí. [1]

Účelem diplomové práce je popsat funkce měřicích a jisticích transformátorů, analyzovat fyzikální podstatu přístrojového transformátoru proudu, navrhnout konstrukci měřicího transformátoru proudu 2500/1 A pro soustavy do 0,72 kV. Následně vytvořit model tohoto transformátoru a na něm provést tepelné simulace. Dále vyrobí prototyp a na něm provést částečnou typovou zkoušku a zhodnotit získané výsledky.

2 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY

Přístrojové transformátory jsou netočivé elektrické stroje, které se užívají k napájení přístrojových obvodů. Konstrukčně i technologicky mají některé znaky společné s ostatními elektrickými netočivými stroji, například s výkonovými transformátory. Funkčními vlastnostmi se však více blíží přístrojům. [1]

2.1 Dělení přístrojových transformátorů

Přístrojové transformátory lze dělit podle několika různých hledisek a parametrů. Uvedeny budou jen nejběžnější typy dělení:

- a) podle transformované veličiny
 - transformátory proudu
 - transformátory napětí
 - transformátory kombinované
- b) podle funkce
 - transformátory měřicí
 - transformátory jisticí
- c) podle způsobu transformace
 - transformátory indukční
 - transformátory kapacitní
- d) podle počtu fází a podle izolace primárního vinutí
 - jednofázové
 - třífázové
 - uzemněné
 - plně izolované
- e) podle umístění
 - transformátory pro vnitřní montáž
 - transformátory pro venkovní montáž

V této práci se však budeme zabývat jen přístrojovými transformátory proudu. Proto ostatní typy už dále nebudou zmiňovány. [2] [6]

2.2 Termíny a definice

2.2.1 Všeobecné definice

***Přístrojový transformátor** – transformátor určený k přenosu informačního signálu do měřicích přístrojů, elektroměrů a ochranných nebo ovládacích zařízení nebo podobných přístrojů [4]*

***Kryt** – pouzdro poskytující typ a stupeň ochrany vhodný pro dané použití [4]*

***Primární svorky** – svorky, na které se aplikuje napětí nebo proud, které mají být transformovány [4]*

***Sekundární svorky** – svorky, které přenášejí informační signál do měřicích přístrojů, elektroměrů a ochranných nebo ovládacích zařízení nebo podobných přístrojů [4]*

***Sekundární obvod** – vnější obvod, který získává informační signály ze sekundárních svorek přístrojového transformátoru [4]*

2.2.2 Definice základních veličin

Jmenovitý primární proud (I_{1n}) – efektivní hodnota primárního proudu [2]

Jmenovitý sekundární proud (I_{2n}) – hodnota sekundárního proudu, která odpovídá při jmenovitém převodu jmenovitému primárnímu proudu [2]

Krajní provozovací proud (I_{1m}) – nejvyšší dovolená hodnota proudu, který může procházet primárním vinutím transformátoru při připojení jmenovitého břemena na jeho sekundární svorky, aniž by byla překročena dovolená trvalá teplota jakékoli části transformátoru a aniž by byly překročeny dovolené chyby [2]

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

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

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

Jmenovité břemeno transformátoru proudu (Z_n) – impedance, kterou lze zatížit transformátor v měřicím rozsahu, aniž by byly překročeny dovolené chyby [2]

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

Jmenovitá zátěž transformátoru proudu (P_n) – součin čtverce jmenovitého sekundárního proudu a jmenovitého břemene [2]

Sekundární účinník transformátoru proudu ($\cos \beta$) – poměr činného odporu a impedance břemene [2]

Jmenovité primární napětí (U_{1N})

2.2.3 Definice vztahující se k přesnosti

Skutečný převod (k) – poměr skutečného primárního napětí nebo proudu ke skutečnému sekundárnímu napětí nebo proudu [4]

Jmenovitý převod (k_r) – poměr jmenovitého primárního napětí nebo proudu k jmenovitému sekundárnímu napětí nebo proudu [4]

Chyba převodu (ϵ) – chyba, kterou přístrojový transformátor vnáší do měření a která vyplývá z faktu, že skutečný převod není roven jmenovitému převodu [4]

Chyba úhlu ($\Delta\varphi$) – fázový rozdíl mezi fázory primárního napětí nebo proudu a sekundárního napětí nebo proudu; orientace fázorů je volena tak, že u ideálního transformátoru je chyba úhlu nulová. Chyba úhlu se považuje za kladnou, jestliže fázor sekundárního napětí nebo proudu předchází fázor primárního napětí nebo proudu. Obvykle bývá vyjádřena v úhlových minutách nebo centiradiánech. [4]

Třída přesnosti – označení přiřazené přístrojovému transformátoru, jehož chyba převodu a chyba úhlu nepřekročí dovolené hodnoty za předepsaných provozních podmínek [4]

Břemeno – admitance (nebo impedance) sekundárního obvodu, vyjádřená v siemensech (nebo ohmech) a účinník [4]

Jmenovité břemeno – hodnota zátěže, ze které jsou odvozeny požadavky na předepsanou přesnost [4]

Jmenovitý zdánlivý výkon (S_r) – hodnota zdánlivého výkonu (ve voltampérech při daném účinníku), který transformátor přenáší do sekundárního obvodu při jmenovitém sekundárním napětí nebo proudu a připojeném jmenovitém břemenu [4]

3 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU

Pro přístrojové transformátory platí stejné fyzikální zákony jako pro ostatní transformátory. Na rozdíl od výkonových transformátorů na přístrojové transformátory klademe jiné požadavky. Spíše než na velikost výkonu (i tato veličina je potřebná pro návrh PT), který je u přístrojových transformátorů podstatně nižší (maximálně desítky VA u NT řádově stovky VA) nežli u výkonových transformátorů, klademe důraz na dodržení chyby proudu a chyby úhlu.

Primární vinutí přístrojových transformátorů proudu je tvořeno jedním či více závitů. Průřez primárního vnutí je volen dle jmenovitého a zkratového proudu.

Do měřeného obvodu se přístrojový transformátor zapojuje sériově s měřeným obvodem. Sekundární vinutí je tvořeno velkým počtem závitů. Tento počet se odvozuje od jmenovitého převodu transformátoru. [2] [3]

3.1 Dělení přístrojových transformátorů proudu

- a) podle tvaru a umístění primárních vývodů
 - transformátory podpěrné
 - transformátory průchodkové
 - transformátory průchozí
- b) podle primárního vinutí
 - jednozávitové
 - závitové
 - smyčkové
 - tyčové
 - násuvné
 - prstencové
- c) podle jiných hledisek
 - jednojádrové
 - vícejádrové
 - s rozebíratelným magnetickým obvodem
 - s několika sekundárními výstupy
 - kaskádové
 - sčítací



Obr. 3-1 Přístrojový transformátor proudu – podpěrný, průchodkový, průchozí (zleva doprava) [8]

3.2 Normalizované hodnoty

Podle normy jsou pro měřicí transformátory proudu dány třídy přesnosti:

0,1 – přesná laboratorní měření

0,2 – laboratorní měření

0,2S – laboratorní měření i měření spotřeby elektrické energie (rozšířený proudový rozsah – od 1% jmenovitého proudu)

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

0,5 – měření elektrické energie

1 – podružné měření

3 – orientační kontrolní měření [9]

Pro sekundární zátěž (25% a 100%) nesmí při jmenovitém kmitočtu chyba proudu a chyba úhlu překročit hodnoty uvedené v Tabulce 3-1 pro třídy přesnosti 0,1; 0,2; 0,5; 1. [5]

Pro sekundární zátěž (25% a 100%) nesmí při jmenovitém kmitočtu chyba proudu a chyba úhlu překročit hodnoty uvedené v Tabulce 3-2 pro třídy přesnosti 0,2S a 0,5S. Pro tyto dvě třídy přesnosti je rozšířený proudový rozsah od 1% do 120% jmenovitého proudu. [5]

Pro třídy 3 a 5 nejsou stanoveny chyby úhlu (Tabulka 2-3).

Tabulka 3-1 Dovolené chyby proudu a chyby úhlu pro měřicí transformátory proudu (třídy 0,1 – 1,0) [5]

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	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,1
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

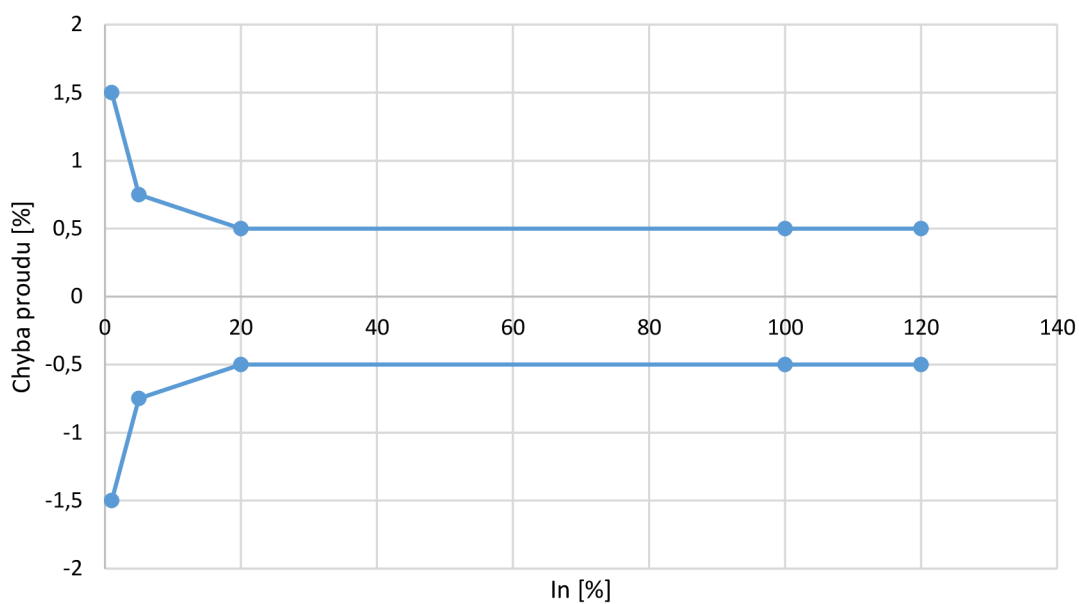
Tabulka 3-2 Dovolené chyby proudu a chyby úhlu pro měřicí transformátory proudu (třídy 0,2S a 0,5S) [5]

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	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9

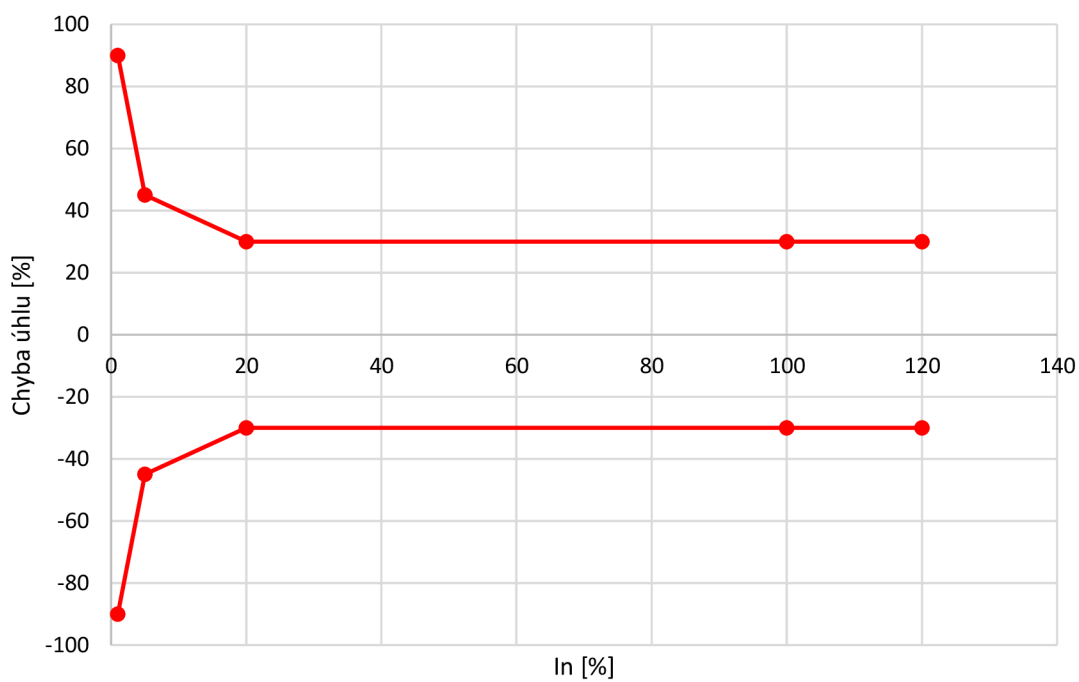
Tabulka 3-3 Dovolené chyby proudu a chyby úhlu pro měřicí transformátory proudu (třídy 3 a 5) [5]

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

Grafy 3-1 ukazují grafické znázornění třídy přesnosti 0,5S. Aby transformátor vyhověl požadavkům třídy přesnosti, musí se jeho chyba proudu a chyba úhlu vejít do oblasti ohraničené horní a dolní křivkou. Ta udává maximální dovolené chyby proudu a chyby úhlu v procentech jmenovitého proudu pro danou třídu přesnosti. Grafy jsou vyneseny na základě Tabulky 3-2. Grafické znázornění ostatních tříd přesnosti jsou uvedeny v Příloze 1.



Graf 3-1 Znázornění chyb proudu pro třídu přesnosti 0,5S podle Tabulky 3-2

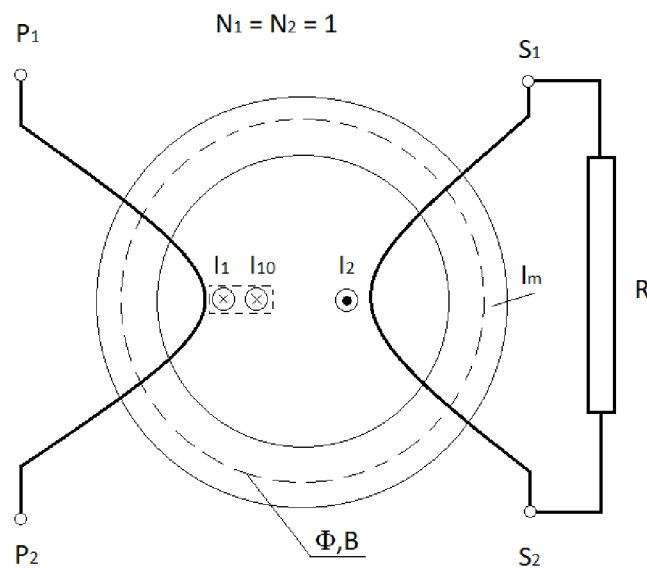


Graf 3-2 Znázornění chyb úhlu pro třídu přesnosti 0,5S podle Tabulky 3-2

3.3 Charakteristika funkce

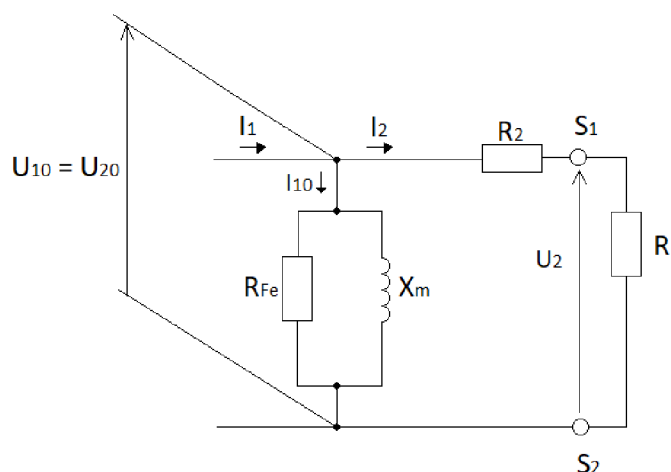
Transformátory proudu napájejí proudové systémy přístrojů jisticích, měřicích a regulačních. Primární vinutí je zapojeno do měřeného obvodu sériově a primární proud se transformuje do sekundárního obvodu, na kterém jsou připojeny přístroje. Na rozdíl od síťových transformátorů a přístrojových transformátorů napětí, jejichž charakteristické vlastnosti odpovídají transformátorům připojeným paralelně k primárnímu obvodu, charakteristické vlastnosti přístrojových transformátorů proudu jsou vlastnosti transformátorů sériových. Poměrem závitů primárního N_1 a sekundárního vinutí N_2 je dán poměr primárního proudu I_1 a sekundárního proudu I_2 . Napětí na primárním a sekundárním vinutí jsou dána jak oběma proudy, tak dílčími impedancemi náhradního schématu. [1]

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$



Obr. 3-2 Principiální znázornění transformátoru proudu

Fázorovou chybu I_{10} představuje složka primárního proudu nutná k magnetizaci jádra a zbývající složka primárního proudu se pak transformuje do sekundárního vinutí. Principiální zobrazení transformátoru proudu je znázorněno na Obr. 3-2. náhradní schéma potom na Obr. 3-3. [7]

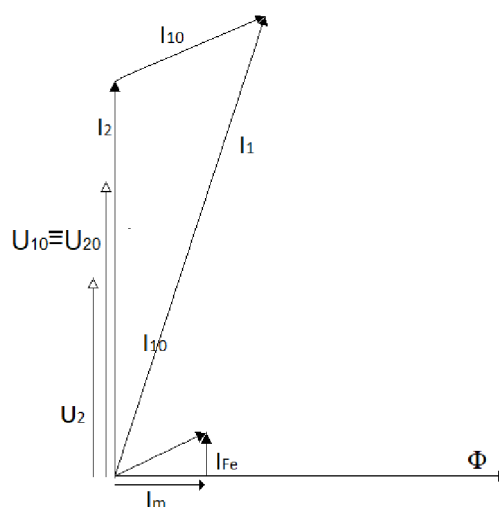


Obr. 3-3 Náhradní schéma transformátoru proudu

Jednotlivé veličiny uvedené v Obr. 3-3 jsou popsány níže v kapitole Sestavení fázorového diagramu.

3.3.1 Sestavení fázorového diagramu

Za předpokladu, že prvky náhradního schématu X_m , R_{Fe} , R a R_2 jsou lineární, potom můžeme vytvořit fázorový diagram (viz Obr. 3-4). Dalším předpokladem bude, že se neprojeví rozptylová reaktance u sekundárního vinutí. S tímto předpokladem můžeme počítat, pokud se jedná o rovnoměrně rozložené vinutí po celém obvodu toroidního jádra. Dále budeme předpokládat, že $N_1=N_2=1$ a $I_2=I_1$ (jinak by se musely všechny veličiny přepočítat na stejný počet závitů). Budeme předpokládat, že na sekundárních svorkách je připojena činná zátěž ($\cos\beta=1$). [7]



Obr. 3-4 Fázorový diagram přístrojového transformátoru proudu při uvážení výše uvedených předpokladů

Pro napětí na sekundárních svorkách platí:

$$U_2 = I_2 \cdot R_z \quad (2)$$

kde R_z zátěž na sekundárních svorkách
 I_2 sekundární proud

Pak potřebné indukované napětí:

$$U_{20} = I_2 \cdot (R + R_2) \quad (3)$$

kde R_2 odpor sekundárního vinutí

Z indukčního zákona pro toto napětí platí:

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

kde f frekvence
 ϕ magnetický tok
 N_2 počet závitů sekundárního vinutí

Proud I_2 je dán primárním proudem a závitovým převodem. Tok ϕ je dán indukovaným napětím.

Celkové magnetické napětí nutné na protlačení magnetického toku ϕ magnetickým obvodem je pak:

$$N_1 \cdot I_{10} = H_0 \cdot l_m \quad (5)$$

kde N_1 počet závitů primárního vinutí
 I_{10} budicí proud

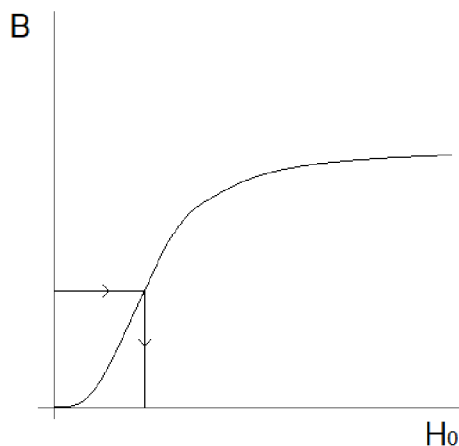
H_0 intenzita magnetického pole

l_m střední délka siločáry magnetického obvodu

Budicí proud:

$$I_{10} = \frac{H_0 \cdot l_m}{N_1} \quad \text{nebo} \quad I_{20} = \frac{H_0 \cdot l_m}{N_2} \quad (6)$$

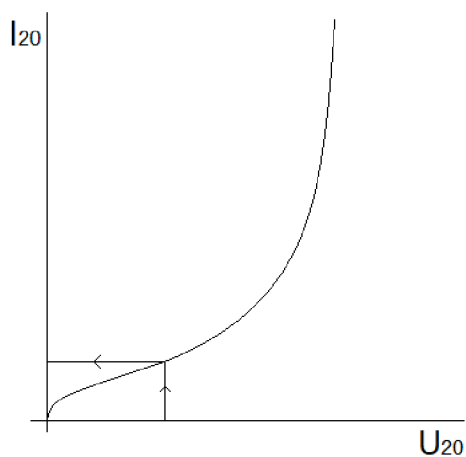
Hodnota jednotkového magnetického napětí H_0 se odečte z magnetizační charakteristiky pro daný magnetický materiál.



Obr. 3-5 Magnetizační charakteristika feromagnetického materiálu

Místo závislosti $B = f(H_0)$ lze pro konkrétní magnetický obvod se sekundárním vinutím o počtu závitů N_2 vynést závislost $H_0 = f(U_{20})$. Místo H_0 lze pak vynést přímo proud I_{10} respektive I_{20} , což je fázorová chyba. Tuto závislost lze změřit jako závislost budícího proudu na přiloženém napětí nebo ji lze vypočítat z magnetizační charakteristiky použitého materiálu. Z této závislosti lze odečíst pro příslušné indukované napětí velikost potřebného budícího proudu (fázorovou chybu) pro konkrétní zátěž transformátoru. Při vztažení této hodnoty k hodnotě primárního případně sekundárního proudu se dostane hodnota fázorové chyby v %. [7]

$$\varepsilon_c = \frac{I_{10}}{I_{1n}} \cdot 100 \quad \text{nebo} \quad \varepsilon_c = \frac{I_{20}}{I_{2n}} \cdot 100 \quad (7)$$



Obr. 3-6 Závislost indukovaného napětí na budícím proudu

3.3.2 Pracovní oblasti přístrojového transformátoru proudu

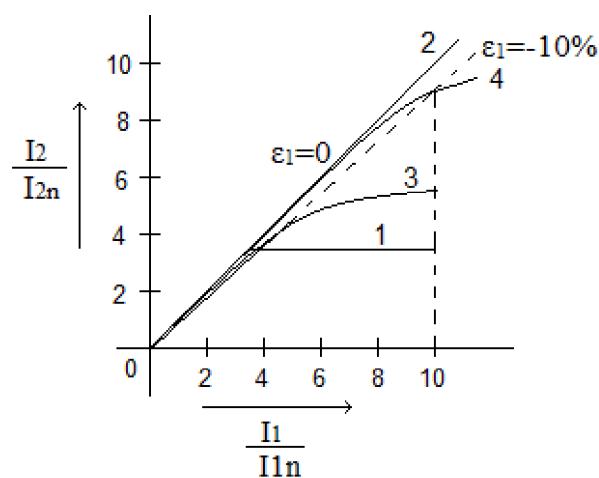
Transformátor proudu pracuje ve dvou oblastech. Za normálního stavu transformátor pracuje v oblasti provozní. Při poruchových stavech nebo přetížení transformátor pracuje v oblasti nadproudové. Hranici mezi těmito oblastmi tvoří krajní provozovací proud (viz výše).

Přesnost transformátoru proudu v provozní oblasti charakterizuje třída přesnosti. V nadproudové části je pak charakterizována nadproudovou charakteristikou s nadproudovým číslem.

Třída přesnosti určuje krajní dovolené chyby transformátoru za stanovených podmínek. Podle normy ČSN EN 61869-2 určuje třída přesnosti zvlášť dovolené chyby proudu a zvlášť dovolené chyby úhlu. Třídy přesnosti podle normy jsou uvedeny výše v Tabulkách 3-1, 3-2, 3-3.

Nadproudová charakteristika udává závislost sekundárního proudu na primárním proudu v nadproudové oblasti. Vlivem feromagnetických vlastností magnetického obvodu je nadproudová charakteristika nelineární. Její analytické vyjádření je obtížné, proto se znázorňuje graficky v pravoúhlém souřadnicovém systému jako závislost násobků jmenovitého sekundárního proudu na násobcích jmenovitého primárního proudu.

Nadproudové číslo vyjadřuje násobek jmenovitého primárního proudu, při kterém chyba proudu dosáhne hodnoty $\varepsilon_I = -10\%$. [1]



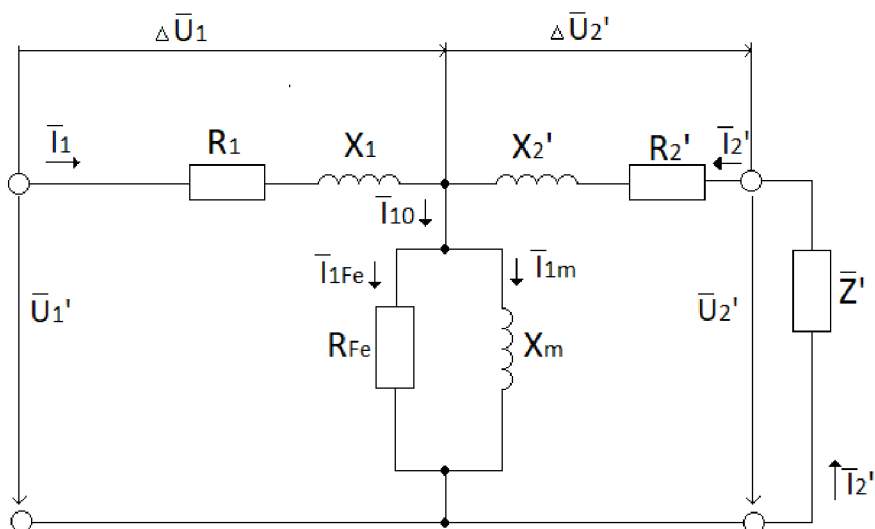
Obr. 3-7 Nadproudové charakteristiky transformátoru proudu

3.3.3 Transformátor proudu při zkratech

V síti, ve které transformátor pracuje, dochází ke zkratům a dalším poruchovým stavům. Tyto stavy mají za následek dynamické, tepelné a elektrické namáhání transformátoru, vůči kterým musí být transformátor odolný. Označuje se to jako zkratová odolnost a zahrnuje jak vnitřní, tak vnější zkratovou odolnost transformátoru. Vnější zkratová odolnost udává schopnost transformátoru odolat účinkům vznikajícím při nadproudech v jeho bezprostředním okolí a souvisí s projektem a montáží zařízení. Vnitřní zkratová odolnost udává schopnost odolat účinkům nadproudů vznikajícím v samotném transformátoru. Ta se tedy týká hlavně samotného návrhu transformátoru proudu.

Zkratovou odolnost transformátoru proudu charakterizuje jmenovitý dynamický proud, jmenovitý krátkodobý proud a zkratová třída. [2]

3.4 Náhradní schéma transformátoru



Obr. 3-8 Náhradní schéma transformátoru

Převod transformátoru platí:

$$k = \frac{N_1}{N_2} \quad (8)$$

Sekundární proud přepočítaný na počet závitů primárního vinutí:

$$I_2' = I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (9)$$

Sekundární napětí přepočítané na počet závitů primárního napětí:

$$U_2' = U_2 \cdot k \quad (10)$$

Odpor sekundárního vinutí přepočítaný na počet závitů primárního vinutí:

$$R'_2 = R_2 \cdot k^2 \quad (11)$$

Reaktance sekundárního vinutí přepočítaná na počet závitů primárního vinutí:

$$X'_2 = X_2 \cdot k^2 \quad (12)$$

Kirchhoffovými zákony lze popsat vlastnosti transformátoru ve všech provozních stavech. Použitím II. Kirchhoffova zákona lze získat rovnice, které platí pro jednotlivé obvody v náhradním schématu.

$$\overline{U}_1 = R_1 \cdot \overline{I}_1 + jX_1 \cdot \overline{I}_1 + \overline{U}_{10} \quad (13)$$

$$\overline{U}'_2 = R'_2 \cdot \overline{I}'_2 + jX'_2 \cdot \overline{I}'_2 + \overline{U}'_{20} \quad (14)$$

Pro indukované napětí platí:

$$\overline{U}_{10} = \overline{U}'_{20} \quad (15)$$

Podle I. Kirchhoffova zákona dále platí:

$$\overline{I}_1 = \overline{I}_{10} - \overline{I}'_2 \quad (16)$$

Z rovnic (13) a (14) lze vyjádřit indukovaná napětí:

$$\overline{U}_{10} = \overline{U}_1 - R_1 \cdot \overline{I}_1 + jX_1 \cdot \overline{I}_1 \quad (17)$$

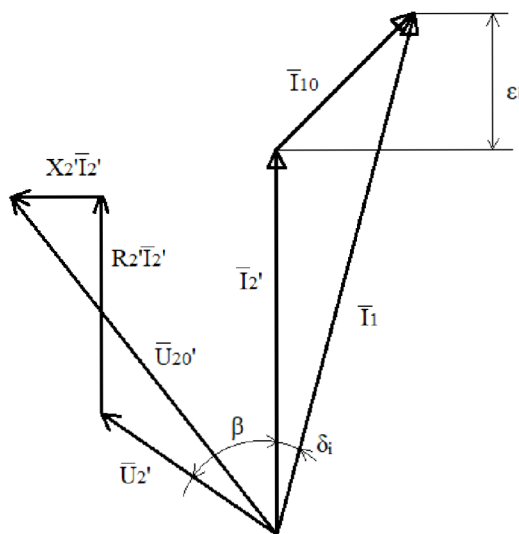
$$\overline{U}'_{20} = \overline{U}'_2 - R'_2 \cdot \overline{I}'_2 + jX'_2 \cdot \overline{I}'_2 \quad (18)$$

Nyní lze dosadit rovnice (17) a (18) do rovnice (15), a po úpravě dostat rovnici:

$$\overline{U}_1 = \overline{U}'_2 + \overline{I}_1 \cdot (R_1 + jX_1) - \overline{I}'_2 \cdot (R'_2 - jX'_2) \quad (19)$$

Dále rovnici (16) dosadíme do rovnice (19) a vyjde vztah:

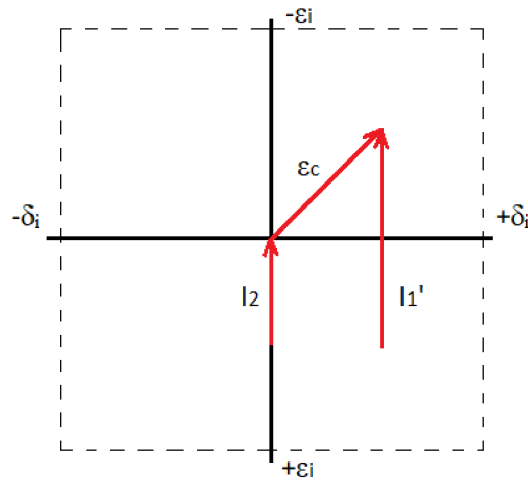
$$\overline{U}_1 = \overline{U}'_2 + \overline{I}_{10} \cdot (R_1 + jX_1) - \overline{I}'_2 \cdot (R_1 + jX_1 + R'_2 - jX'_2) \quad (20)$$



Obr. 3-9 Fázorový diagram

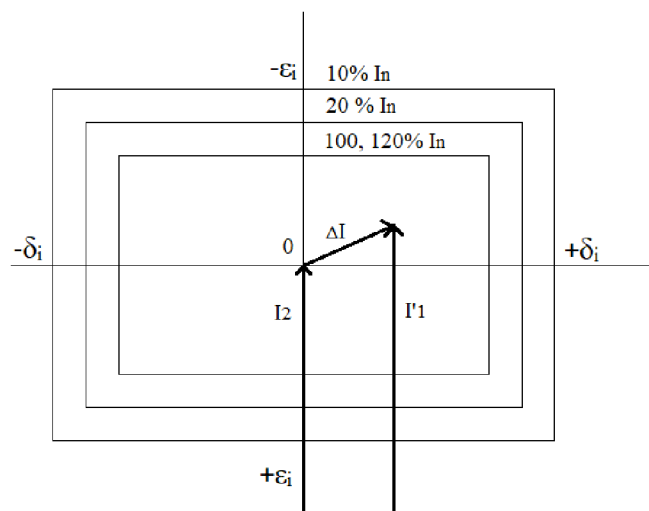
3.5 Chyby transformátoru proudu

Počátek souřadnicového systému se uvažuje v koncovém bodu fázoru I_2 . Rozdíl mezi fázory I_2 a I_1' označuje celkovou fázorovou chybu transformátoru proudu ϵ_c . Tuto chybu lze rozložit na chybu proudu ϵ_i a chybu úhlu δ_i .



Obr. 3-10 Diagram chyb – podstata

Diagram na Obrázku 3-10 vyjadřuje chybu proudu, chybu úhlu i celkovou chybu a je v podstatě základ komplexního diagramu chyb transformátoru proudu. Pro dodržení dané třídy přesnosti se musí koncový bod vždy nacházet uvnitř příslušného pole chyb vztahenému k tomu, při jakém proudu bylo měření prováděno. Pro znázornění celého diagramu by se muselo vytvořit prostorové znázornění, proto při kreslení komplexního diagramu jako plošného se musí uvést proud, pro který hranice chyb platí (viz Obrázek 3-11). [2]



Obr. 3-11 Komplexní diagram chyb

3.5.1 Závislost chyb na jednotlivých veličinách

3.5.1.1 Závislost na proudu

Transformátor proudu musí splňovat požadavky na třídu přesnosti v poměrně širokém rozsahu. Při uvažování konstantního břemene na sekundárních svorkách se bude měnit indukované napětí U_{20} a magnetická indukce se změnou proudu. Tomu pak vždy odpovídá určitá velikost proudu I_{20} . Potom z $B = f(H)$ charakteristiky lze odvodit budící charakteristiku $I_{20} = f(U_{20})$, která v podstatě udává závislost celkové chyby na indukovaném napětí (viz Obrázek 3-6) [2]

3.5.1.2 Závislost na břemeni

Tuto závislost lze odvodit podobně jako závislost na primárním proudu. Jedná se o změnu indukovaného napětí při konstantním proudu. Obecně lze říci, že celková chyba s břemenem roste nelineárně (viz Obrázek 3-6). [2]

3.5.1.3 Závislost na sekundárním účinníku

Za předpokladu konstantního břemene a konstantního proudu I_{20} se koncový bod fázoru I_{20} (celkové chyby) bude pohybovat po kružnici o poloměru I_{20} se středem v počátku. V závislosti na úhlu β se mění i velikost chyby proudu ϵ_i a chyby úhlu δ_i . [2]

3.5.1.4 Závislost na frekvenci

Magnetická indukce se mění nepřímo úměrně na změně frekvence. S klesáním magnetické indukce klesá taky hodnota celkové chyby. [2]

3.6 Postup při návrhu transformátoru proudu

Při návrhu transformátoru proudu se obvykle vychází z následujících parametrů.

- Jmenovité napětí rozvodné soustavy
- Jmenovitý primární proud I_{1N}
- Jmenovitý sekundární proud I_{2N}
- Třída přesnosti T_p
- Nadproudové číslo FS
- Jmenovitá zátěž P
- Jmenovitý krátkodobý tepelný proud I_{th}

3.6.1 Návrh primárního vodiče

Průřez primárního vodiče S_1' potřebný k tomu, aby odolal krátkodobému tepelnému proudu se určí:

$$S_1' = \frac{I_{th}}{\sigma_{th}} \quad (21)$$

kde I_{th} je krátkodobý tepelný proud

σ_{th} je proudová hustota vodičů primárního vinutí při jmenovitém krátkodobém tepelném proudu I_{th}

Když je požadovaný přístrojový transformátor s nízkým zkratovým proudem může v praxi nastat situace, kdy průřez primárního vodiče může vyjít nižší, než je požadovaný průřez pro I_n .

3.6.2 Návrh magnetického obvodu

Pro jmenovitý převod transformátoru platí:

$$k_i = \frac{I_{1N}}{I_{2N}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (22)$$

Hodnota jmenovité magnetické indukce:

$$B_n = \frac{B_m}{0,9 \cdot n} \quad (23)$$

kde B_m je hodnota maximální magnetické indukce materiálu

n je nadproudové číslo

Předběžný průřez magnetického jádra S' :

$$S' = \frac{1,3 \cdot P}{4,44 \cdot f \cdot B_n \cdot N_2 \cdot \xi \cdot I_{2N}} \quad (24)$$

kde P je zátěž transformátoru proudu

f je frekvence

B_n je jmenovitá magnetická indukce

N_2 je počet sekundárních závitů

ξ je činitel plnění magnetického obvodu

$1,3$ vyjadřuje předběžné ztráty v sekundárním vinutí

Z vypočteného předběžného průřezu jádra lze určit předběžnou výšku a šířku magnetického jádra.

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

$$D_{2i}' = D_{1i} + 2 \cdot t_i \quad (25)$$

kde 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:

$$n_2 = \frac{N_2}{\pi \cdot D_{2i}' \cdot \xi_1} \cdot d_{2i} \quad (26)$$

kde ξ_1 je 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:

$$t_2 = n_2 \cdot d_{2i} \cdot \xi_2 \quad (27)$$

kde ξ_2 je činitel nárůstu výšky vinutí

Předběžný vnitřní průměr pouzdra magnetického obvodu D_{3i}' :

$$D_{3i}' = D_{2i}' + 2 \cdot t_2 \quad (28)$$

Předběžný vnitřní průměr magnetického jádra D_i' :

$$D_i' = D_{3i}' + 2 \cdot s \quad (29)$$

kde s je vzdálenost stěny magnetického jádra od stěny pouzdra

Hodnota D_i' se zaokrouhlí nahoru a dostaneme konečný rozměr vnitřního průměru jádra D_i .

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

$$D_{3i} = D_i - 2 \cdot s \quad (30)$$

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

$$D_{2i} = D_{3i} - 2 \cdot t_2 \quad (31)$$

Obecné podmínky pro volbu rozměrů jádra jsou:

Výška jádra h se volí jako násobek čísla 5

Šířka jádra b se volí jako sudé číslo, přičemž platí předpoklad $h > b$

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

$$S' = h \cdot b \quad (32)$$

Po zaokrouhlení musí platit:

$$S = h \cdot b \geq S' \quad (33)$$

Vnější průměr jádra D_e se potom určí jako:

$$D_e = D_i + 2 \cdot b \quad (34)$$

Střední průměr jádra D bude potom:

$$D = D_i + b \quad (35)$$

Výška zapouzdřeného jádra H :

$$H = h + 2 \cdot s \quad (36)$$

kde s je vzdálenost stěny magnetického jádra od stěny pouzdra (na výšku)

Šířka zapouzdřeného jádra B :

$$B = b + 2 \cdot r \quad (37)$$

kde r je vzdálenost stěny magnetického jádra od stěny pouzdra (na šířku)

Konečné rozměry magnetického jádra jsou potom:

VNĚJŠÍ PRŮMĚR x VNITŘNÍ PRŮMĚR x VÝŠKA (D_e x D_i x h)

3.6.3 Kontrola nadproudového čísla a výpočet chyb transformátoru proudu

Střední délka závitu sekundárního vinutí l_2 :

$$l_2 = 2 \cdot (B + H) + \pi \cdot t_2 \quad (38)$$

Odpor sekundárního vinutí R_2 , což je vlastně vnitřní břemeno transformátoru:

$$R_2 = \frac{N_2 \cdot l_2 \cdot \rho}{S_2} \quad (39)$$

kde ρ je 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 jmenovitém proudu P_i :

$$P_i = R_2 \cdot I_{2N}^2 \quad (40)$$

kde I_{2N} je jmenovitý sekundární proud

Jmenovité břemeno Z_n ($\cos \varphi = 0,8$):

$$Z_N = \frac{P_n}{I_{2N}^2} \quad (41)$$

kde P_n je jmenovitá zátěž transformátoru

Činná složka jmenovitého břemene R :

$$R = Z_N \cdot \cos \varphi \quad (42)$$

Jalová složka jmenovitého břemene X :

$$X = Z_n \cdot \sin \varphi \quad (43)$$

Přičemž musí platit:

$$Z_N = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (44)$$

Činná složka jmenovité zátěže P_ζ :

$$P_\zeta = P_N \cdot \cos \varphi \quad (45)$$

Jalová složka jmenovité zátěže P_j :

$$P_j = P_N \cdot \sin \varphi \quad (46)$$

Celková zátěž transformátoru při jmenovitém proudu P_c :

$$P_c = \sqrt{(P_{\xi} + P_i)^2 + P_j^2} \quad (47)$$

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

$$B_n = \frac{P_c}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot I_2} \quad (48)$$

Pro kontrolu nadproudového čísla FS platí:

$$FS = \frac{B_m}{0,9 \cdot B_n} \quad (49)$$

Po kontrole nadproudového čísla musí být splněny podmínky podle zadání nebo normy ČSN EN 61869-1. Při nevyhovění podmínek musí být upraven průřez magnetického jádra, popřípadě průřez sekundárního vodiče.

Nyní se provede kontrola chyb transformátoru. Podle normy ČSN EN 61869 se vypočítají chyby pro 25% a 100% jmenovitého břemene a 5, 20, 100, 120% jmenovitého proudu u tříd přesnosti 1,0; 0,5; 0,2; 0,1, a u tříd 0,5S a 0,2S je kontrolována chyba proudu i chyba úhlu při 1% I_n . Tyto chyby musí ležet v dovoleném rozmezí chyb.

Skutečná hodnota magnetické indukce B_n pro 1% jmenovitého proudu a 100% jmenovitého břemene se určí podle:

$$B_n^{0,01} = \frac{\sqrt{[(R+R_2) \cdot (0,01 \cdot I_{2N})^2]^2 + [X \cdot (0,01 \cdot I_{2N})^2]^2}}{222 \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot 0,01 \cdot I_{2N}} \quad (50)$$

Nyní se pro toto B_n určí celková intenzita magnetického pole H_0 z magnetizační charakteristiky.

Dále se vypočte činná složka intenzity magnetického pole H_g podle:

$$H_g = \frac{p_{Fe} \cdot \gamma_{Fe}}{4,44 \cdot f \cdot B_n} \quad (51)$$

kde p_{Fe} jsou měrné ztráty při magnetické indukci B_n
 γ_{Fe} je měrná hmotnost feromagnetického materiálu

Nyní lze vypočítat celkovou chybu transformátoru proudu přepočtenou na sekundární počet závitů I_{20} :

$$I_{20} = H_0 \cdot l_m \cdot \frac{1}{N_2} \quad (52)$$

kde l_m je střední délka magnetického jádra

Střední délka magnetického jádra l_m :

$$l_m = \pi \cdot D \quad (53)$$

Úhel β_c se vypočte podle:

$$\beta_c = \operatorname{arctg} \frac{X}{R+R_2} \quad (54)$$

Úhel γ se vypočte podle:

$$\gamma = \operatorname{arcsin} \frac{H_g}{H_0} \quad (55)$$

Pro další úhel α platí:

$$\alpha = 90 - (\beta_c + \gamma) \quad (56)$$

Nyní lze určit chybu proudu ε_i :

$$\varepsilon_i = -\frac{I_{20}}{0,01 \cdot I_{2N}} \cdot \cos \alpha \cdot 100 \quad (57)$$

Chybu úhlu δ_i :

$$\delta_i = 3440 \cdot \frac{I_{20}}{0,01 \cdot I_{2N}} \cdot \sin \alpha \quad (58)$$

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

4 NÁVRH PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU PROUDU

Pro vytvoření finálního transformátoru či transformátorů je nutné znát nejen požadavky trhu (zákazníků), ale i spousty dalších požadavků, které na transformátor kladou normy a předpisy. Dalším aspektem pro sériově vyráběné transformátory je finální cena transformátorů.

4.1 Požadavky na transformátor

4.1.1 Elektrické požadavky

Při návrhu přístrojového transformátoru proudu se obecně vychází z těchto základních technických parametrů.

- Jmenovité napětí rozvodné soustavy $0,72 \text{ kV}$
- Jmenovitý primární proud $I_{1N} = 2500 \text{ A}$
- Jmenovitý sekundární proud $I_{2N} = 1 \text{ A}$
- Třída přesnosti $T_p 0,5S$
- Nadproudové číslo $FS10$
- Jmenovitá zátěž $P = 15 \text{ VA}$
- Jmenovitý krátkodobý tepelný proud $I_{th} = 150 \text{ kA}$

4.1.2 Rozměrové požadavky

Pro návrh transformátoru byly předepsány požadované rozměry.

- Rozměry pro primární vodič
 - pas Cu 120 mm x 10 mm, orientace svislá, vodorovná
 - 3x pas Cu 100 mm x 10 mm, orientace svislá, vodorovná
 - 3x pas Cu 80 mm x 10 mm, orientace svislá, vodorovná
 - Kruhový otvor o minimálním průměru 95 mm
- Maximální výška transformátoru 210 mm
- Maximální šířka transformátoru 190 mm
- Sekundární svorky se šrouby M5

4.2 Návrh tvaru transformátoru

Návrh tvaru transformátoru se odvíjí nejen od požadavků zákazníků a norem, ale také by měl finální tvar transformátoru vycházet z výrobní řady. A to jak z důvodů marketingových, tak i technických. Například použití různých komponent z jiných typů.

4.2.1 Postup návrhu tvaru transformátoru

Z důvodu zadání nn transformátoru, který má být uložen v platovém pouzdře, bude práce směřovat k tomuto provedení. Ostatními možnými provedeními jako je zalití funkčních částí epoxidovou pryskyřicí či keramickými hmotami, nebo ponořením do oleje se práce nebude zabývat. Postup vývoje či návrhu transformátoru je možné dělit do různých etap. Tyto je možné během procesu návrhu nutno měnit nebo kombinovat a někdy také i opakovat. Návrh tvaru je ovlivněn:

1. Volbou materiálu či materiálů pouzdra a příslušenství

Tato část spolu s návrhem funkčních částí patří k nejpodstatnější části návrhu transformátoru. Touto částí ovlivníme všechny následující etapy vývoje. Dnešní doba nám poskytuje velkou škálu materiálů, které lze použít pro výrobu. Volba materiálu nám ovlivňuje nejen mechanické vlastnosti ale i elektrické.

2. Výsledným vzhledem transformátoru

Vzhled transformátoru se odvíjí nejen od funkčních částí, ale také od různých konstrukčních detailů. Například:

- Umístění svorek transformátoru
- Zakrytování svorek
- Barva transformátoru a příslušenství
- Umístění plomb na výrobek
-

3. Uložením navinutého jádra či jader

Funkční části transformátorů lze do pouzdra volně vložit, fixovat nebo zalít izolační hmotou.

4. Volbou technologie výroby pouzdra transformátorů

Nejčastějším způsobem je výroba ve vstřikolisech. Tento způsob je také nejrentabilnějším při výrobě velkých sérií výrobků. Při výrobě malých sérií či jednotlivých kusů je možné využít technologii 3D tisku.

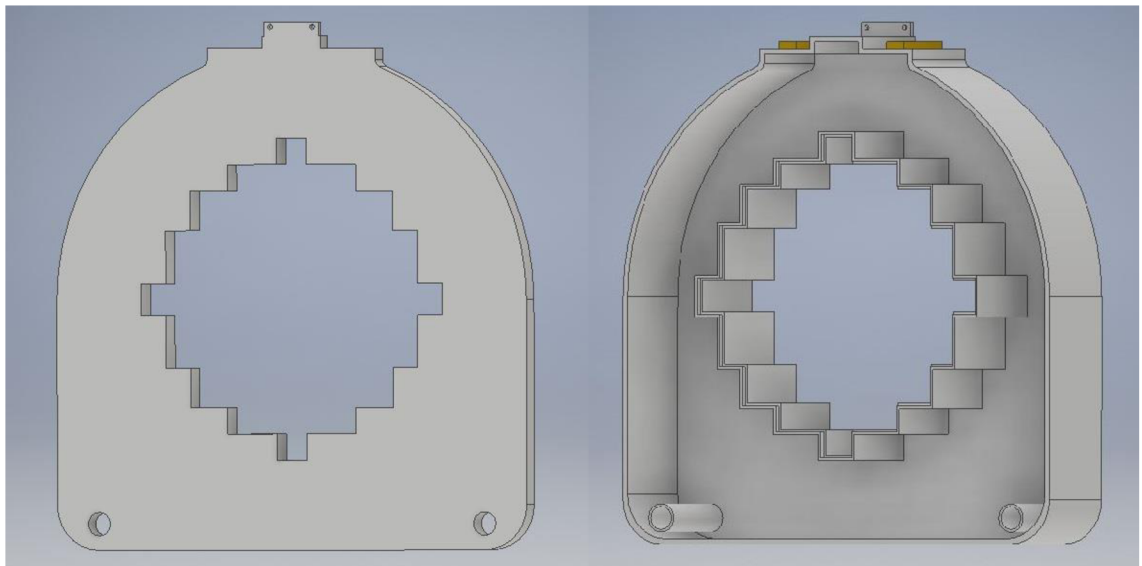
5. Volbou způsobu spojení pouzdra

Pouzdra proudových transformátorů pro nn napětí s plastovým pouzdrům je pouzdro tvořeno minimálně dvěma částmi a tyto části je nutné spojit. Spoj může být proveden:

- Nýtováním
- Svařením
- Lepením
- Jiným způsobem

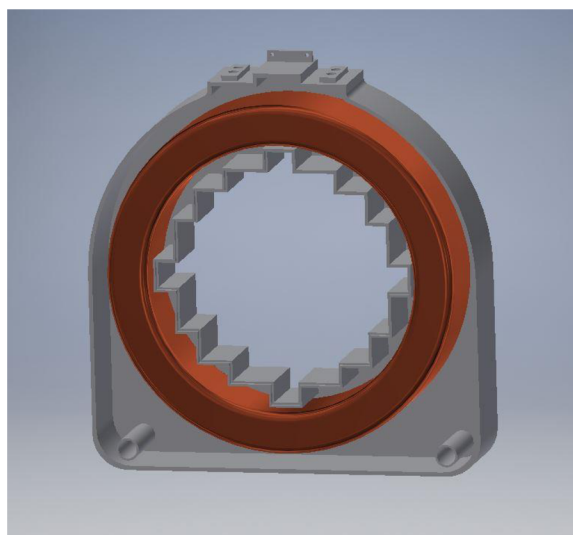
4.2.2 Reálný návrh tvaru transformátoru proudu

Z důvodu výroby ukázkového a funkčního vzorku transformátoru bude návrh pouzdra koncipován pro 3D tisk. Pouzdro je tvořené dvěma částmi, které se budou do sebe zasouvat. Tento postup byl zvolen z důvodu, aby bylo možné transformátor před zákazníkem demontovat a následně složit.

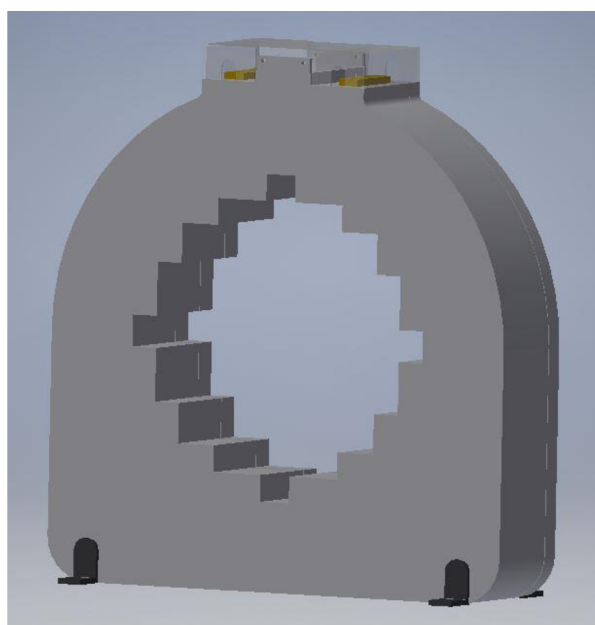


Obr. 4-1 Části krytu transformátoru

Dle rozměrů, které byly zadány zákazníkem (viz kapitola 4.1), byl transformátor navrhnout a dle 3D modelu byl v programu Autodesk Inventor odměřen prostor, který zbývá pro navinuté jádro. Návrhem magnetického obvodu (viz kapitola níže) bylo prokázáno, že transformátor je možné vyrobit v požadovaných rozměrech. V dalším kroku byl proveden export modelu do formátu .stl. Takto upravený model již byl vytisknut na 3D tiskárně.



Obr. 4-2 Model uložení jádra v krytu transformátoru



Obr. 4-3 Kompletní model transformátoru

4.3 Návrh primárního vodiče

Průřez primárního vodiče S_1' potřebný k tomu, aby odolal krátkodobému tepelnému proudu se určí podle vztahu (21):

$$S_1' = \frac{I_{th}}{\sigma_{th}} = \frac{150 \cdot 10^3}{180} = 833,33 \text{ mm}^2$$

4.4 Návrh magnetického obvodu

Pro jmenovitý převod transformátoru platí podle vztahu (22):

$$k_i = \frac{I_{1N}}{I_{2N}} = \frac{2500}{1} = 2500$$

Pro transformátor bylo zvoleno železné jádro, které má $B_m = 2,22 \text{ T}$

Hodnota jmenovité magnetické indukce se určí podle vztahu (23):

$$B_n = \frac{B_m}{0,9 \cdot n} = \frac{2,22}{0,9 \cdot 10} = 0,2467 \text{ T}$$

Předběžný průřez magnetického jádra S' se určí podle vztahu (24):

$$S' = \frac{1,3 \cdot P}{4,44 \cdot f \cdot B_n \cdot N_2 \cdot \xi \cdot I_{2N}} = \frac{1,3 \cdot 15}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,2467 \cdot 2500 \cdot 0,79 \cdot 1} = 1,8 \text{ cm}^2$$

Z vypočteného předběžného průřezu jádra lze určit předběžnou výšku a šířku magnetického jádra.

Ploušťka izolačního předělu byla zvolena $t_i = 13,5 \text{ mm}$

Nejmenší možný vnitřní průměr magnetického obvodu s navinutým sekundárním vinutím D_{2i}' (25):

$$D_{2i}' = D_{1i} + 2 \cdot t_i = 95 + 2 \cdot 13,5 = 122 \text{ mm}$$

Jako sekundární vodič byl zvolen měděný drát o průměru $d_{2i} = 0,8$

Počet vrstev sekundárního vinutí n_2 bude podle vztahu (26):

$$n_2 = \frac{N_2}{\pi \cdot D_{2i}' \cdot \xi_1} \cdot d_{2i} = \frac{2500}{\pi \cdot 122 \cdot 0,9} \cdot 0,8 = 5,8 \approx 6$$

Počet vrstev vinutí n_2 se zaokrouhlí na nejbližší vyšší celé číslo a potom výška sekundárního vinutí t_2 bude dána podle vztahu (27):

$$t_2 = n_2 \cdot d_{2i} \cdot \xi_2 = 6 \cdot 0,8 \cdot 1,15 = 5,52 \text{ mm}$$

Předběžný vnitřní průměr pouzdra magnetického obvodu D_{3i}' se určí podle vztahu (28):

$$D_{3i}' = D_{2i}' + 2 \cdot t_2 = 122 + 2 \cdot 5,52 = 133,04 \text{ mm}$$

Předběžný vnitřní průměr magnetického jádra D_i' bude podle vztahu (29):

$$D_i' = D_{3i}' + 2 \cdot s = 133,04 + 2 \cdot 4,5 = 142,04 \text{ mm}$$

Hodnota D_i' se zaokrouhlí a dostaneme konečný rozměr $D_i = 142 \text{ mm}$

Ze znalosti vnitřního průměru magnetického jádra D_i lze určit vnitřní průměr pouzdra D_{3i} podle vztahu (30):

$$D_{3i} = D_i - 2 \cdot s = 142 - 2 \cdot 4 = 139 \text{ mm}$$

Vnitřní průměr magnetického obvodu s vinutím D_{2i} potom bude podle vztahu (31):

$$D_{2i} = D_{3i} - 2 \cdot t_2 = 139 - 2 \cdot 5,52 = 130 \text{ mm}$$

Podle podmínek pro volbu výšky a šířky byly zvoleny rozměry:

Výška jádra $h = 20 \text{ mm}$

Šířka jádra $b = 9 \text{ mm}$

Pro určení těchto hodnot musí platit vztah (33):

$$S = h \cdot b \geq S' \Rightarrow 180 \text{ mm}^2 = 20 \cdot 9 \geq 180 \text{ mm}^2$$

Vnější průměr jádra D_e se potom určí podle vztahu (34):

$$D_e = D_i + 2 \cdot b = 142 + 2 \cdot 9 = 160 \text{ mm}$$

Střední průměr jádra D bude potom podle vztahu (35):

$$D = D_i + b = 142 + 9 = 151 \text{ mm}$$

Výška zapouzdřeného jádra H podle vztahu (36):

$$H = h + 2 \cdot s = 20 + 2 \cdot 4,5 = 29 \text{ mm}$$

Šířka zapouzdřeného jádra B podle vztahu (37):

$$B = b + 2 \cdot r = 9 + 2 \cdot 7,5 = 26 \text{ mm}$$

Konečné rozměry magnetického jádra jsou potom:

160 x 142 x 20

4.5 Kontrola nadproudového čísla a výpočet chyb transformátoru proudu

Střední délka závitů sekundárního vinutí l_2 se určí podle vztahu (38):

$$l_2 = 2 \cdot (B + H) + \pi \cdot t_2 = 2 \cdot (25 + 29) + \pi \cdot 5,52 = 127 \text{ mm}$$

Odpor sekundárního vinutí R_2 , což je vlastně vnitřní břemeno transformátoru podle vztahu (39):

$$R_2 = \frac{N_2 \cdot l_2 \cdot \rho}{S_2} = \frac{2500 \cdot 0,127 \cdot 1,78 \cdot 10^{-8}}{5,026 \cdot 10^{-7}} = 11,274 \Omega$$

Průřez sekundárního vodiče S_2 se vypočte podle známého vzorce:

$$S_2 = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,4^2 = 0,5026 \text{ mm}^2$$

Vnitřní zátěž při jmenovitém proudu P_i se určí podle vztahu (40):

$$P_i = R_2 \cdot I_{2N}^2 = 11,274 \cdot 1^2 = 11,274 \text{ VA}$$

Jmenovité břemeno Z_N se určí podle vztahu (41):

$$Z_N = \frac{P_n}{I_{2N}^2} = \frac{15}{1^2} = 15 \Omega$$

Činná složka jmenovitého břemene R se určí podle vztahu (42):

$$R = Z_N \cdot \cos\varphi = 15 \cdot 0,8 = 12 \Omega$$

Jalová složka jmenovitého břemene X se určí podle vztahu (43):

$$X = Z_n \cdot \sin\varphi = 15 \cdot 0,6 = 9 \Omega$$

Příčemž musí platit podle vztahu (44):

$$Z_N = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{12^2 + 9^2} = 15 \Omega$$

Činná složka jmenovité zátěže P_ξ se určí podle vztahu (45):

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

Jalová složka jmenovité zátěže P_j se určí podle vztahu (46):

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

Celková zátěž transformátoru při jmenovitém proudu P_c se určí podle vztahu (47):

$$P_c = \sqrt{(P_\xi + P_i)^2 + P_j^2} = \sqrt{(12 + 11,274)^2 + 9^2} = 24,953 \text{ VA}$$

Hodnota jmenovité magnetické indukce při jmenovité zátěži a jmenovitém proudu B_n se určí podle vztahu (48):

$$B_n = \frac{P_c}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot l_2} = \frac{24,953}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,18 \cdot 10^{-3} \cdot 0,79 \cdot 2500 \cdot 1} = 0,316 \text{ T}$$

Pro kontrolu nadproudového čísla FS platí podle vztahu (49):

$$FS = \frac{B_m}{0,9 \cdot B_n} = \frac{2,3}{0,9 \cdot 0,316} = 7,802$$

Nadproudové číslo vyšlo v pořádku.

Skutečná hodnota magnetické indukce B_n pro 1% jmenovitého proudu a 100% jmenovitého břemene se určí podle vztahu (50):

$$B_n^{0,01} = \frac{\sqrt{[(R+R_2) \cdot (0,01 \cdot I_{2N})]^2 + [X \cdot (0,01 \cdot I_{2N})]^2}}{222 \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot 0,01 \cdot I_{2N}} = \frac{\sqrt{[(12+11,274) \cdot (0,01 \cdot 1)]^2 + [9 \cdot (0,01 \cdot 1)]^2}}{222 \cdot 0,18 \cdot 10^{-3} \cdot 0,79 \cdot 2500 \cdot 0,01 \cdot 1} =$$

0,003 T

Celková intenzita magnetického pole $H_0 = 0,466 \text{ A/m}$

Měrné ztráty $p_{Fe} = 3,12 \cdot 10^{-5} \text{ W/kg}$

Měrná hmotnost materiálu jádra $\gamma_{Fe} = 9717 \text{ kg/m}^3$

Dále se vypočte činná složka intenzity magnetického pole H_g podle vztahu (51):

$$H_g = \frac{p_{Fe} \cdot \gamma_{Fe}}{4,44 \cdot f \cdot B_n} = \frac{3,12 \cdot 10^{-5} \cdot 9717}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,003} = 0,432 \text{ A/m}$$

Nyní lze vypočítat celkovou chybu transformátoru proudu přepočtenou na sekundární počet závitů I_{20} podle vztahu (52):

$$I_{20} = H_0 \cdot l_m \cdot \frac{1}{N_2} = 0,466 \cdot 0,474 \cdot \frac{1}{2500} = 8,835 \cdot 10^{-5} \text{ A}$$

Střední délka magnetického jádra l_m se určí podle vztahu (53):

$$l_m = \pi \cdot D = \pi \cdot 151 = 474 \text{ mm}$$

Úhel β_c se vypočte podle vztahu (54):

$$\beta_c = \arctg \frac{X}{R+R_2} = \arctg \frac{9}{12+11,274} = 21,142^\circ$$

Úhel γ se vypočte podle vztahu (55):

$$\gamma = \arcsin \frac{H_g}{H_0} = \arcsin \frac{0,432}{0,466} = 67,996^\circ$$

Pro další úhel α platí podle vztahu (56):

$$\alpha = 90 - (\beta_c + \gamma) = 90 - (21,142 + 67,996) = 0,862^\circ$$

Nyní lze určit chybu proudu ε_i :

$$\varepsilon_i = -\frac{I_{20}}{0,01 \cdot I_{2N}} \cdot \cos\alpha \cdot 100 = -\frac{8,835 \cdot 10^{-5}}{0,01 \cdot 1} \cdot \cos(0,862) \cdot 100 = -0,575 \%$$

Chybu úhlu δ_i :

$$\delta_i = 3440 \cdot \frac{I_{20}}{0,01 \cdot I_{2N}} \cdot \sin\alpha = 3440 \cdot \frac{8,835 \cdot 10^{-5}}{0,01 \cdot 1} \cdot \sin(0,862) = 23,07'$$

Hodnoty chyb proudu a chyb úhlu pro ostatní hodnoty dané normou jsou uvedeny níže v Tabulce 6-3.

5 TEPELNÁ SIMULACE

5.1 Výpočet oteplení

Oteplení vinutí u transformátorů proudu je dáno pouze proudem. Nezávisí tedy na velikosti jmenovité zátěže nebo břemene. Oteplení primárního vinutí je třeba kontrolovat pouze u transformátorů, kde je primární vinutí obaleno vrstvou izolantu. V něm může dojít k velkému teplotnímu spádu od povrchu vinutí k povrchu izolantu. Toto může nastat například u transformátorů izolovaných epoxidovou pryskyřicí.

Oteplení magnetického obvodu transformátoru proudu je závislé na břemeni i proudu. Při daném proudu roste se zvyšováním břemene i indukce a tím také ztráty v magnetickém obvodě. Ty dosahují nejvyšších hodnot, pokud je sekundární obvod rozpojen.[1]

Pro ustálené oteplení platí rovnice:

$$\Delta\vartheta = \frac{\Delta P}{\alpha \cdot S} \tag{59}$$

Po dosazení:

$$\Delta\vartheta = \frac{\Delta P}{\alpha \cdot S} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha \cdot S} = \frac{11,274 \cdot 1^2}{13 \cdot 0,0565} = 15,34 \text{ K}$$

kde R je odpor sekundárního vinutí
 I je sekundární proud
 α je součinitel přestupu tepla
 S je povrch sekundárního vinutí

Průběh oteplení je potom dán rovnicí:

$$\vartheta = \Delta\vartheta_{max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (60)$$

kde $\Delta\vartheta_{max}$ je maximální ustálená teplota

t je čas

τ je časová konstanta

Časová konstanta se vypočte podle vztahu:

$$\tau = \frac{c \cdot m}{\alpha \cdot S} \quad (61)$$

Po dosazení:

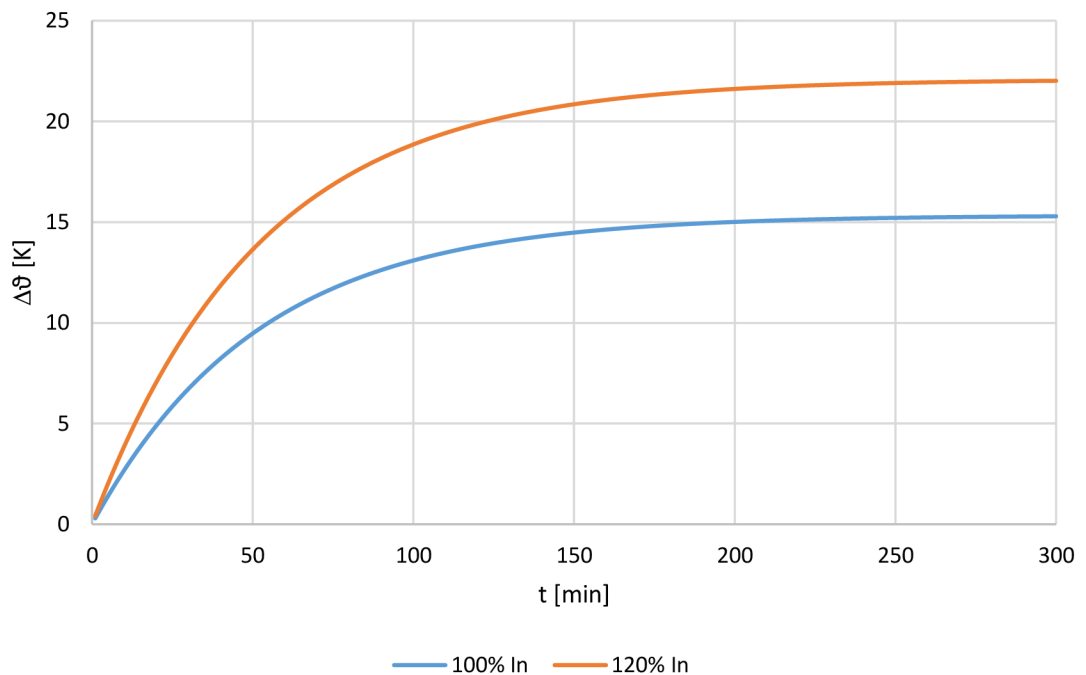
$$\tau = \frac{c \cdot m}{\alpha \cdot S} = \frac{400 \cdot 5,74}{13 \cdot 0,0565} = 3120,6 \text{ s}$$

kde c je měrné teplo

m je hmotnost vinutí

α je součinitel přestupu tepla

S je povrch sekundárního vinutí



Graf 5-1 Vypočtené oteplení samotného sekundárního vinutí transformátoru při 100% In a 120% In

5.2 Tepelná simulace v programu FEMM

5.2.1 Výpočet ustáleného oteplení

Navržený transformátor byl opětovně namodelován v programu AutoCAD podle vypočtených a zadaných parametrů. Z důvodu provedení zjednodušení výsledného modelu pro simulaci. Z AutoCAD byl importován do programu FEMM, ve kterém byla provedena tepelná simulace.

Pro tvorbu simulace byly použity materiály jak z knihovny Femmu (vzduch) tak byly nadefinovány nové materiály, tak aby co nejvíce korespondovaly s použitým materiálem.

Hodnoty jednotlivých ztrát byly získány z teoretického výpočtu a přepočteny do jednotek, které si žádal program ($W \rightarrow Wm^{-3}$). Jednotlivé ztráty nebyly přímo měřeny na vyrobeném prototypu.

Některé parametry jsou tabulkově definovány v intervalech nebo jsou definovány pro čistý materiál. Z těchto důvodů muselo být použito koeficientů vycházejících ze zkušeností z předchozích simulací a oteplovacích zkoušek jiných transformátorů.

Při předepsaném převodovém poměru může docházet k nepatrnému rozdílu u jednotlivých transformátorů se stejnými parametry díky nepřesnosti výroby. Mezi nepřesnost při výrobě lze zařadit:

1. Chyby magnetických obvodů

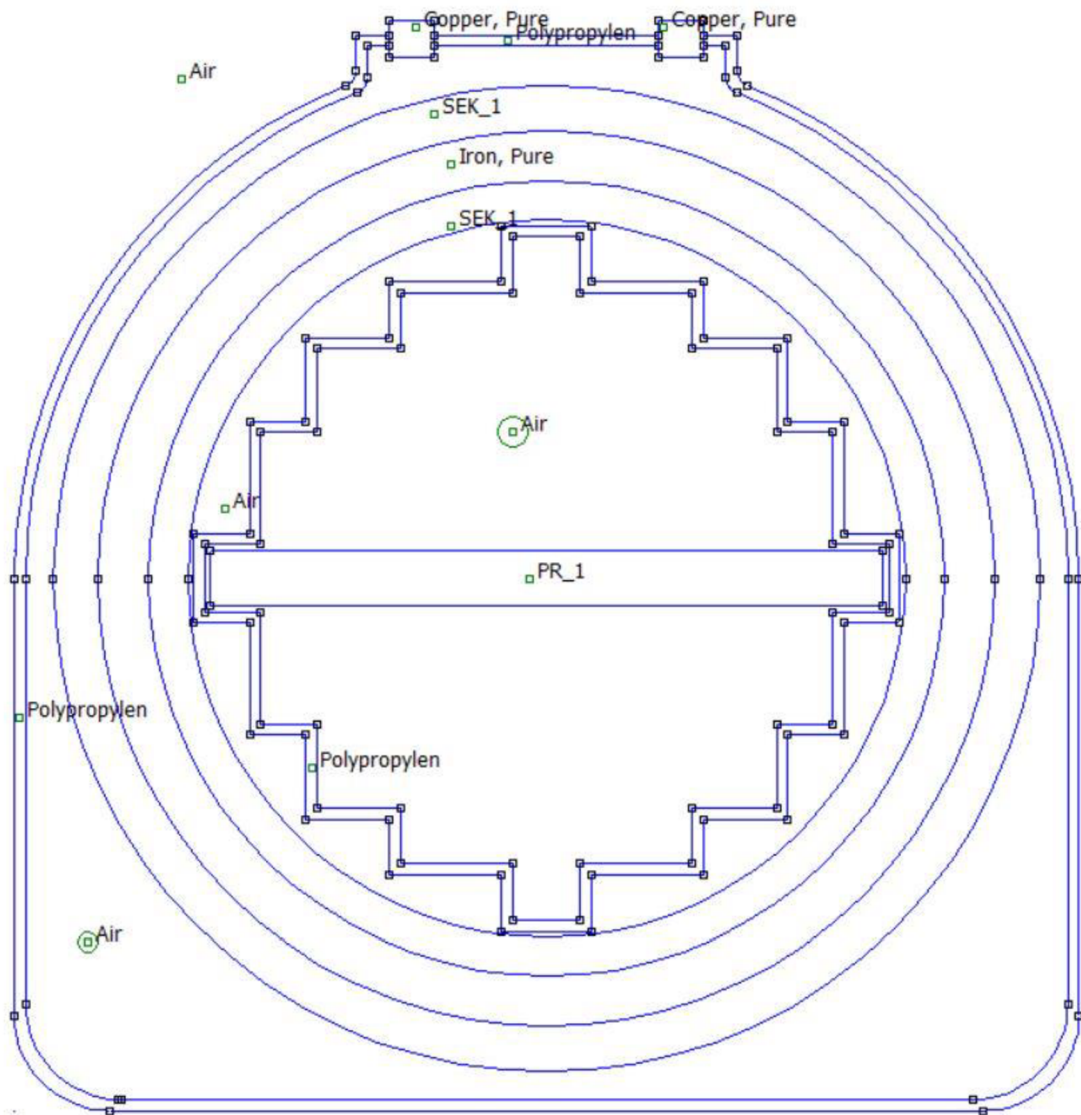
Chybou magnetického jádra či jader jsou myšleny odchylky od navrhnuté hodnoty. Odchylky jader se mohou vyskytnout na rozměrech tak i na magnetických vlastnostech jádra. Zmiňované odchylky (tolerance) musí být předem smlouveny s výrobcem, který je povinen smlouvenou toleranci dodržet.

2. Vliv technologie výroby

3. Navíjení

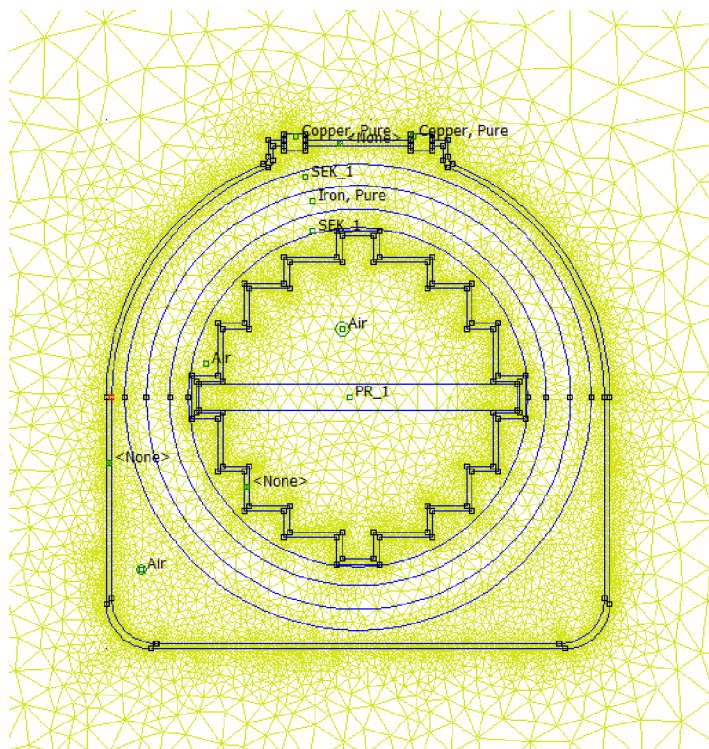
Při navíjení transformátoru s velkým počtem závitů dochází k nepatrným nepřesnostem vlivem obsluhy (skladba vodičů nemusí být vždy totožná tj. může být použito delšího vodiče či kratšího vůči výpočtu)

Tyto parametry budou mít zvláště vliv na výpočet sekundárního ztrátového výkonu, který byl do programu zadán (velikost ztrátového výkonu byla počítána pro čistou měď s činitelem plnění 1). Dále i pro primární vinutí byla zvolena leštěná měď, která má jinou emisivitu než použitá šina při reálné oteplovací zkoušce. Tedy i tento parametr má vliv na výsledek simulace, který se tak bude lehce lišit od provedené oteplovací zkoušky.

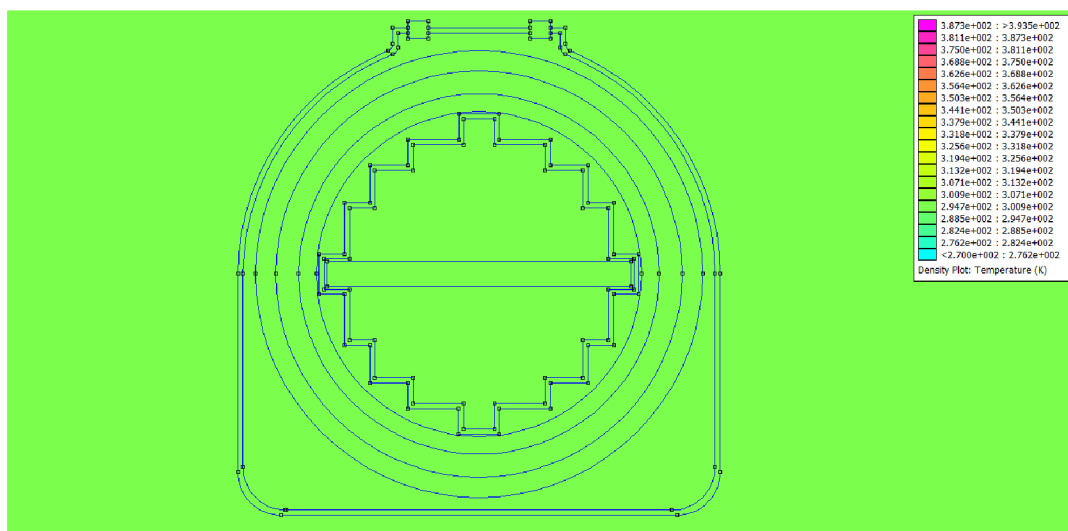


Obr. 5-1 Model transformátoru použitý pro výpočet tepelné simulace v programu Femm

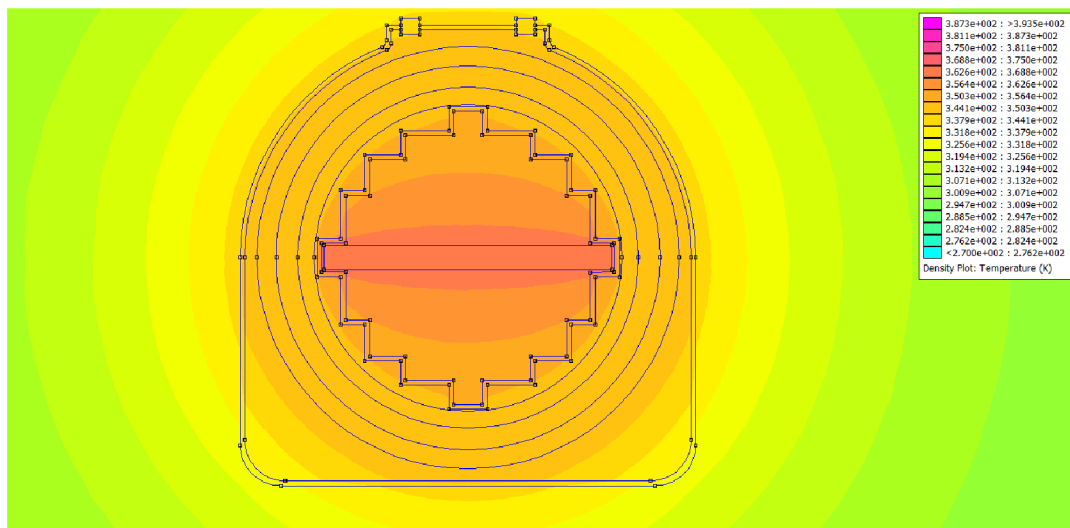
V následném kroku bylo provedeno vysíťování (mesh). Výsledná mesh obsahovala 26073 bodů.



Obr. 5-2 Vysíťování modelu v programu Femm



Obr. 5-3 Počáteční stav transformátoru při simulaci



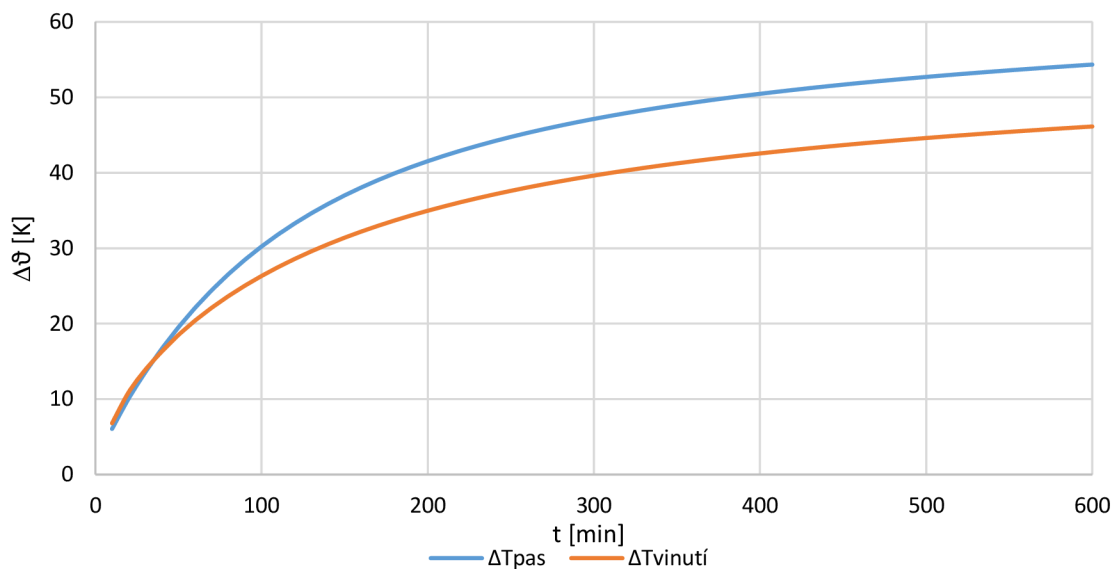
Obr. 5-4 Ustálený stav transformátoru při simulaci pro vodorovnou orientaci primárního vodiče a 100% I_n

Počáteční teplota byla zvolena 25 °C. Nejvyšší ustálená hodnota byla naměřena na primárním vinutí a byla změřena na 79,3 °C. Ustálená hodnota na sekundárním vinutí byla změřena na 71,1 °C. Tyto hodnoty se budou lišit od naměřených hodnot při oteplovací zkoušce provedené na zkušebně a to právě kvůli volbě některých parametrů, které jsou uvedeny výše v této kapitole.

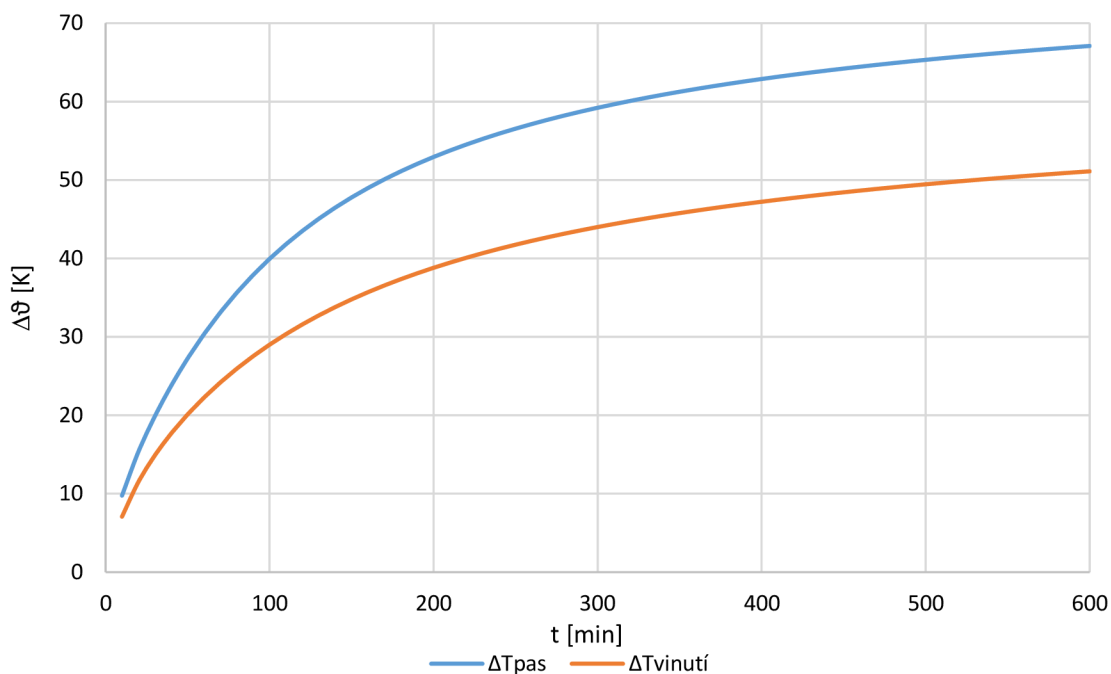
5.2.2 Výpočet přechodného tepelného jevu oteplování

Jelikož program při výpočtu vypočítá pouze ustálené konečné hodnoty, byla simulace celého průběhu oteplení provedena za pomoci lua scriptu. Za pomoci něho je možné v programu Femm simulovat přechodné jevy. Tento lua script obsahoval všechny parametry potřebné k tomuto výpočtu, jako celkový čas průběhu oteplování, vzorkovací frekvenci, místa, ve kterých bylo oteplení měřeno a další parametry potřebné k výpočtu. Pomocí tohoto lua scriptu byly jednotlivé hodnoty oteplení zaznamenány do textového dokumentu, ze kterého byly následně importovány do programu MS EXCEL, ve kterém byly vyneseny průběhy oteplení uvedené v Grafech 5-2 až 5-5.

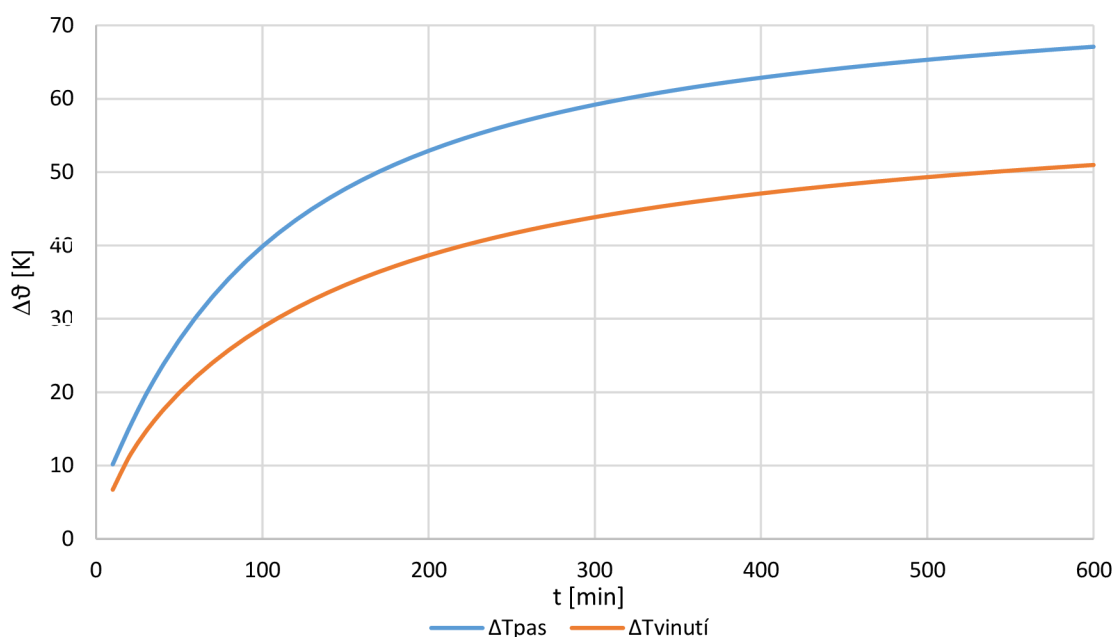
Ve Femmu bylo vypočteno oteplení pro konfiguraci primárních vodičů 120 x 10 mm vodorovně a svisle. Tyto dvě konfigurace byly zvoleny na základě požadavků zákazníka a následně byly změřeny i při reálné oteplovací zkoušce provedené na tomto transformátoru.



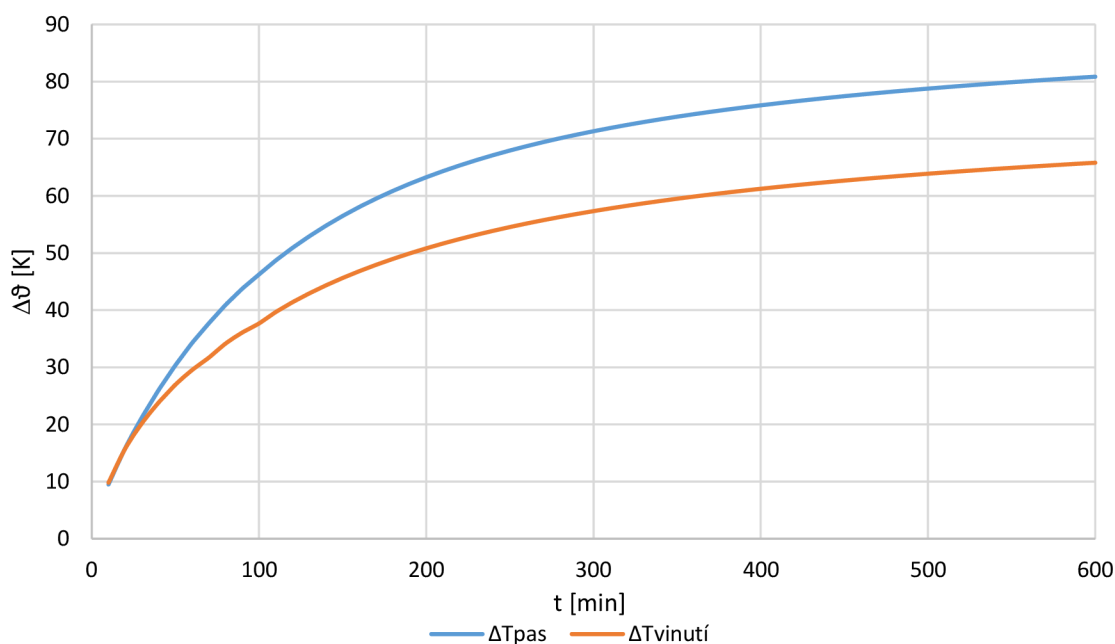
Graf 5-2 Průběh oteplení při 100% I_n a vodorovné orientaci primárního vodiče získané simulací



Graf 5-3 Průběh oteplení při 120% I_n a vodorovné orientaci primárního vodiče získané simulací



Graf 5-4 Průběh oteplení při 100% I_n a svislé orientaci primárního vodiče získané simulací



Graf 5-5 Průběh oteplení při 120% I_n a svislé orientaci primárního vodiče získané simulací

Norma udává maximální oteplení pro zvolenou třídu izolace realizovaného transformátoru je 75 K. Tato hodnota se vztahuje k oteplení sekundárního vinutí. Tedy z výše vynesných grafický závislostí pro jednotlivé konfigurace je patrné, že by navržený transformátor vyhověl na oteplovací zkoušku při jmenovitém proudu.

6 TYPOVÁ ZKOUŠKA

Norma ČSN EN 61869-1, podle které se při návrhu postupovalo, dělí zkoušky podle účelu na:

- Typová zkouška – provádí se na každém typu transformátoru. Tato zkouška má prokázat, že všechny transformátory, které byly vyrobeny na základě stejných podkladů vyhovují požadavkům, které nejsou obsaženy ve zkouškách výrobních kusových.
- Výrobní kusová zkouška – provádí se na každém jednotlivém zařízení. Tyto zkoušky slouží k odhalování vad, které vznikly při výrobě (vzniklé vady nezhoršují vlastnosti a spolehlivost zkoušeného zařízení).
- Zvláštní zkouška – zvláštní typy zkoušek dohodnuté mezi výrobcem a zákazníkem.
- Zkouška vzorku – zvolená zvláštní nebo typová zkouška provedená na jednom nebo více přístrojových transformátorech z určité výrobní série.[4]

6.1 Typová zkouška měřicího transformátoru proudu

Pokud není jinak určeno, musí se všechny dielektrické typové zkoušky provádět na jednom transformátoru. Všechny typové zkoušky se musí provádět maximálně na dvou vzorcích a musí se provádět při okolní teplotě mezi 10 °C a 30 °C.

Typová zkouška se skládá z několika dílčích zkoušek uvedených v následujících odstavcích. [4]

6.1.1 Zkouška krátkodobými proudy

Norma předepisuje u zkoušky krátkodobými proudy zkoušky:

1. Tepelným proudem I_{th}

Tato zkouška musí být provedena se zkratovaným sekundárním vinutím a s proudem I po dobu t takovým, že hodnota součinu $I^2 \cdot t$ nebude menší než I_{th}^2 a doba t bude mezi 0,5 s a 5 s.

2. Jmenovitým dynamickým proudem I_{dyn}

Dynamická zkouška musí být provedena se zkratovanými sekundárními vinutími a s vrcholovou hodnotou primárního proudu, která není menší než jmenovitý dynamický proud I_{dyn} alespoň v prvním vrcholu.

Tato dynamická zkouška může být kombinována s výše uvedenou tepelnou zkouškou provedenou tak, že první nejvyšší vrchol proudu při zkoušce nebude menší než jmenovitý dynamický proud (I_{dyn})

Transformátor vyhověl při této zkoušce, jestliže po ochlazení na okolní teplotu 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*
- *Vyhovuje dielektrickým zkouškám stanoveným touto normou*
- *Při prohlídce izolace vedle povrchu přívodů se neukazuje významné poškození[10]*

6.1.2 Oteplovací zkouška

Při této zkoušce musí být transformátor sestaven stejně jako v provozu.

Pokud je to proveditelné, musí být oteplení vinutí měřeno nárůstem jeho odporu, ale u vinutí s velmi nízkým odporem lze použít termočlánky.

Oteplení jiných částí než vinutí se může měřit teploměry nebo termočlánky.

Přístrojový transformátor se považuje za teplotně ustálený, když oteplení nepřesahuje 1K/hodinu.

Pro určení jakékoli hlavní součásti, u níž je třeba provést měření teploty, a pro další informace týkající se uspořádání zkoušky a zkušebních postupů, viz relevantní výrobní normy.[4]

**Tabulka 6-1 Meze oteplení pro různé části, materiály a dielektrika
přístrojových transformátorů [4]**

Část přístrojového transformátoru	Meze oteplení [K]
1. Olejové transformátory	
-olej v horní vrstvě	50
-olej v horní vrstvě, hermeticky těsný	55
-střed vinutí	60
-střed vinutí, hermeticky těsný	65
-jiné kovové části v kontaktu s olejem	jako pro vinutí
2. přístrojové transformátory s pevnou nebo plynovou izolací	
-vinutí (průměrná hodnota) v kontaktu s izolačními materiály dle následujících tříd ^a :	
Y	45
A	60
E	75
B	85
F	110
H	135
-jiné kovové části v kontaktu s výše uvedenými materiálovými třídami	jako pro vinutí
3. Spojení, šroubové nebo ekvivalentní	
-Holá měď, holá měděná slitina nebo holá hliníková slitina	
- ve vzduchu	50
- v SF ₆	75
- v oleji	60
-Postříbřený nebo poniklovaný	
- ve vzduchu	75
- v SF ₆	75
- v oleji	60
-Pocínovaný	
- ve vzduchu	65
- v SF ₆	65
- v oleji	60
^a Definice izolačních tříd podle IEC 60085	

6.1.3 Zkouška impulzním napětím na svorkách primárního vinutí

6.1.3.1 Všeobecně

Impulzní zkouška se musí provádět v souladu s IEC 60060-1 a při existenci příslušných konkrétních norem pro přístrojový transformátor a v souladu s těmito normami.

Rám, kryt (pokud existuje) a jádro (pokud je určeno k uzemnění) a všechny svorky sekundárního vinutí se musí uzemnit.

Impulzní zkoušky jsou obvykle tvořeny aplikací napětí při referenčních a jmenovitých hladinách zkušebního napětí. Referenční impulzní napětí musí ležet mezi 50% a 75% jmenovitého zkušebního impulzního napětí. Musí se zaznamenat vrcholová hodnota a tvar vlny impulzu.

Důkaz o poruše izolace při zkoušce je dán změnou tvaru vlny jak při referenčních, tak při jmenovitých zkušebních napětích.

Zlepšení detekce poruchy lze dosáhnout záznamem proudu (proudů) tekoucího (tekoucích) do země jako doplňku záznamu napětí

Zkušební napětí musí mít příslušnou hodnotu, která je uvedena v tabulce 2 (této normy) a závisí na nejvyšším napětí zařízení a stanovené izolační hladině.[4]

6.1.3.2 Zkouška primárního vinutí atmosférickým impulzem pro přístrojové transformátory s $U_m < 300$ kV

Zkouška se musí provést s impulzy kladné i záporné polarity. Přiloží se 15 po sobě následujících impulzů každé polarity bez korekce na atmosférické podmínky.

Přednost se dává následujícímu zkušebnímu postupu B podle normy IEC 60060-1, který je přizpůsobený pro vysokonapěťová zařízení s obnovující se a neobnovující se izolací. Přístrojový transformátor se považuje za vyhovující impulzním zkouškám pro každou polaritu, jestliže jsou splněny následující podmínky:

- *Každá série (+ a -) má alespoň 15 impulzů*
- *Nedojde k žádným přeskokům na neobnovující se izolaci. To je potvrzeno 5 po sobě jdoucími výdržnými impulzy, následujícími po posledním přeskoku*
- *Počet přístrojový transformátor vydržel, i když došlo nanejvýše ke 2 přeskokům v každé sérii*

Tento postup vede k maximálnímu možnému počtu 25 impulzů v sérii.

Nesmí být zjištěn žádný důkaz o narušení izolace (např. odchylka tvaru vlny zaznamenané veličiny při výrobních kusových zkouškách sloužících jako ověřovací zkouška).

Pokud dojde k přeskokům a není možné podat během zkoušky důkaz, že k přeskokům došlo v obnovující se izolaci, musí dojít po skončení dielektrických zkoušek k demontáži a prohlídce přístrojového transformátoru. Je-li zpozorováno poškození neobnovující se izolace, přístrojový transformátor nevyhověl zkoušce. [4]

6.1.4 Zkouška za deště pro transformátory určené do venkovního prostředí

Způsob zkoušení za deště musí být v souladu s IEC 60060-1.

Pro přístrojové transformátory s $U_m < 300$ kV musí být zkouška provedena střídavým napětí průmyslového kmitočtu a hodnotou zkušebního napětí podle tabulky 2 (této normy) v závislosti na nejvyšším napětí pro zařízení, korigovaného na atmosférické podmínky.

Pro přístrojové transformátory s $U_m \geq 300$ kV musí být zkouška provedena spinacími impulzy kladné polarity a hodnotou zkušební napětí podle tabulky 2 (této normy) v závislosti na nejvyšším napětí pro zařízení a na jmenovité izolační hladině. [4]

Jelikož se jedná o vnitřní transformátor, tato zkouška se provádět nemusí.

6.1.5 Izolační zkouška sekundárního vinutí střídavým napětím průmyslového kmitočtu

Zkušební napětí odpovídající hodnoty podle 5.1.3 případně 6.1.4 (této normy) musí být přiloženo po dobu 60 s postupně mezi zkratované svorky každé sekce vinutí nebo každé sekundární vinutí a zem.

Kostra, obal (pokud je), jádro (má-li být uzemněno) a svorky všech jiných vinutí nebo sekcí musí být spojeny dohromady a uzemněny. [10]

6.1.6 Přepět'ová zkouška mezizávitové izolace

Přepět'ová zkouška mezizávitové izolace musí být provedena podle jedné z následujících metod.

Pokud není jinak dohodnuto, volba jedné z uvedených metod je závislá na výrobci.

Metoda A: Při rozpojených sekundárních vinutí (nebo připojených na zařízení s vysokou impedancí, které zaznamenává vrcholovou hodnotu) se na primární vinutí po dobu 60 s přivádí prakticky sinusový proud kmitočtu mezi 40 Hz a 60 Hz o efektivní hodnotě odpovídající jmenovitému primárnímu proudu (nebo jmenovitému zvětšenému primárnímu proudu, jestliže tento proud přichází v úvahu).

Použitý proud musí být omezen, jestliže zkušební napětí o vrcholové hodnotě 4,5 kV se dosáhne před dosažením jmenovitého proudu (nebo jmenovitého zvětšeného proudu).

Metoda B: Při rozpojených svorkách primárního vinutí se musí ke svorkám každého sekundárního vinutí připojit na dobu 60 s předepsané zkušební napětí (vhodného kmitočtu) s podmínkou, že efektivní hodnota sekundárního proudu nepřekročí hodnotu jmenovitého sekundárního proudu (nebo jmenovitý zvětšený proud).

Zkušební kmitočet nesmí překročit 400 Hz.

Pokud při tomto kmitočtu bude vrcholová hodnota napětí dosažená při jmenovitém sekundárním proudu (nebo zvětšeném proudu) nižší než 4,5 kV, potom toto napětí se považuje za hodnotu zkušebního napětí. Jestliže kmitočet převyšuje dvojnásobek jmenovitého kmitočtu, může se doba zkoušky snížit pod 60 s, nejméně však 15 sekund. [10]

6.1.7 Kontrola správnosti značení svorek

Značení svorek musí identifikovat

- *Primární a sekundární vinutí*
- *Sekce vinutí, pokud jsou*
- *Relativní polarity vinutí a sekcí vinutí*
- *Střední odbočky, pokud jsou [10]*

6.1.8 Měření nadproudového čísla

Typová zkouška může být provedena požitím následující nepřímé zkoušky:

Primární vinutí je rozpojené, sekundární vinutí je buzeno při jmenovitém kmitočtu v podstatě sinusovým napětím, které má efektivní hodnotu rovnou krajnímu sekundárnímu elektromotorickému napětí.

Výsledný budicí proud (I_{exc}) vyjádřený v procentech jmenovitého sekundárního proudu (I_{sn}) násobeného nadproudovým číslem FS musí být stejný nebo větší než je jmenovitá hodnota celkové chyby 10%.

Pokud by výsledek tohoto měření byl diskutabilní, musí se provést kontrolní měření pomocí přímé zkoušky, jejíž výsledek je pak rozhodující.

Změřené nadproudové číslo musí být menší nebo rovné numericky vypočtenému nadproudovému číslu získanému z návrhu transformátoru u měřicích transformátorů. U jisticích transformátorů musí být naměřené nadproudové číslo větší nebo rovno udávanému nadproudovému číslu na výrobním štítku transformátoru. [10]

6.1.9 Měření částečných výbojů

Po předchozím namáhání podle postupů A nebo B se dosáhne zkušebních napětí částečných výbojů podle tabulky 3 (norma) a měří se odpovídající hladiny částečných výbojů v čase do 30 s.

Naměřené částečné výboje nesmí přesáhnout meze uvedené v tabulce 3 (norma).

Postup A: zkušební napětí částečných výbojů jsou dosažena při snižování napětí po výdržné zkoušce střídavým napětí průmyslového kmitočtu.

Postup B: Zkouška částečných výbojů se provede po zkoušce střídavým napětím průmyslového kmitočtu. Hodnota přiloženého napětí se zvýší na 80% zkušebního střídavého napětí průmyslového kmitočtu a udržuje se po dobu alespoň 60 s a pak se bez přerušení sníží na stanovenou hodnotu napětí pro měření částečných výbojů.

Pokud není stanoveno jinak, je volba postupu ponechána na výrobcí. Použitá zkušební metoda musí být uvedena ve zkušebním protokolu. [4]

Měření částečných výbojů dle normy ČSN EN 61869-1 se nevztahuje na nn přístrojové transformátory proudu.

6.1.10 Měření chyb

Typové zkoušky k prověření požadavků uvedených v 11.2 (této normy) v případě transformátorů tříd 0,1 až 1 musí být provedeny pro každou hodnotu proudu uvedenou v tabulce 3-1 při 25% a 100% jmenovité zátěže (s podmínkou, že 1 VA bude představovat minimum zátěže).

Transformátory mající rozšířený proudový rozsah větší než 120% musí být zkoušeny při jmenovitém rozšířeném primárním proudu místo při 120% jmenovitého proudu.

Transformátory třídy 3 a 5 musí být zkoušeny při dvou hodnotách proudu uvedených v tabulce 3-3 při 50% a 100% jmenovité zátěže (s podmínkou, že 1 VA bude představovat minimum zátěže). [10]

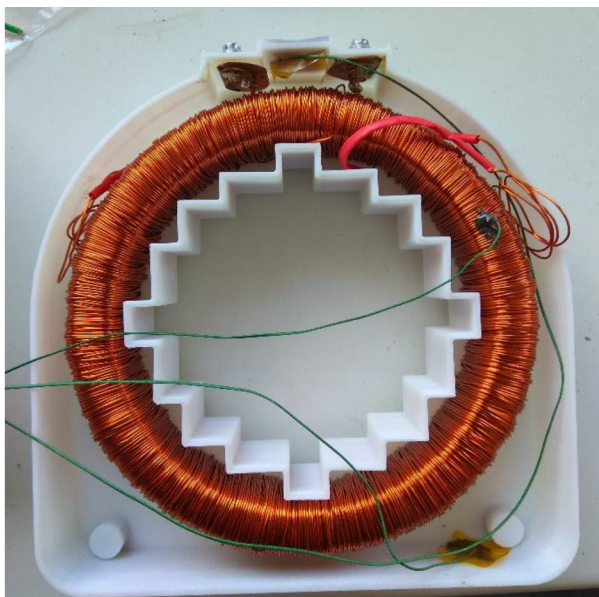
6.2 Částečná typová zkouška

V této kapitole budou uvedeny zkoušky provedené na tomto transformátoru.

6.2.1 Oteplovací zkouška

Pro daný transformátor byla zvolena třída izolace E. Pro tuto třídu izolace je podle normy ČSN EN 61869-1 maximální dovolená hodnota oteplení 75 K.

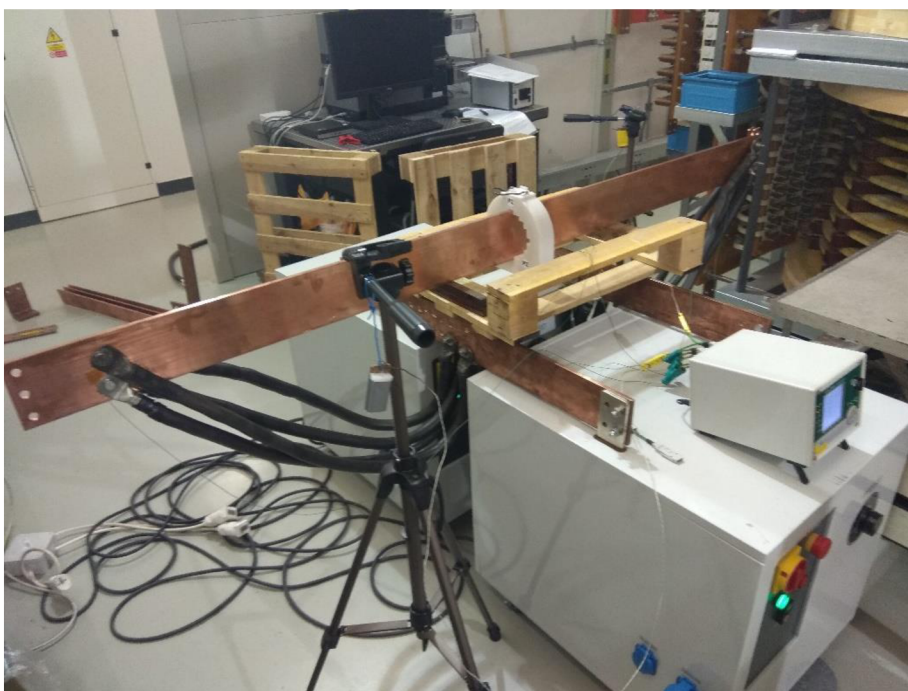
Zkouška transformátoru byla provedena při použití primárního vodiče o rozměrech 120 x 10 mm a délce 2000 mm ve vodorovné i svislé poloze viz Obr. 6-2 a Obr. 6-3. Termočlánky v transformátoru byly umístěny viz Obr. 6-1, a na šíně byly umístěny na každém konci šíny u připojených vodičů.



Obr. 6-1 Umístění termočlánků uvnitř transformátoru



Obr. 6-2 Měření oteplovací zkoušky při orientaci primárního vodiče vodorovně

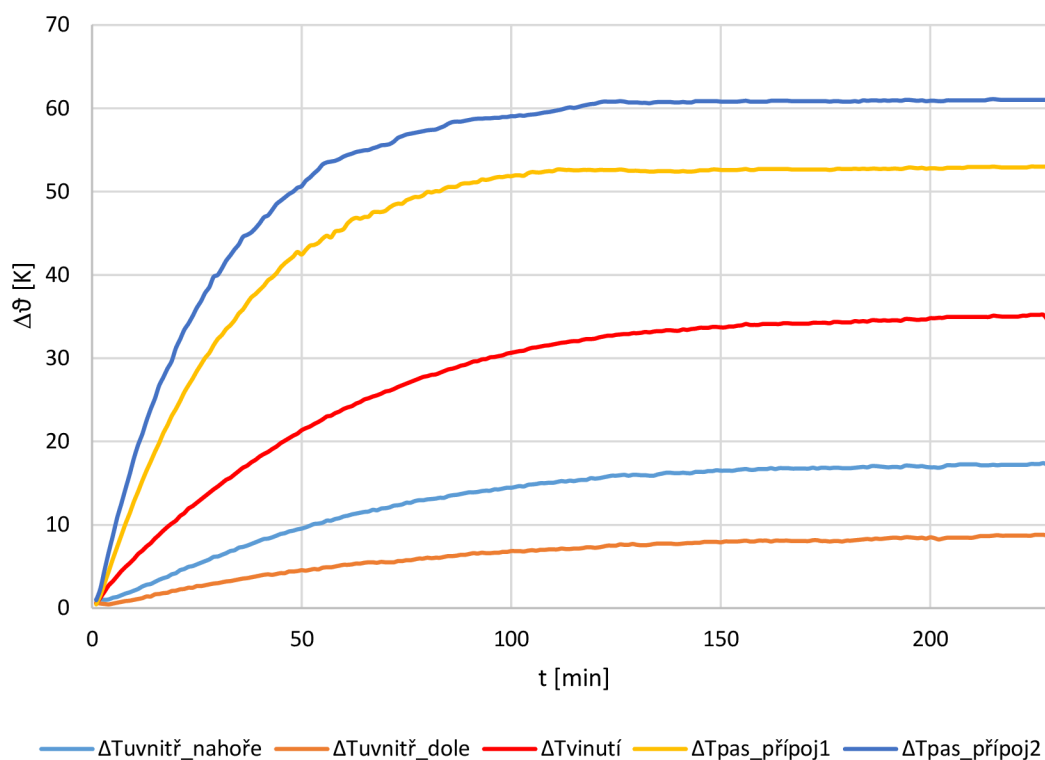


Obr. 6-3 Měření oteplovací zkoušky při orientaci primárního vodiče svisle

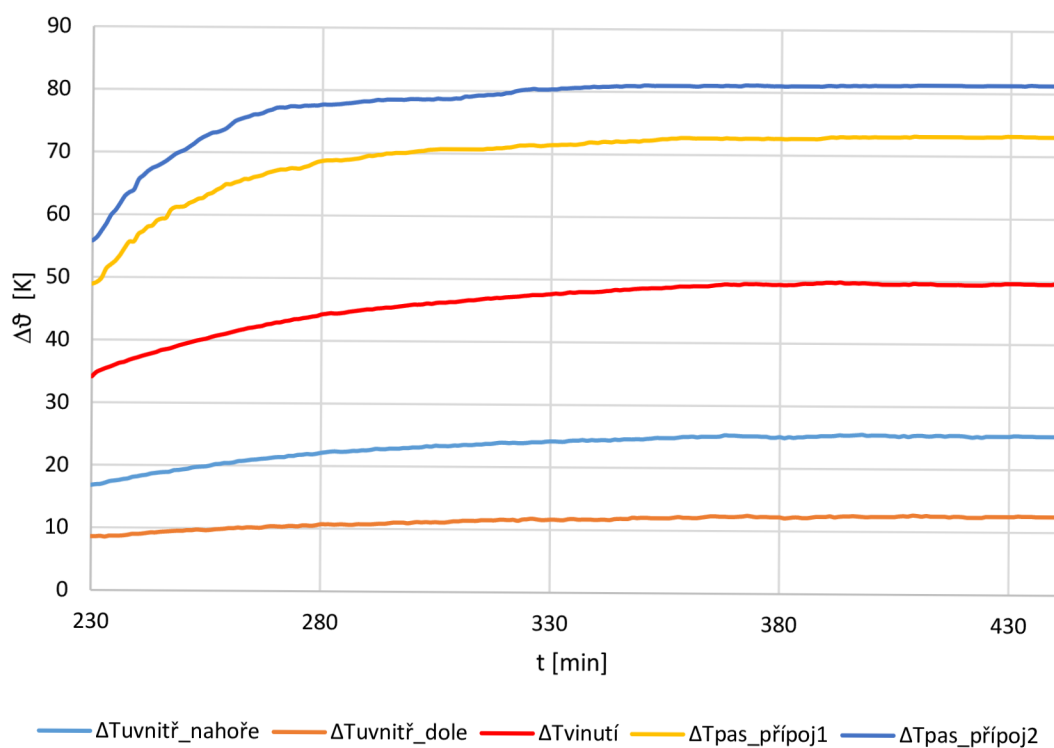
Podle zadání byla zkouška provedena pro primární proud 100% I_n a 120% I_n . Sekundární svorky byly při zkoušce zkratovány. Měření sekundárního odporu bylo provedeno vždy před a po zkoušce. V Tabulce 6-2 jsou uvedeny hodnoty získané při zkoušce.

Tabulka 6-2 Tabulka hodnot získaných při oteplovací zkoušce

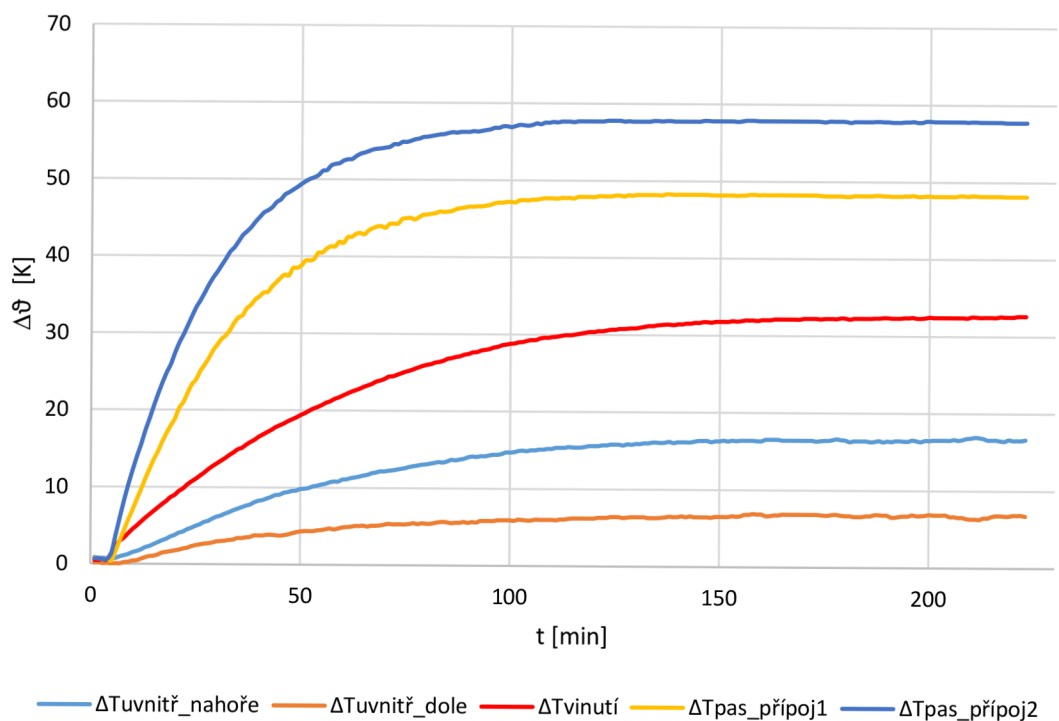
Typ transformátoru	Převod	Orientace	Primární proud během oteplovací zkoušky		Vinutí	
			100%	2500 A	S1-S2	S1-S2
CLH 120	2500/1A	vodorovně	100%	2500 A	S1-S2	S1-S2
			120%	3000 A	S1-S2	S1-S2
		svisle	100%	2500 A	S1-S2	S1-S2
			120%	3000 A	S1-S2	S1-S2
Odpor sekundárního vinutí počáteční [Ω]	Odpor sekundárního vinutí konečný [Ω]	Oteplení vinutí [K]	Teplota pasů [$^{\circ}\text{C}$]		Teplota okolí [$^{\circ}\text{C}$]	
			počáteční	konečná	počáteční	konečná
7,726	8,82	34,6	21,15	79,2	20,45	22,2
7,726	9,292	50,01	21,15	100,4	20,45	23,1
7,763	8,795	32,65	19,25	76	19,95	23,05
7,763	9,248	48,05	19,25	98,45	19,95	23,15



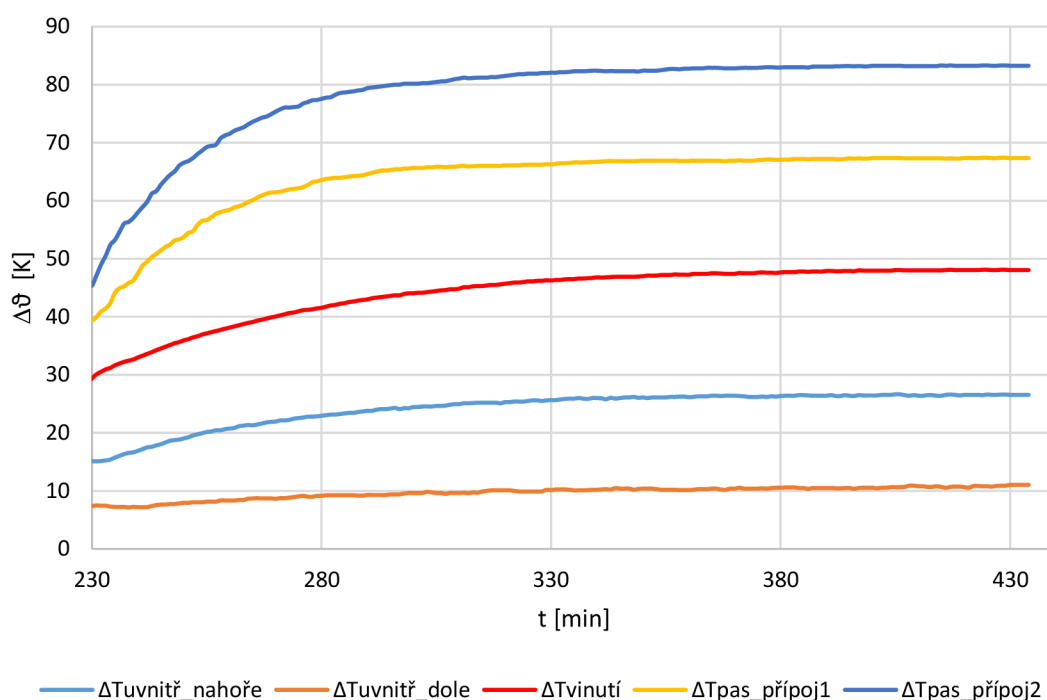
Graf 6-1 Průběh oteplení při 100% I_n při poloze primárního vodiče vodorovně viz zobrazení na Obr. 6-2.



Graf 6-2 Průběh oteplení při 120% I_n při poloze primárního vodiče vodorovně viz zobrazení na Obr. 6-2.



Graf 6-3 Průběh oteplení při 100% I_n při poloze primárního vodiče svisle viz zobrazení na Obr. 6-3.



Graf 6-4 Průběh oteplení při 120% I_n při poloze primárního vodiče svisle viz zobrazení na Obr. 6-3.

Měření oteplení při 120% I_n bylo měřeno vždy následně po měření 100% I_n . A to tak, že po ustálení teploty při 100% I_n byl odpojen zdroj proudu, aby mohl být změřen odpor sekundárního vinutí. Po tomto měření se zdroj opětovně připojil a byla na něm nastavena hodnota 120% I_n . Z tohoto důvodu průběhy oteplení znázorněné v grafech 6-2 a 6-4 nezačínají v čase 0, ale v čase po změření sekundárního odporu po oteplovací zkoušce při 100% I_n .

Grafické závislosti získané pomocí simulace se budou lehce lišit od těch, které byly získané při oteplovací zkoušce na zkušební. Je tomu tak z důvodů, které jsou uvedeny už v kapitole výše a také, že program počítá hodnotu oteplení vždy od počáteční teploty okolí, která se v průběhu simulace neliší. Jinak tomu bude u oteplovací zkoušky, při které bude snímána i aktuální teplota oteplení okolí. Od této hodnoty se potom bude počítat oteplení.

Hodnoty oteplení získané simulací a provedenou oteplovací zkouškou se také liší od numericky vypočtených hodnot. Toto je způsobeno tím, že při numerickém výpočtu se počítá pouze se ztrátovým výkonem sekundárního vinutí a není v něm zahrnuto přídavné oteplení primárního vodiče, které je značné.

Z výše uvedených dat je vidět, že transformátor na oteplovací zkoušku VYHOVĚL.

6.2.2 Izolační zkouška sekundárního vinutí střídavým napětím průmyslového kmitočtu

Tato zkouška byla provedena zkušebním napětí 3 kV o kmitočtu 50 Hz po dobu 60 s mezi zkratovanými sekundárními svorkami a uzemněnou deskou. Zkouška byla provedena na zkušebním zdroji ve firmě KPB Intra. Transformátor u této zkoušky VYHOVĚL.

6.2.3 Přepět'ová zkouška mezizávitové izolace

Při této zkoušce byl na primární vinutí přiveden jmenovitý primární proud po dobu 60 s. Na sekundárním vinutí bylo měřeno napětí, které nesmělo překročit hodnotu 4,5 kV. Během těchto 60 s nedošlo k průrazu. Transformátor tedy u této zkoušky VYHOVĚL.

6.2.4 Kontrola správnosti značení svorek

Správné značení svorek musí odpovídat normě. Značení svorek musí odpovídat kritériím uvedeným v kapitole výše. Transformátor u této zkoušky VYHOVĚL

6.2.5 Měření nadproudového čísla

Vypočtené nadproudové číslo vyšlo FS 7,802. Nadproudové číslo změřené nepřímou metodou na zkušebně vyšlo FS 8,95. Vzhledem k tomu, že zadané nadproudové číslo bylo FS 10, tento transformátor u zkoušky VYHOVĚL. Při porovnání výsledků je patrné, že při návrhu bylo počítáno s rezervou.

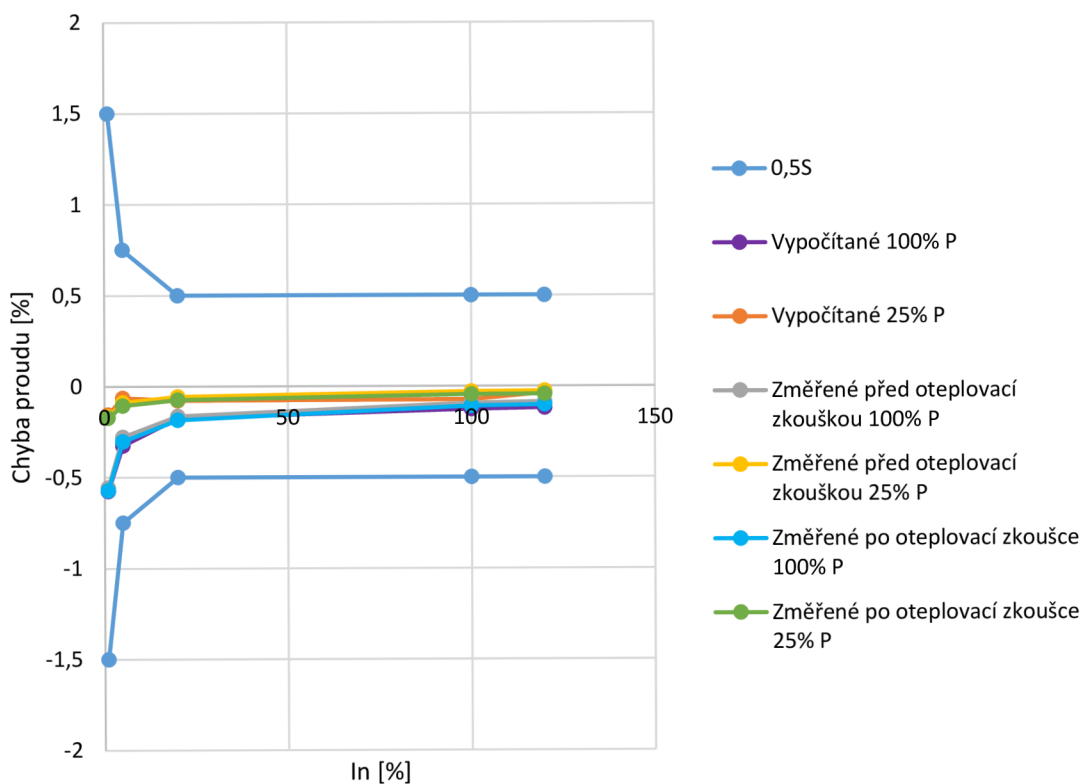
6.2.6 Měření chyb

Transformátor se připojí na měřicí přístroj, který proměří celé pole chyb transformátoru. Pokud leží jeho pole chyb v dovolených mezích stanovených podle třídy přesnosti, potom tento transformátor u zkoušky vyhověl.

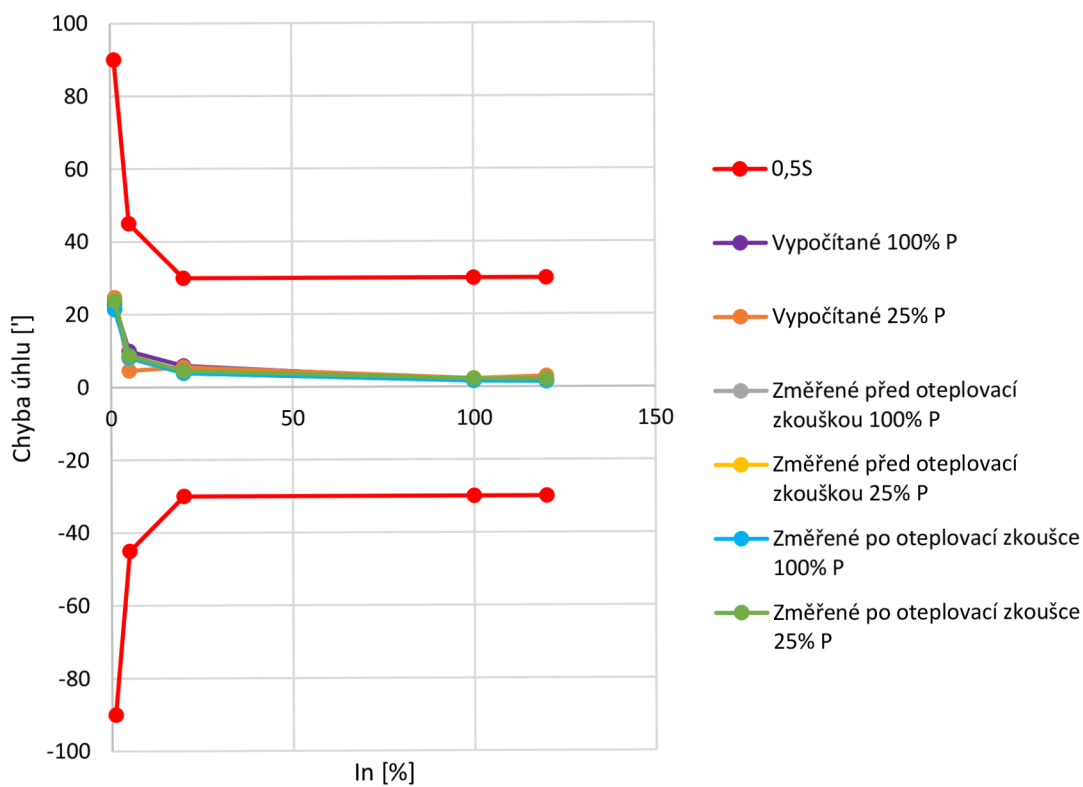
Dovolené pole chyb pro třídy přesnosti 0,1-1,0 uvádí Tabulka 3-1 viz kapitola výše. Dovolené pole chyb pro třídy přesnosti 0,2S a 0,5S uvádí Tabulka 3-2 viz kapitola výše. Dovolené pole chyb pro třídy přesnosti 3 a 5 uvádí Tabulka 3-3 viz kapitola výše. Vypočtené a naměřené hodnoty chyb jsou uvedeny v Tabulce 6-3 níže. Dále z této tabulky vychází Grafy 6-5 a 6-6, na kterých je výsledek této zkoušky znázorněn graficky. Z těchto hodnot je patrné, že transformátor u této zkoušky VYHOVĚL. Z tabulky a grafů je patrné, že hodnoty chyb změřené (před a po provedené oteplovací zkoušce) a vypočtené se liší jen nepatrně.

Tabulka 6-3 Vypočtené a změřené pole chyb

Vypočítané										
P=15 VA	Chyba proudu [%]					Chyba úhlu [']				
	1%In	5%In	20%In	100%In	120%In	1%In	5%In	20%In	100%In	120%In
100% P	-0,575	-0,326	-0,175	-0,127	-0,119	23,07	9,916	5,849	1,737	1,542
25% P	-0,155	-0,063	-0,078	-0,074	-0,037	24,736	4,573	5,547	2,27	2,936
Změřené před oteplovací zkouškou										
100% P	-0,556	-0,278	-0,164	-0,093	-0,086	21,32	8,03	3,86	1,67	1,48
25% P	-0,166	-0,088	-0,056	-0,03	-0,027	23,93	8,52	4,33	2,21	2,04
Změřené po oteplovací zkoušce										
100% P	-0,572	-0,302	-0,185	-0,11	-0,103	21,58	8,24	3,9	1,62	1,43
25% P	-0,173	-0,106	-0,074	-0,046	-0,044	23,83	8,73	4,44	2,22	2,05



Graf 6-5 Vypočtené a změřené pole chyb proudu



Graf 6-6 Vypočtené a změřené pole chyb úhlu

7 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout přístrojový transformátor proudu s převodem 2500/1 A. V práci jsou postupně vysvětleny základní pojmy vztahující se k přístrojovým transformátorům obecně a poté základní pojmy vztahující se přímo k přístrojovým transformátorům proudu. Následně je zde proveden teoretický rozbor a analýza funkce přístrojových transformátorů proudu. Poté je zde proveden návrh měřicího transformátoru proudu. Tento transformátor byl navržen ve spolupráci s firmou KPB Intra s.r.o. a následně bude reprezentovat novou řadu přístrojových transformátorů proudu v nabídce KPB Intra s.r.o.

Zadání transformátoru bylo:

Převod 2500/1 A

Nejvyšší napětí soustavy 0,72 kV

Frekvence 50 Hz

Jmenovitý krátkodobý tepelný proud 150 kA

Jmenovitý dynamický proud 375 kA

Jmenovitá zátěž 15 VA

Třída přesnosti 0,5S

Nadproudové číslo FS10

V úvodní kapitole je shrnuto, co to jsou přístrojové transformátory a k čemu slouží. Následuje kapitola, ve které je uvedeno dělení přístrojových transformátorů obecně a dále jsou vysvětleny základní definice dané normou vztahující se k přístrojovým transformátorům. V další kapitole, která se už přímo zaměřuje na přístrojové transformátory proudu, je v prvním bodě uvedeno jejich dělení. Následně jsou uvedeny hodnoty povolených chyb proudu a chyb úhlu dané normou pro jednotlivé třídy přesnosti. Následně je v této kapitole uvedena charakteristika funkce přístrojového transformátoru proudu, vysvětlení sestavení fázorového diagramu, jsou zde popsány pracovní oblasti transformátoru. Dále je zde uvedeno náhradní schéma s výpočtem, a popis chyb transformátoru proudu a jejich závislosti na jednotlivých veličinách. V posledním bodě kapitoly je uveden postup při návrhu měřicího transformátoru proudu.

V další kapitole je zadaný transformátor navržen. Při výpočtu se vycházelo z kapitoly 3.6 a jsou zde uvedeny výpočty jen pro jednu hodnotu procentního jmenovitého primárního proudu I_n . Při výpočtech pro ostatní hodnoty proudu I_n se postupuje stejně jak je uvedeno pro 0,01% I_n . Výstupem této kapitoly jsou navržené rozměry měřicího jádra transformátoru a další geometrické rozměry týkající se ostatních částí transformátoru. Nakonec jsou zde uvedeny hodnoty, které ověřují, že transformátor proudu vyhoví na splnění nadproudového čísla a chyb proudu a úhlu podle normy. Hodnoty chyb transformátoru jsou uvedeny v Tabulce 6-3 a Grafech 6-5 a 6-6. Z těchto hodnot je patrné, že navržený transformátor splňuje požadavky dané normou a mohlo být přistoupeno k výrobě prototypu.

Pátá kapitola se zabývá tepelnými výpočty navrženého transformátoru. Nejprve je zde uveden numerický výpočet ustáleného oteplení transformátoru. Tento výpočet vychází z numerického návrhu transformátoru. Z tohoto výpočtu vyšlo ustálené oteplení vinutí transformátoru pro 100% I_n 15,34 K a pro 120% I_n 22,08 K. Dále je v této kapitole popsán postup při simulaci transformátoru v programu Femm. Z této simulace byly zjištěny hodnoty ustáleného oteplení sekundárního vinutí pro vodorovnou orientaci primárního vodiče 46,13 K pro 100% I_n a 51,11 K pro 120% I_n a pro svislou orientaci primárního vodiče 50,97 K pro 100% I_n a 65,79 K pro 120% I_n .

V poslední kapitole je shrnuta typová zkouška transformátoru proudu obecně a dále částečná typová zkouška provedená na vyrobeném transformátoru. Při oteplovací zkoušce bylo naměřeno ustálené oteplení vinutí pro vodorovnou orientaci primárního vodiče 34,6 K pro 100% I_n a 50,01 K pro 120% I_n . Při svislé orientaci primárního vodiče bylo naměřeno ustálené oteplení 32,65 K pro 100% I_n a 48,05 K pro 120% I_n . Z těchto získaných výsledků je patrné, že tento transformátor splnil požadavky na maximální dovolené oteplené dané jeho třídou izolace.

Při porovnání výsledků numericky vypočteného, simulovaného a změřeného oteplení si lze všimnout, že výsledky nejsou úplně totožné. Oteplení ze simulace a změřené oteplení se liší málo. Rozdíl v těchto hodnotách je způsoben tím, že při simulaci byly

některé parametry zjednodušeny nebo byly zadané teoretické parametry, zatímco při měřené oteplovací zkoušce byly parametry reálné. Například jedna strana použité šíny byla natřená černou barvou, což má vliv na emisivitu a dochází tedy k jinému šíření tepla ze šíny, než by tomu bylo při leštěném povrchu. Ustálená oteplení vypočtená numericky se od změřených a simulovaných liší razantně. To je způsobeno především tím, že při numerickém výpočtu se oteplení počítá pouze ze ztrátového výkonu sekundárního vinutí a není zde zahrnuto oteplení, které se radiací přenáší z primárního vodiče.

Tento transformátor u všech provedených zkoušek vyhověl.

Literatura

- [1] KOPEČEK, Jan a Miloš DVOŘÁK. *Přístrojové transformátory: měřicí a jističí*. Praha: Academia, 1966.
- [2] KRÁL, Josef a Jaromír VANĚK. *Elektromagnetické přístroje*. Brno: Rektorát VUT v Brně, 1984.
- [3] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Vydání 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02109-2.
- [4] *ČSN EN 61869-1: Přístrojové transformátory - Část 1: Všeobecné požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [5] *ČSN EN 61869-2: Přístrojové transformátory - Část 2: Dodatečné požadavky na transformátory proudu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [6] DOSTÁL, Lukáš. *Přístrojové transformátory proudu a napětí* [PDF]. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [7] DOSTÁL, Lukáš. *Přístrojové transformátory* [PDF]. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [8] *Přístrojové transformátory proudu vnitřní. KPB Intra: Instrument Transformers* [online]. Bučovice, 2013 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://www.kpb intra.cz/produkty/transformatory-proudu-vnitri>
- [9] MAKKI, Zbyněk. *Přístrojové transformátory: Fázorová chyba MTP a rozdělení proudu do dvou paralelních větví pomocí MTP* [PDF]. Brno, 2011 [cit. 2019-01-04]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [10] *ČSN EN 60044-1: Přístrojové transformátory - Část 1: Transformátory proudu*. Praha: Český normalizační institut, 2001.

Seznam symbolů a zkratk

Zkratky:

FEKT	...	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	...	Vysoké učení technické v Brně
NN	...	Nízkonapěťový
VN	...	Vysokonapěťový

Symboly:

I_1	...	primární proud	[A]
I_2	...	sekundární proud	[A]
N_1	...	počet primárních závitů	[záv.]
N_2	...	počet sekundárních závitů	[záv.]
U_2	...	sekundární napětí	[V]
R_z	...	zátěž	[Ω]
U_{20}, U_{10}, U'_{20}	...	indukované napětí na sekundárních svorkách	[V]
R_2	...	odpor sekundárního vinutí	[Ω]
f	...	frekvence	[Hz]
ϕ	...	magnetický tok	[Wb]
I_{10}	...	budící proud	[A]
H_0	...	intenzita magnetického pole	[A/m]
l_m	...	střední délka siločáry magnetického obvodu	[m]
k	...	převod transformátoru	[-]
I'_2	...	sekundární proud přepočtený na počet závitů primárního vinutí	[A]
U'_2	...	sekundární napětí přepočtené na počet závitů primárního vinutí	[V]
R'_2	...	odpor sekundárního vinutí přepočtený na počet závitů primárního vinutí	[Ω]
X'_2	...	reaktance sekundárního vinutí přepočtená na počet závitů primárního vinutí	[Ω]
R_1	...	odpor primárního vinutí	[Ω]

X_1	...	reaktance primárního vinutí	[Ω]
k_i	...	jmenovitý převod transformátoru	[-]
I_{1N}	...	jmenovitý primární proud	[A]
I_{2N}	...	jmenovitý sekundární proud	[A]
T_p	...	třída přesnosti	[-]
FS	...	nadproudové číslo	[-]
I_{th}	...	jmenovitý krátkodobý tepelný proud	[A]
S'_{1}	...	průřez primárního vodiče potřebný k tomu, aby odolal krátkodobému tepelnému proudu	[m ²]
σ_{th}	...	proudová hustota vodičů primárního vinutí při jmenovitém krátkodobém tepelném proudu	[A/m]
B_n	...	jmenovitá magnetická indukce	[T]
B_m	...	maximální magnetická indukce materiálu	[T]
n	...	nadproudové číslo	[-]
S'	...	předběžný průřez magnetického jádra	[m ²]
P, P_n	...	jmenovitá zátěž TP	[VA]
ξ	...	činitel plnění magnetického obvodu	[-]
D'_{21}	...	nejmenší možný vnitřní průměr magnetického obvodu s navinutým sekundárním vinutím	[m]
t_i	...	tloušťka izolačního předělu mezi primárním a sekundárním vinutím	[m]
D_{1i}	...	průměr průchozího otvoru transformátoru	[m]
n_2	...	počet vrstev sekundárního vinutí	[-]
ξ_1	...	činitel plnění při skládání vodičů vedle sebe	[-]
d_{2i}	...	průměr sekundárního vodiče	[m]
t_2	...	výška sekundárního vinutí	[m]
ξ_2	...	činitel nárůstu výšky vinutí	[-]
D'_{3i}	...	předběžný vnitřní průměr pouzdra magnetického obvodu	[m]
D'_i	...	předběžný vnitřní průměr magnetického jádra	[m]
s	...	vzdálenost stěny magnetického jádra od stěny pouzdra (na výšku	[m]

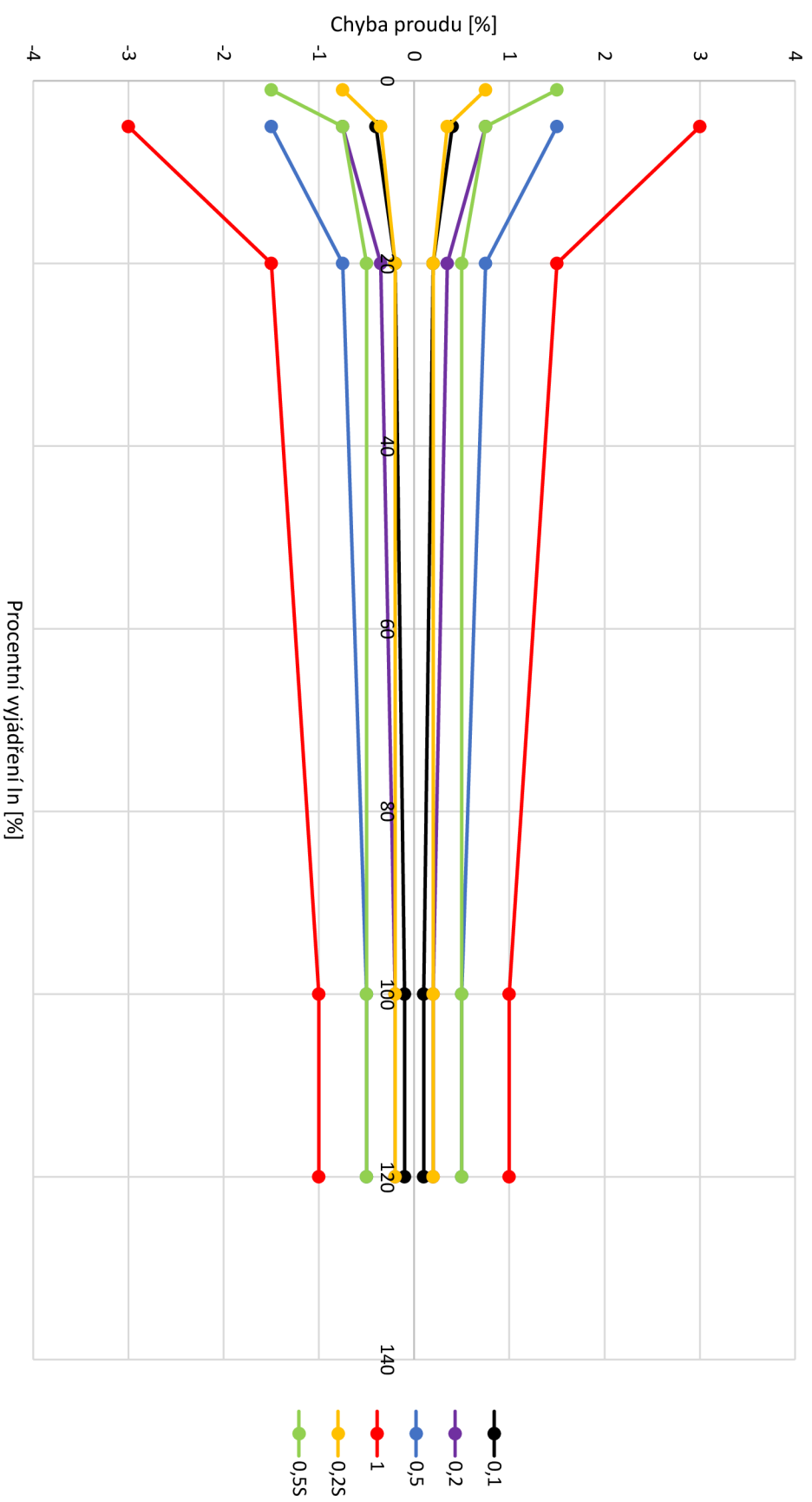
D_i	...	vnitřní průměr magnetického jádra	[m]
D_{3i}	...	vnitřní průměr pouzdra	[m]
D_{2i}	...	vnitřní průměr magnetického obvodu s vinutím	[m]
h	...	výška jádra	[m]
b	...	šířka jádra	[m]
S	...	průřez magnetického jádra	[m ²]
r	...	vzdálenost stěny magnetického jádra od stěny pouzdra (na šířku)	[m]
l_2	...	střední délka závitů sekundárního vinutí	[m]
ρ	...	měrný odpor mědi	[$\Omega \cdot m$]
S_2	...	průřez sekundárního vodiče	[m ²]
P_i	...	vnitřní zátěž při jmenovitém proudu	[VA]
Z_n	...	jmenovité břemeno	[Ω]
R	...	činná složka jmenovitého břemene	[Ω]
X	...	jalová složka jmenovitého břemene	[Ω]
$P_{\check{c}}$...	činná složka jmenovité zátěže	[VA]
P_j	...	jalová složka jmenovité zátěže	[VA]
P_c	...	celková zátěž transformátoru při jmenovitém proudu	[VA]
H_g	...	činná složka intenzity magnetického pole	[A/m]
p_{Fe}	...	měrné ztráty	[W/kg]
γ_{Fe}	...	měrná hmotnost feromagnetického materiálu	[kg/m ³]
I_{20}	...	celková chyba přepočtená na počet závitů sekundárních závitů	[A]
ε_c	...	celková chyba TP	[%]
ε_i	...	chyba proudu	[%]
δ_i	...	chyba úhlu	[‘]
$\Delta\vartheta$...	ustálené oteplení	[K]
S	...	povrch vinutí	[m ²]
α	...	součinitel přestupu tepla	[W/m ² ·°C]
τ	...	časová konstanta	[s]
c	...	měrné teplo	[W·s/kg·°C]

m	...	hmotnost	[kg]
t	...	čas	[s]
I_{th}	...	tepelný proud	[A]
I_{dyn}	...	jmenovitý dynamický proud	[A]

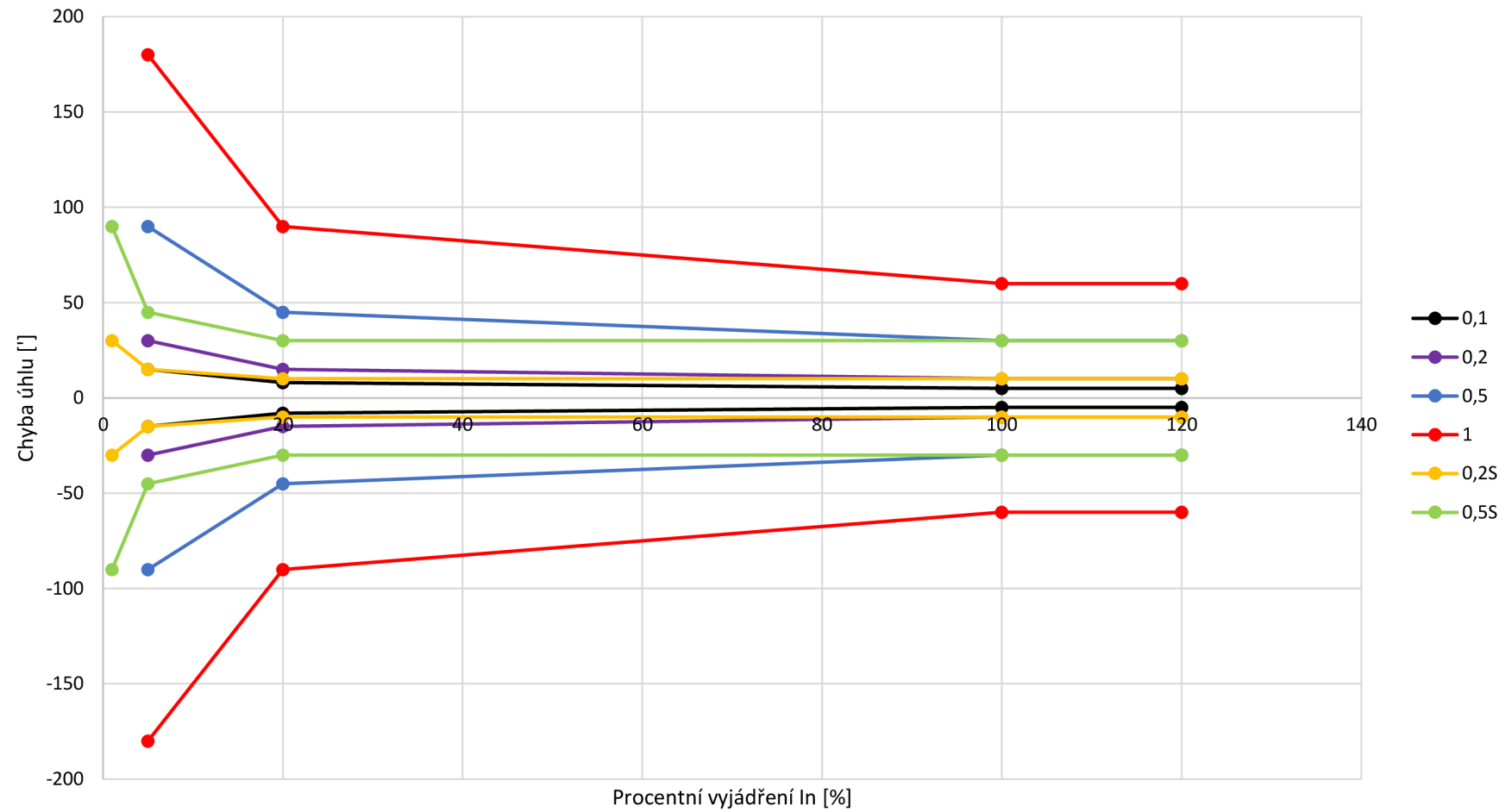
Seznam příloh

Příloha 1 – Grafické znázornění chyb proudu PTP podle normy	1
Příloha 2 – Grafické znázornění chyb úhlu PTP podle normy	2
Příloha 3 – Magnetizační charakteristika materiálu magnetického jádra	3
Příloha 4 – Měrné ztráty při magnetické indukci	3
Příloha 5 – Změřené pole chyb před oteplovací zkouškou	4
Příloha 6 – Změřené pole chyb po oteplovací zkoušce.....	6

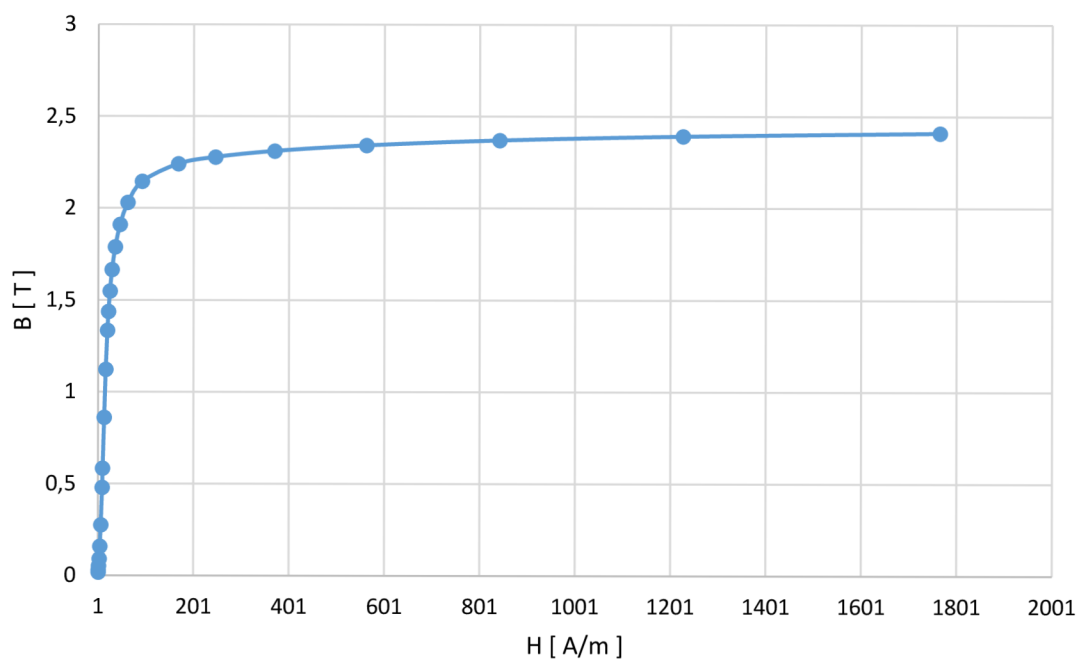
■ Příloha 1 – Grafické znázornění chyb proudu PTP podle normy



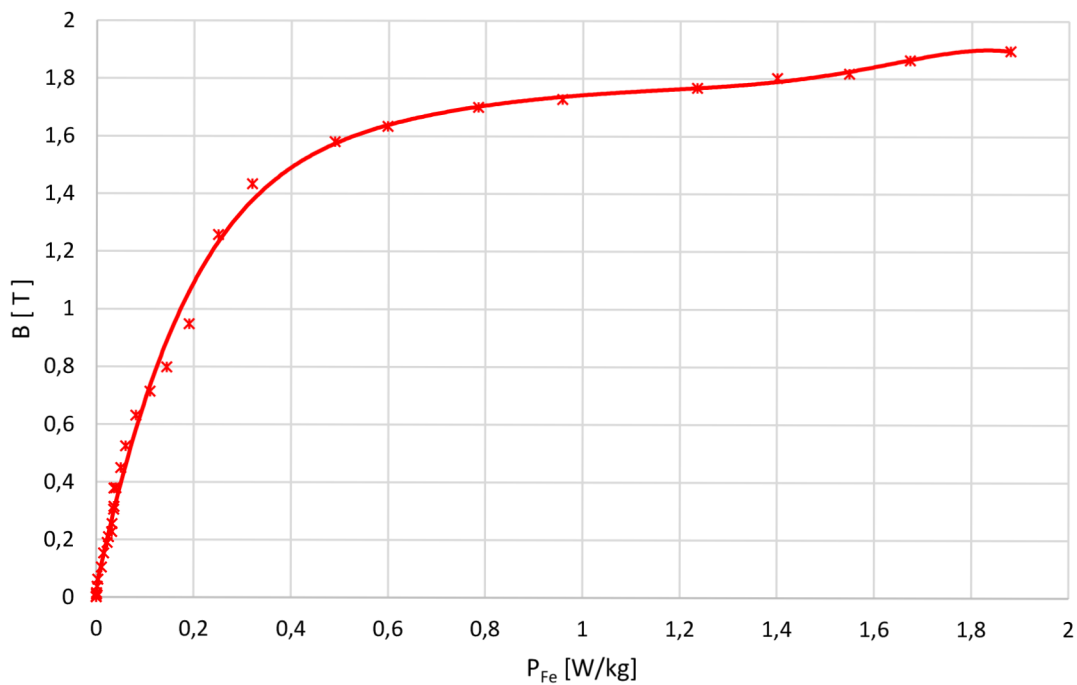
■ Příloha 2 – Grafické znázornění chyb úhlu PTP podle normy



■ Příloha 3 – Magnetizační charakteristika materiálu magnetického jádra



■ Příloha 4 – Měrné ztráty při magnetické indukci



■ Příloha 5 – Změřené pole chyb před oteplovací zkouškou

General test information:

Date/Time: 2018-11-08, 11:39:44

Test device:	CT-Analyzer	Device Serial No.:	EL006Z
File name:	U:\Vykoukal Tomáš\2500_1 15VA clh120.xml		
Assessments:	OK		

Used test settings:

I-pn:	2500,0 A	Location:	Object:
I-sn:	1,0 A	Company:	Manufacturer:
Rated burden:	15,0 VA / 0,8	Country:	Type:
Operating burden:	15,0 VA / 0,8	Station:	Serial number:
Applied standard:	IEC 61869-2	Feeder/Bay:	Core number:
Core type (P/M):	P	Phase:	Tap:
Class:	5P	IEC-ID	Optional:
ALF: 5,0	Ts:		
f: 50,0 Hz	max. Rct: 9,443 Ω		

Resistance test:

Rmeas (25°C):	7,91775 Ω
Rref (75°C):	9,44333 Ω

Burden test:

Burden:	cos φ:	Z:
Vmeas:	Imeas:	

Excitation test:

V-kn:	143,658 V	I-kn:	0,007058 A	Result with rated burden:		Result with operating burden:	
V-kn 2:	#####	I-kn 2:	#####	ALF:	8,51	ALFi:	8,2
Ls:	0,0078932H	Lm:	91,3277 H	Ts:	4,259s	Ts:	4,259s
Kr:	74,81 %						

Ratio test:

Ratio:	2500,0 : 0,99907	ε :	-0,0925 %	Δφ:	1,67 min	Polarity:	OK	N:	2499,45
		ε _e :	0,1097 %						

	Current ratio error in % at % of rated current							
VA/cosPhi	1	5	10	20	50	100	120	200
15 VA/ 0,8	-0,5556	-0,2785	-0,2143	-0,1644	-0,1181	-0,0925	-0,0862	-0,0693
7,5 VA/ 0,8	-0,3933	-0,187	-0,1446	-0,1097	-0,0766	-0,0589	-0,0549	-0,0446
3,75 VA/ 1	-0,1658	-0,0884	-0,0716	-0,0565	-0,039	-0,0295	-0,0274	-0,0223
1,88 VA/ 1	-0,1514	-0,0756	-0,0596	-0,0468	-0,0317	-0,023	-0,0212	-0,0166

	Phase displacement in [min] at % rated current							
VA/cosPhi	1	5	10	20	50	100	120	200
15 VA/ 0,8	21,321	8,0286	5,5112	3,8621	2,4799	1,6725	1,4818	1,1238
7,5 VA/ 0,8	20,781	7,6766	5,2448	3,7041	2,4071	1,7447	1,5897	1,1785
3,75 VA/ 1	23,931	8,5155	5,9946	4,3309	2,9249	2,2057	2,0446	1,6291
1,88 VA/ 1	23,728	7,8003	5,4678	3,9519	2,6379	1,9896	1,8458	1,4836

■ Příloha 6 – Změřené pole chyb po oteplovací zkoušce

General test information:

Date/Time: 2018-12-06, 15:47:15

Test device:	CT-Analyzer	Device Serial No.:	EL006Z
File name:	U:\Vykoukal Tomáš\2500_1 15VA clh120.xml		
Assessments:	OK		

sed test settings:

I-pn:	2500,0 A	Location:	Object:
I-sn:	1,0 A	Company:	Manufacturer:
Rated burden:	15,0 VA / 0,8	Country:	Type:
Operating burden:	15,0 VA / 0,8	Station:	Serial number:
Applied standard:	IEC 61869-2	Feeder/Bay:	Core number:
Core type (P/M):	P	Phase:	Tap:
Class:	5P	IEC-ID	Optional:
ALF: 5,0	Ts:		
f: 50 Hz	max. Rct: 9,372 Ω		

Resistance test:

Rmeas (25°C):	7,85766 Ω
Rref (75°C):	9,37166 Ω

Burden test:

Burden:	cos	Z:
	φ:	
Vmeas:	Imeas:	

Excitation test:

V-kn:	143,946 V	I-kn:	0,005991 A	Result with rated burden:		Result with operating burden:	
V-kn 2:	#####	I-kn 2:	#####	ALF:	8,55	ALFi:	8,23
Ls:	0,0078749H	Lm:	99,2699 H	Ts:	4,645s	Ts:	4,645s
Kr:	83,81 %						

Ratio test:

Ratio: 2500,0 : 0,99905	ε : -0,095 %	Δφ: 1,51 min	Polarity: O K	N: 2499,58
	ε _c : 0,1096 %			

	Current ratio error in % at % of rated current							
VA/cosPhi	1	5	10	20	50	100	120	200
15 VA/ 0,8	-0,5726	-0,302	-0,237	-0,185	-0,137	-0,110	-0,103	-0,087
7,5 VA/ 0,8	-0,402	-0,208	-0,165	-0,129	-0,095	-0,076	-0,072	-0,061
3,75 VA/ 1	-0,173	-0,106	-0,089	-0,074	-0,056	-0,046	-0,044	-0,039
1,88 VA/ 1	-0,158	-0,093	-0,077	-0,064	-0,049	-0,040	-0,038	-0,033

	Phase displacement in [min] at % rated current							
VA/cosPhi	1	5	10	20	50	100	120	200
15 VA/ 0,8	21,58	8,24	5,63	3,90	2,46	1,62	1,43	0,98
7,5 VA/ 0,8	20,80	7,88	5,38	3,77	2,42	1,73	1,57	1,15
3,75 VA/ 1	23,83	8,73	6,15	4,44	2,97	2,22	2,05	1,62
1,88 VA/ 1	23,57	7,99	5,61	4,05	2,68	2,00	1,85	1,48