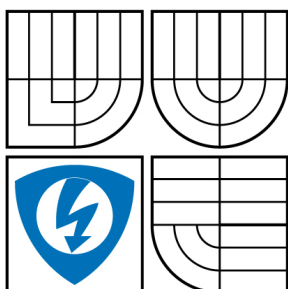




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

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

VYUŽITÍ PROGRAMU ANSYS WORKBENCH V SILNOPROUDÉ ELEKTROTECHNICE

UTILIZATION OF ANSYS WORKBENCH PROGRAM AT POWER ELECTRICAL ENGINEERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. TOMÁŠ PARTL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Dr. Ing. HANA KUCHYŇKOVÁ

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Tomáš Partl

ID: 80510

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Využití programu ANSYS Workbench v silnoproudé elektrotechnice

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište tvorbu elektronických databází výkresů.
2. Provedte analýzu vlastností přístrojového transformátoru proudu v nadproudové oblasti.
3. V programu Ansys Workbench provedte tepelný výpočet přístrojového transformátoru proudu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího práce

Termín zadání: 1.10.2008

Termín odevzdání: 22.5.2009

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce popisuje ve své první části tvorbu elektronických databází výkresů v programu Raster Design 2009, jako výhodnou formu uchování pouze papírové dokumentace. Ve druhé části diplomové práce jsou provedeny výpočty oteplení primárního a sekundárního vinutí přístrojového transformátoru proudu vlivem průchodů nadproudů těmito vinutími a vliv na ostatní části transformátoru, jako je např. chyba transformátoru nebo zvyšující se magnetická indukce jádra a další. Poslední, třetí, část práce je zaměřena na využití programu ANSYS Workbench v silnoproudé elektrotechnice. V práci je ukázán konkrétní příklad výpočtu oteplení přístrojového transformátoru proudu (teplotní analýza) a porovnání výsledků s teoretickými (vypočtenými) hodnotami.

Abstract

In its first part this Master's thesis describes creation of electronic database design in Raster Design 2009 program as an effective form of storage only for paper documentation. The second part of my thesis provides calculation of primary and secondary winding of current instrument transformer of over-current conduit through the winding and influence on other parts of transformer i.e. error of transformer or increasing magnetic induction core and others. The last third part is focusing on usage of ANSYS Workbench in power electrical engineering. The thesis shows specific example of warming of current instrument transformer (thermal analysis) and comparing the results with theoretical (calculated) values.

Klíčová slova

Rastrový obrázek, vložení, transformátor, MKP, teplotní analýza, Workbench, Menu, dialogové okno, diagram, model, simulace

Keywords

Raster image, insertion, transformer, FEM, thermal analysis, Workbench, Menu, dialogue's window, diagram, model, simulation

Bibliografická citace

Partl, T. *Využití programu ANSYS Workbench v silnoproudé elektrotechnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 61s. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Využití programu ANSYS Workbench v silnoproudé elektrotechnice“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

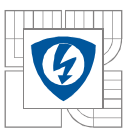
Podpis autora.....

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Dr. Ing. Haně Kuchyňkové, Ing. Jaromíru Vaňkovi, CSc. a Ing. Marcelovi Jandovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

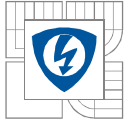
V Brně dne

Podpis autora.....



OBSAH

1. ÚVOD	7
2. TVORBA ELEKTRONICKÝCH DATABÁZÍ VÝKRESŮ	8
2.1. ÚVODEM K PROGRAMU RASTER DESIGN 2009	8
2.2. ZÁKLADNÍ PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ	8
2.3. VLOŽENÍ RASTROVÝCH OBRÁZKŮ	10
2.4. OPRAVENÍ VÝCHOZÍHO ZEŠIKMENÍ OBRÁZKU	11
2.5. ODSTRANĚNÍ SKVRN	12
2.6. ÚPRAVY VLOŽENÝCH OBRÁZKŮ	12
2.6.1. Ořež, zaobli	12
2.6.2. Úpravy tloušťky linií	13
2.7. VEKTORIZACE	14
2.7.1. Nastavení výchozích parametrů pro vektorizaci	14
2.7.2. Převedení rastrové kružnice nebo čáry na vektory	15
2.7.3. Vektorizace textu	16
3. ANALÝZA VLASTNOSTÍ PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU PROUDU V NADPROUDOVÉ OBLASTI	19
3.1. PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU	19
3.1.1. Rozdělení přístrojových transformátorů proudu	19
3.1.2. Základní typy přístrojových transformátorů	20
3.2. FUNKCE PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU PROUDU	22
3.2.1. Chyby transformátoru proudu	23
3.2.2. Závislost chyb na jednotlivých veličinách	25
3.2.3. Úprava chyb – závitová korekce	25
3.2.4. Transformátor proudu v nadproudové oblasti	26
3.2.4 Transformátor proudu při zkratech	27
3.2.5 Izolace přístrojových transformátorů proudu	28
3.3. OTEPLENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ	28
3.3.1 Oteplení transformátoru proudu při $I_n=10-120\%$	28
3.4. OTEPLENÍ PROUDOVÉHO TRANSFORMÁTORU	29
3.4.1 Výpočet oteplení primárního vodiče proudového transformátoru	29
3.4.2 Výpočet chyb a magnetické indukce	34
3.4.3 Ztráty v magnetickém obvodu a v sekundárním vinutí	40
4. ANSYS WORKBENCH	42
4.1.CO JE ANSYS WORKBENCH	42
4.2. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ - MKP	43
4.3. SPOLUPRÁCE INVENTORU A ANSYS WORKBENCH	44
4.4. TEPLTNÍ ANALÝZA PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU PROUDU	44
4.4.1. Import do programu ANSYS Workbench	44
4.4.2. Nastavení simulace	47
4.4.3. Výsledek teplotní analýzy	52
5. ZÁVĚR	59
5.1. SHRNUTÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	59
5.2. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	61



1. ÚVOD

Výkresová dokumentace je nedílnou součástí každého výrobku, případně součástí celých sestav nebo zařízení. Vzhledem k vývoji softwarů v oblasti tvorby dokumentací je v několika posledních desítkách let téměř vytlačena dokumentace vytvářena „na rýsovacím prkně“ dokumentací vytvářenou výhradně pomocí moderních programů, a to jak pro tvorbu výkresové dokumentace, tak i pro tvorbu modelů. V některých případech je ale žádoucí, a někdy i nutné, vycházet z výkresů, které byly vytvořeny bez počítačových programů. Z těchto důvodů jsou vyvíjeny programy, zabývající se převáděním papírových výkresů do elektronické podoby. Jedním z těchto moderních programů je Raster Design 2009 od společnosti Autodesk.

V celém rozsahu elektrických strojů a přístrojů je několik parametrů, kterým je věnována pozornost jak při návrhu, tak při provozu. Mohou to být např. dynamické nebo tepelné vlastnosti. V této práci bude podroben analýze přístrojový transformátor proudu v nadproudové oblasti. Bude sledována celková chyba, zvyšující se hodnota magnetické indukce a také oteplování transformátoru při průchodu nadproudů primárním a sekundárním vinutím.

Pro teplotní analýzu pomocí moderního softwarového programu bude použit ANSYS Workbench. Tento program pracuje na principu metody konečných prvků (MKP) a lze jej použít i pro výpočty pevnosti, dynamiky atd. Je zde uveden základní popis prostředí a práce v tomto prostředí, včetně možnosti spolupráce programů Autodesk Inventor a ANSYS Workbench. Pro provedení teplotní analýzy přístrojového transformátoru proudu bude použit model vytvořený v Inventoru a do Workbench bude následně importován. Výsledné hodnoty budou porovnány s vypočtenými hodnotami vynesemím do grafů.

2. Tvorba elektronických databází výkresů

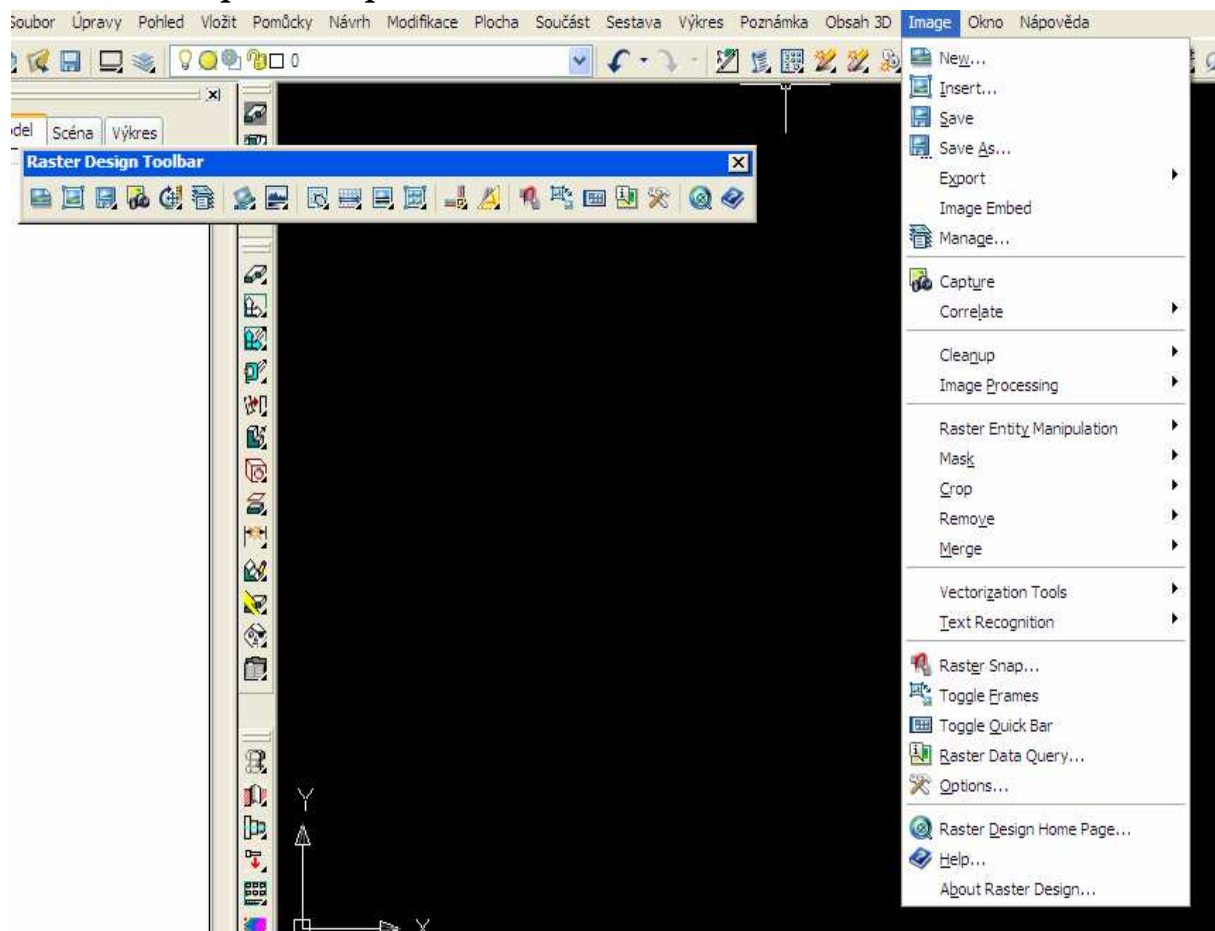
2.1. Úvodem k programu Raster Design 2009

Program Autodesk Raster Design je program, který slouží pro převod skenovaných obrázků. Zahrnuje v sobě správu a editování všech typů rastrových obrázků na základě softwaru AutoCAD, případně dalších produktech založených na programech CAD. Raster Design v sobě zahrnuje poloautomatické vektorizační nástroje, které převádí rastrové informace do vektorové podoby. Převádět lze jak grafiku, tak i text.

Program Raster Design pracuje s rastrovými soubory typu například .bmp, .gif, .jpg a další. Jako podklad lze použít jakýkoliv obrázek. Mohou to být bitonální, kde je pouze černá a bílá, mohou to být různé odstíny šedi, dále například indexovaná barva, to znamená pevně daná paleta, kde je určitá sada barev, která je ale limitovaná. Mohou to být ale také obrázky truecolor, tedy 16,7 milionů barev, také je možnost zpracování multispektrálních snímků, například satelitní snímky apod.

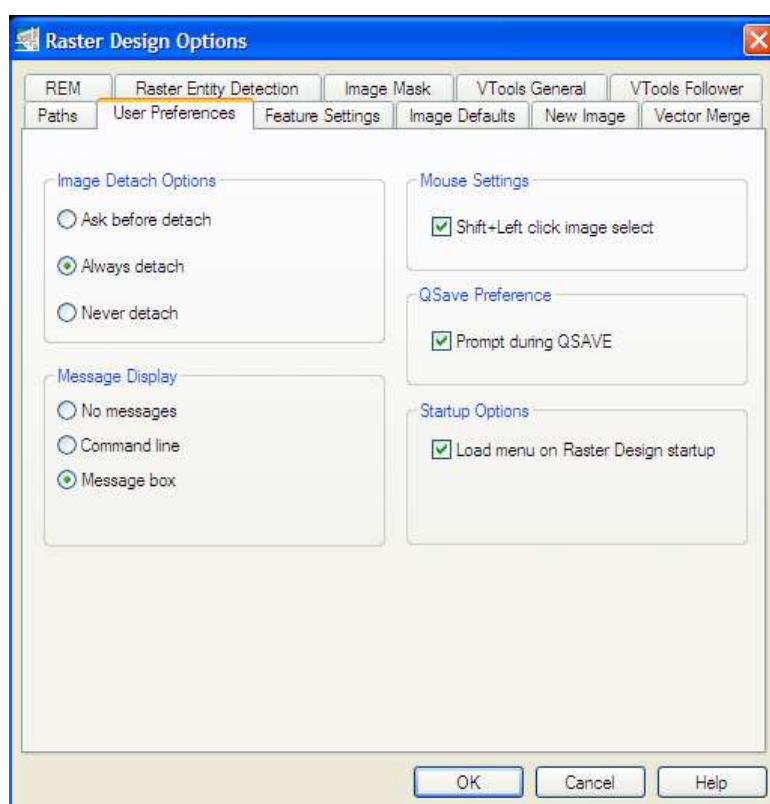
Pro práci s rastrovým obrázkem je důležité, v jaké kvalitě je skenován, protože při špatné kvalitě skenovaného výkresu je problém např. při kontrastním rozpoznání černých nebo bílých linií nebo objektů.

2.2. Základní pracovní prostředí



Obr. 1: Roletové Menu a Toolbar Raster Designu

Nainstalováním programu Raster Design do aplikace AutoCAD přibude do menu nová roleta *IMAGE*, viz obr. 1. Pro další práci je rovněž možné používat panel nástrojů *Raster Designu*. Při pohledu na roletové menu je zřejmé, že první sekce nabídky je standardní u většiny programů. Je zde možnost volby otevření nového obrázku, pokud není již nějaký podklad (*New..*), vložení nového rastrového obrázku (*Insert..*), uložení (*Save*) a uložení jako (*Save As...*). Tyto dvě volby přímo ovlivňují zpět rastrové obrázky. To znamená, že jestliže jsou tyto obrázky jsou načteny, je možné v nich provádět úpravy až do chvíle, než je provedeno *Save* nebo *Save as*. Volbou *Save* dojde k aktualizaci podkladového rastrového obrázku a původní obrázek je přepsán. Volbou *Save as* je možné ponechat původní podklad a tento upravený rastrový obrázek si uložit pro další práci pod jiným názvem nebo označením např. verze 2. Ostatní volby budou probrány v dalším textu při podrobnějším popisu. Základní nastavení programu se nastavuje ve volbě *Options*, zobrazené na obr. 2.



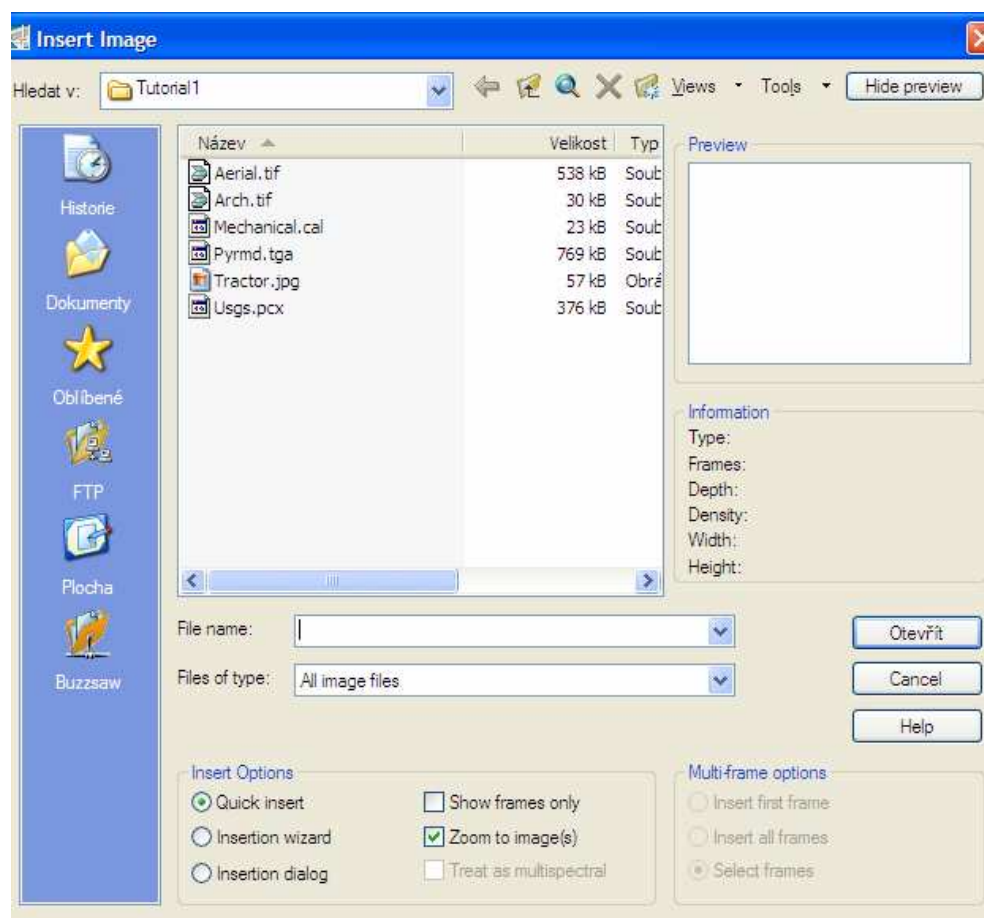
Obr. 2: Volba *Options* pro základní nastavení programu

Tady jsou možnosti nastavení chování se aplikací jako takové. Například v záložce *User Preferences* se nastavuje, jakým způsobem se Raster Design chová při práci s obrázky. To znamená, že pokud například bude obrázek smazán, je možnost si nastavit jakým způsobem se jeho napojení DWG na výkres zachovává nebo ne. Volba *Always detach* znamená nechat vždy odpojit. Vhodná funkce, která zpříjemňuje práci s rastry je nastavení volby *Mouse Settings*. Zde je ponechána volba *Shift* a levé tlačítko, což umožňuje potom vypnout „jakoby“ orámování rastrových obrázků. Pokud se například v AutoCADu vkládají rastrové obrázky a následně se s nimi pracuje, je nutné vždy kliknout na obvodovou linii a jedině tím způsobem rastr vybrat. V *Raster designu* může být linie vypnuta a pak stačí uvnitř kteréhokoliv z obrázků kliknout tak, že je držena klávesa *Shift*, klikne se levým tlačítkem a pak je objekt vybrán. To znamená, že pokud je konstruktér hodně blízko, vůbec nevidí v tu danou chvíli okraj, stačí přidržit *Shift* a kliknout levým tlačítkem a výběr

je proveden. V záložce *Paths* je nastavena prioritní cesta pro otvírání a ukládání, v záložce *New Image* jsou nastavena výchozí nastavení pro nově vkládaný obrázek, jako jsou délka a šířka obrázku a výchozí barevný typ – bitonální (černá-bílá), odstíny šedi, případně plně barevný podklad. V záložce REM (*Raster Entity Manipulation*) je volba barvy grafiky nebo textu po provedení úprav.

2.3. Vložení rastrových obrázků

Vkládání nového rastrového obrázku do výkresu se provede volbou *Insert* v menu *Image*, kdy je následně otevřeno dialogové okno znázorněné na Obr. 3.



Obr. 3: Dialogové okno pro vložení rastrového obrázku

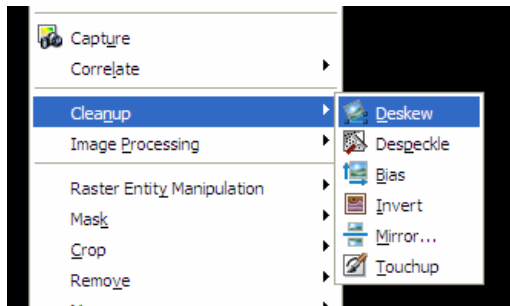
Při vkládání nového obrázku do výkresu je důležitá volba vložení v *Insert Options*. Jsou zde tři možnosti vložení: Rychlé vložení (*Quick insert*), Vložení s průvodcem (*Insertion wizard*) a Vložení s dialogovým oknem (*Insertion dialog*).

Volba *Quick insert* vloží obrázek bez zadávání dalších vstupních údajů. Pokud jsou potřebná další korelační data (korelační data určují výsledné umístění obrázku v rámci výkresu, jeho natočení a použité měřítko), jsou převzata z rastrového souboru obrázku, zvláštního souboru nebo jsou použity implicitní hodnoty. Při volbě *Insertion wizard* je použit průvodce, který projde s uživatelem celý proces vložení krok za krokem a vytvoří tak veškerá potřebná vstupní data. Poslední možností vložení rastrového obrázku je *Insertion dialog*, kdy je obrázek vložen po schválení výchozích korelačních údajů. Tento způsob vložení je podobný metodě *Insertion wizard*, ale bez použití postupného dotazování. Údaje je možné upravovat v libovolném pořadí v rámci záložek dialogového okna.

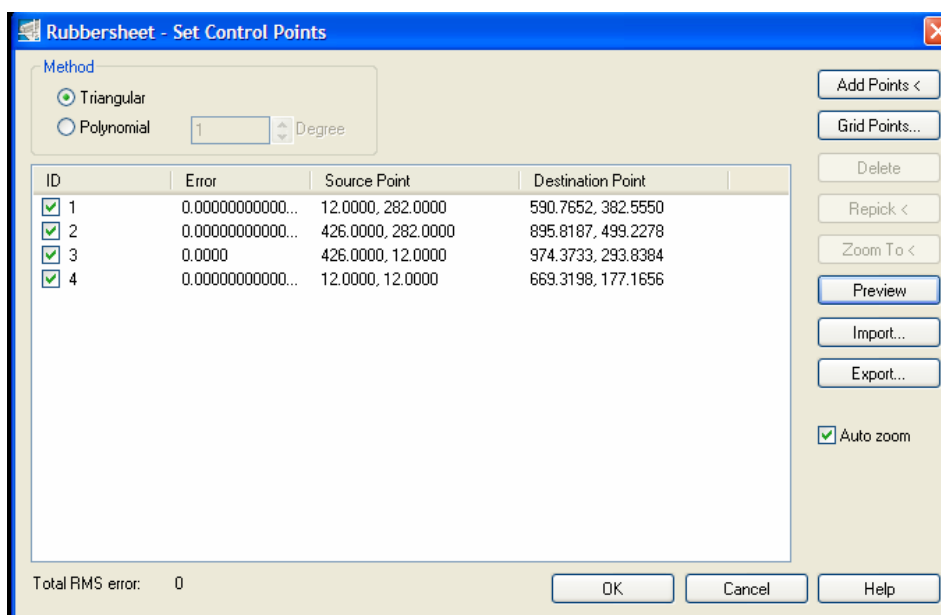
Volba *Show frames only* určuje, jestli se zobrazí pouze obvodový rámeček vkládaného obrázku, volba *Zoom to image(s)* po provedení korelace zazoomuje na rozsah vkládaných obrázků a volba *Treat as multispectral* je aktivní při vkládání více obrázků a prověřuje, jestli je u všech shodný souborový formát, souřadný systém, rozsah a jednotky.

2.4. Opravení výchozího zešikmení obrázku

Velmi častá je situace, že skenovaný podklad je zešikmený, proto je nutno jej narovnat. Narovnání zešikmení obrázků se řeší pomocí funkce *Deskew*.



Volba *Deskew* je přístupná v záložce *Image* ve volbě *Cleanup*. Vybere se výchozí bod, např. kliknutím na počátek. Určí se výchozí úhel buďto numericky, nebo vůči např. pravému dolnímu rohu a volba se potvrdí. Tímto způsobem je možné rastrové natočení celého vloženého obrázku. Tato možnost je jednoduchá, složitější možnost je pomocí funkce *Rubbersheet*, která umí i vícebodovou transformaci. Pokud se použije tato funkce, nakreslí se vedle vloženého obrázku vektorová kresba, která má být s tímto obrázkem ztotožněna. Nakreslí se např. pomocí nástrojů AutoCADu obdélník, ten se natočí a rastr bude následně do tohoto obdélníku přesunut. Transformovat lze jak vektor na rastr, tak rastr na vektor. V menu *Image* se zvolí *Correlate* a funkce *Rubbersheet*. Objeví se dialogové okno znázorněné na Obr.4.

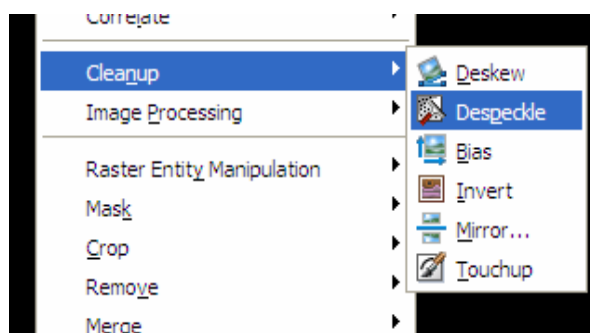


Obr. 4: Dialogové okno funkce *Rubbersheet*

Funkce *Rubbersheet* má 2 základní metody. Přímá lineární interpolace je metoda *Triangular*. 4 rohové body obrázku budou přesunuty do natočeného obdélníku. Postupně se určí první bod ve zdrojovém obrázku (vložený rastrový obrázek) a první cílový bod a takto se určí postupně všechny čtyři body (v případě přesunutí do n-úhelníku určení všech bodů). Zjednodušeně lze říci, že zdrojové body jsou postupně „přetahovány“ do cílových bodů. Je nutno dávat pozor, aby se např. při přesouvání levého rohu skončilo opět v levém rohu. Výsledné změna se potvrdí stiskem tlačítka *Enter*. Před potvrzením změny je možno si zobrazit náhled provedených úprav tlačítkem *Preview*.

2.5. Odstranění skvrn

Problémem při skenování obrázků bývají různé typy skvrn. Pro odstranění skvrn je možno použít funkce *Despeckle*,



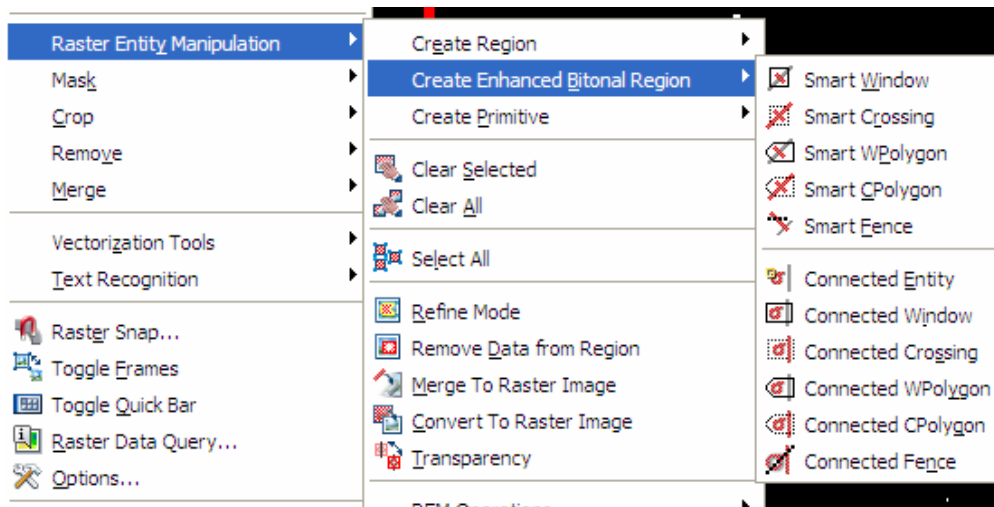
kteřá je dostupná z menu *Image* ve volbě *Cleanup – Despeckle*. Následně je důležité sledovat příkazový řádek a zadávat parametry pro provedení čištění obrázku. Buď je možné si vymezit jen určitou část obrázku, nebo provést vyčištění pro celý rastr. Např. se provede výběr oblasti čištění například oknem, zvolí se P jako výběr skvrny, kliknutím na konkrétní skvrnu se určí velikost, do které budou skvrny vymazány. Kliknutím na tuto skvrnu se zvýrazní všechny vybrané skvrny a volbou *Enter* se provede vymazání vybraných skvrn.

2.6. Úpravy vložených obrázků

Použitím nástrojů funkce REM (*Raster Entity Manipulation*) je možné definovat rastrové objekty a manipulovat s nimi obdobně jako u vektorových objektů v AutoCADu. Je možné je například oříznout, prodloužit, zaoblit atd.

2.6.1. Ořez, zaobli

Pomocí funkce REM je možné modifikovat rastry. Jsou 3 základní režimy výběrů REM entit. První je jednoduchá typu *Region*, např. výběrovým oknem - vybere se přesná oblast. Druhá možnost je typu *Enhanced bitonal region*.



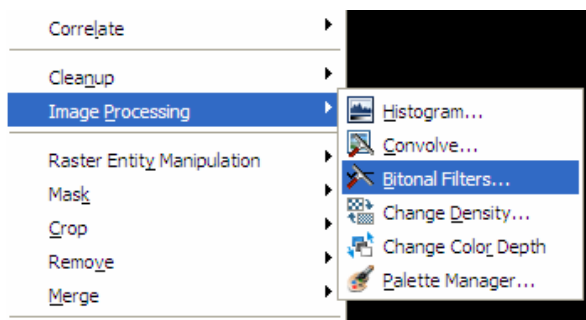
Vybere se např. obdélník s tím, že jsou 2 základní režimy. Režim *Smart* nebo režim *Connected*. V režimu *Smart* se zahrne vše, co je tam úplně zahrnuto. Oproti tomu *Connected* udělá to, že vybírá entity, které jsou zahrnuty třeba jen svojí částí. U funkce *Connected* není rozlišováno, jestli je entita linie nebo kružnice. Do výběru je zahrnuto vše, co je nějakým způsobem propojeno. Další režim je režim *Primitive*, který si sám analyzuje už určité objekty. Buď je zvolen režim, kdy je ponechán odhad, o jaký objekt se jedná, a pouze jsou označovány jednotlivé prvky a režim sám odhaduje, jestli je to křivka, kružnice, úsečka a sám volí tyto cílové prvky. Nebo je to režim vytváření primitiv s tím, že jsou vybírány volby vytvoření kružnice nebo křivky a jsou označovány rastry. S takto označenými rastry je možné pracovat podobně jako v AutoCADu, tedy je možnost kopírování, posouvání, ořezání, zaoblení atd.

Příklad oříznutí čar. Postupnou volbou *Image*→*Raster Entity Manipulation*→*Create Primitive*→*Line* se vybere kliknutím myši čára, která bude oříznuta. Pokud bude ořezáno více čar, opětným stiskem klávesy *Enter* bude zopakován příkaz výběru čáry pro ořezání. Dále se vybere hrana pro ořezání postupnou volbou z roletového menu *Image*→*Raster Entity Manipulation*→*Create Primitive*→*Line*. Po vybrání hrany pro ořezání se příkaz ukončí klávesou *Enter*. Následně se označí ty segmenty čar, které mají být odstraněny a stiskem *Enter* bude ořezání provedeno. Následně jsou pomocí funkce *Merge To Raster Image* převedeny zvolené REM čáry zpět na rastrová data.

Zaoblení se provede tak, že se postupnou volbou *Image*→*Raster Entity Manipulation*→*Create Primitive*→*Line* vybere kliknutím myši první čára, která směřuje k budoucímu zaoblení. Klávesou *Enter* se příkaz zopakuje a vybere se druhá čára směřující k rohovému zaoblení. V dalším postupu bude provedena volba z roletového menu *Image*→*Raster Entity Manipulation*→*REM Operations*→*Fillet*. Volbou „r“ se provede zadání poloměru zaoblení a tato hodnota může být zadána numericky nebo graficky. Kliknutím myši na jednu a následně druhou linii dojde k vytvoření zaoblení. Pomocí funkce *Merge To Raster Image* budou stejně jako při ořezání převedeny zvolené REM čáry zpět na rastrová data.

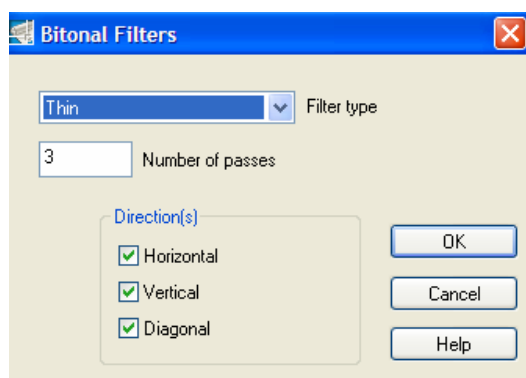
2.6.2. Úpravy tloušťky linií

Rastr od vektoru se již pozná tím, že rastrové čáry jsou kostrbaté, zatímco vektorové čáry jsou čistě vyhlazené. Pro úpravu tloušťky čáry lze využít funkce *Image Processing* → *Bitonal Filtres*.



Obr. 5a: Otevírání funkce *Bitonal Filters*

Provede se vybrání oblasti, kde je požadavek na úpravy například tloušťky čar. U funkce ztenčení se určí počet průchodů, na kolik se bude provádět, tedy o kolik pixelů se bude ztenčovat. Čím více, tím bude ztenčení větší. Možné je také zvolit, jestli se tyto úpravy budou provádět např. pouze na horizontálních nebo pouze na vertikálních liniích nebo na všech (viz Obr. 5).



Obr. 5b: Dialogové okno funkce *Bitonal Filters* s volbou ztenčení

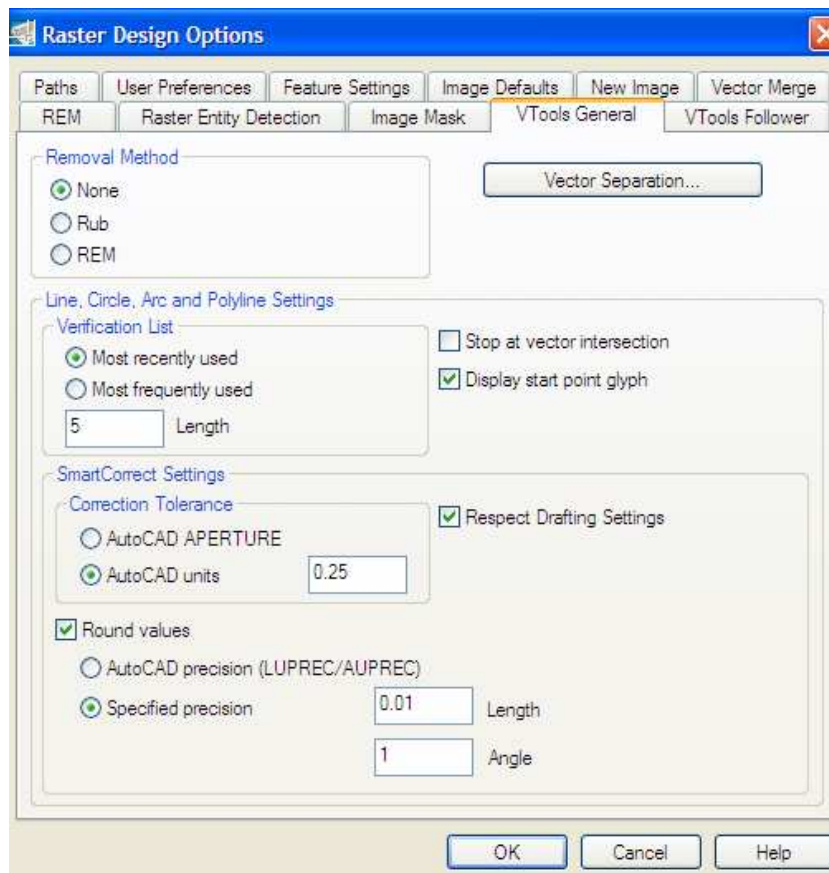
Pokud je požadavek na ztenčení celé vybrané části, bude provedena volba pro všechno a volba se potvrdí stiskem OK.

2.7. Vektorizace

2.7.1. Nastavení výchozích parametrů pro vektorizaci

Pro vektorizaci se nastavují výchozí parametry v *Options* v menu *Image*. Nastavení vektorizace je v *Options* v záložkách *VTools General*, *VTools Follower* a *Raster Entity Detection*.

V dialogovém okně *Raster Design Options* (obr. 6) se nastaví záložka *VTools General*. V části tvorby vektorových entit *Removal Method* je možnost výběru tří režimů – režim *None*, kdy zůstává zachován výchozí rastr a pouze nad ním se tvoří vektorová entita. Dalším režimem je možnost *Rub*, která vektorizovanou entitu podobně jako možnost *REM* maže ve výchozím rastru s tím rozdílem, že analyzuje vzájemné křížení – odhadne, kdy je nebo není vhodné danou linii přerušovat při křížení. Dále je v této záložce možnost nastavení zaokrouhlování (*Correction Tolerance*), pokud se vektorizuje např. technický výkres.



Obr. 6: Dialogové okno *Options* pro nastavení vektorizace

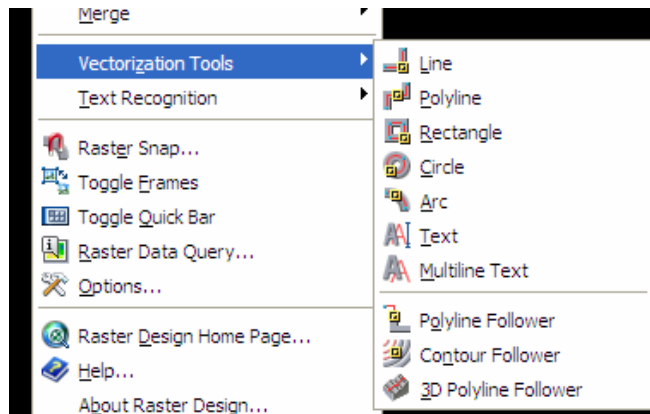
Postup je takový, že se nejprve nakreslí pomocný objekt (např. obdélník apod.), kterému je vektorově zadána přesná konkrétní velikost a rastr je následně nastaven na vektor a tím je nastaveno, že bude odměřováno správně. Metoda odstraňování (*Removal Method*) je standardně nastavena na *REM*, která zachovává při křížení pár pixelů v křížení.

V záložce *VTools Follower* je vhodné zatrhnout volbu *End Current Polyline If Closed Loop Detected*, která způsobí, že nové vektorové entity budou ukončeny, pokud narazí na uzavřenou hranici nebo smyčku.

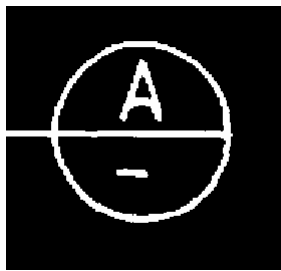
V záložce *Raster Entity Detection* se nastaví v *Single Pick Options* požadovaná hodnota pro *Max Jump Length (pixels)*. Toto nastavení určuje maximální délku mezery v pixelech, kterou bude Raster Design tolerovat během sledování rastrové křivky. Tuto volbu lze použít pro přeskočení přes text (popisy) vložené do linií nebo pro sledování nesouvislých linií jako např. čárkovaná čára.

2.7.2. Převedení rastrové kružnice nebo čáry na vektory

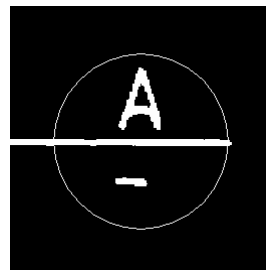
Pro převedení rastrové kružnice na vektorovou se použije příkaz *Circle* postupnou volbou *Image* → *Vectorization Tools* → *Circle*.



Po volbě *Circle* se klikne na bod kdekoliv na kružnici. Následně se zadá např. volba „r“ pro možnost určení požadovaného poloměru (případně „d“ pro průměr nebo „c“ pro střed kružnice), zadá se numericky požadovaný poloměr a dvakrát stisknutím tl. *Enter* se dokončí vektorizace kružnice. Příklad je na **obr. 7**.



a)



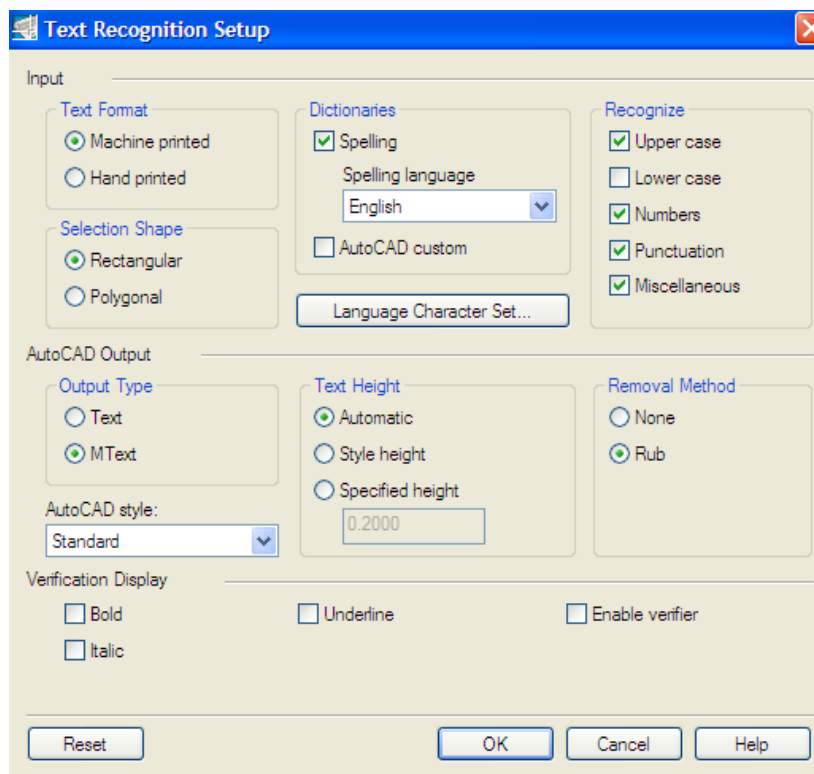
b)

Obr. 7: a) Kružnice před vektorizací, b) kružnice po vektorizaci

Převedení rastrové čáry na vektor je obdobné vektorizaci kružnice, pouze ve složce *Vectorization Tools* se volí *Line*. Následně je možnost volby např. „2p“ pro kreslení čáry na základě výběru dvou bodů. Zvolí se postupně první a následně druhý bod a stiskem *Enter* se provede potvrzení. Pokud je požadavek na úpravu délky, nebo úhlu natočení čáry, po určení obou bodů čáry se zadá „l“ pro změnu délky, nebo „a“ pro změnu úhlu a zadáním konkrétního čísla se požadovaná úprava po stisku po potvrzení provede.

2.7.3. Vektorizace textu

Rastrový text je možné převést na jednořádkový nebo víceřádkový (MText). Před samotnou vektorizací je vhodné nastavení provádění vektorizace v *Recognize Setup* ve složce *Image* → *Text Recognition*.



Obr. 8: Dialogové okno pro nastavení vektorizace textu

V *Text Format* se volí, jestli je text psaný rukou nebo strojem, volí se způsob výběru textu obdélníkem nebo polygonem. Další možností je volba výstupu jedno- nebo víceřádkového textu, styl textu se volí podle stylu textu v AutoCADu, provede se volba jazyka. Další možností volby je, jaké prvky se v daném textu objevují, to znamená, že pokud v textu nejsou např. speciální znaky, vypne se volba rozpoznávání speciálních znaků. Pokud je text psaný pouze velkými písmeny, zatrhne se volba *Upper case* a vypne se *Lower case*. Stejným způsobem se označí nebo odznačí volba *Numbers*, *Punctuation* nebo *Miscellaneous*. Výšku textu je možné řídit podle podkladu automaticky nebo podle předdefinovaného textu např. v AutoCADu. Opět je tady možnost nastavení ponechání si výchozího podkladu nebo vymazání volbou *None* nebo *Rub* a ve spodní části dialogového okna je možné ovlivnit průběh kontroly zobrazení pravopisu, kdy je uživatel upozorňován na slova, která nemá ve slovníku a jakým způsobem jsou zobrazována, a zároveň se tím volí typ znaků - tučné, kurzíva atd.

Po nastavení parametrů pro vektorizaci textu se vybere text (nebo jen část textu), který má být převeden na vektor. Postupně volbou *Image*→*Text Recognition*→*Recognize Text* se provede spuštěním příkazu výběr textu například natažením obdélníku, který označí oblast výběru. Zapnutím volby *Verify Text* jsou porovnávána slova ze zdroje se známými slovy v databázi. Pokud by nedošlo k volbě *Verify Text*, byl by text přeložen bez náhledu na upravený text, a tedy nebyla by možná korekce. Pokud je tato volba zapnuta, otevře se po vybrání textu dialogové okno zobrazené na obr. 10.

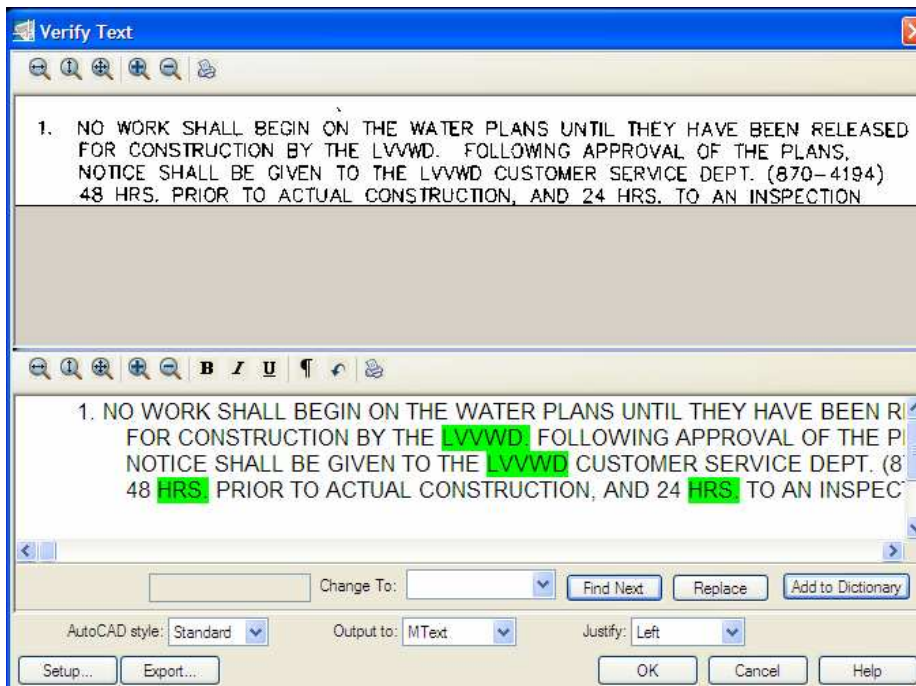
1. NO WORK SHALL BEGIN ON THE WATER PLANS UNTIL FOR CONSTRUCTION BY THE LVVWD. FOLLOWING APPROVAL OF THE PLANS, NOTICE SHALL BE GIVEN TO THE LVVWD CUSTOMER SERVICE DEPT. (870-4194) 48 HRS. PRIOR TO ACTUAL CONSTRUCTION, AND 24 HRS. TO AN INSPECTION

2. CALL BEFORE YOU DIG 1-800-227-2600.

3. ALL WORK SHALL CONFORM TO LVVWD LATEST STANDARDS AND SPECIFICATIONS.

4. ALL WORK, EXCEPT AS MODIFIED HEREON OR BY NOTIFICATION, SHALL BE IN ACCORDANCE WITH THE CURRENT DRAFT OF ADDITION OF THE UNIFORM STANDARDS

Obr. 9: Rastrový text – před provedením vektorizace



Obr. 10: Dialogové okno pro porovnání slov

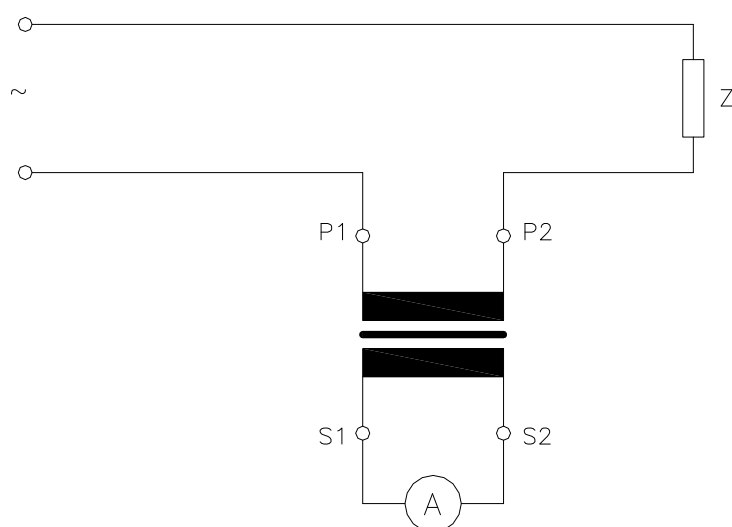
Jestliže jsou v textu neznámá slova, jsou zvýrazněna ve spodní části (text označený zeleně). Tato slova je možné buď upravit v případě, že podkladový text byl špatně čitelný a došlo k chybnému překladu, případně pokud je toto slovo nové a není uvedeno ve slovníku, volbou *Add to Dictionary* je možné takto konkrétní výraz přidat do slovníku, aby příště již nebyly tyto výrazy zobrazeny (označeny). V tomto dialogovém okně je možnost opět volby stylu převedeného textu podle stylu v AutoCADu, zarovnání a volby jednořádkového textu nebo MTextu. Výsledný převedený text je znázorněn na obr. 11.

1. NO WORK SHALL BEGIN ON THE WATER PLANS UNTIL THEY HAVE BEEN RELEASED FOR CONSTRUCTION BY THE LVVWD. FOLLOWING APPROVAL OF THE PLANS, NOTICE SHALL BE GIVEN TO THE LVVWD CUSTOMER SERVICE DEPT. (870-4194) 48 HRS. PRIOR TO ACTUAL CONSTRUCTION, AND 24 HRS. TO AN INSPECTION

Obr. 11: Výsledný převedený text

3. Analýza vlastností přístrojového transformátoru proudu v nadproudové oblasti

Přístrojové transformátory jsou jedny z několika druhů transformátorů. Přístrojové transformátory proudu transformují hodnoty proudů na standardní hodnoty vhodné pro napájení proudových cívek měřicích nebo jisticích přístrojů. Oddělují také obvod vn od obvodu nn a vzdalují měřicí a jisticí přístroje z dosahu působení silných magnetických a elektrických polí proudových obvodů a vylučují tak jejich nepříznivé ovlivňování správné funkce. Použití přístrojových transformátorů také dává možnost soustředit všechny měřicí a jisticí přístroje na jednom pracovišti (v dozornách, na řídicích velínech apod.) a tím usnadnit obsluhu řízení a sledování celého rozvodu elektrické sítě.



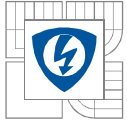
Obr. 12: Přístrojový transformátor proudu zapojený v obvodu zátěže

3.1. Přístrojové transformátory proudu

3.1.1. Rozdělení přístrojových transformátorů proudu

Přístrojové transformátory proudu se rozdělují podle několika kritérií

- I. Podle umístění
 - transformátory pro vnitřní montáž
 - transformátory pro vnější montáž
- II. Podle tvaru a umístění primárních vývodů
 - transformátory podpěrné
 - transformátory průchodkové
 - transformátory průvlekové



III. Podle primárního vinutí

- jednozávitové
- závitové
- smyčkové
- tyčové
- násuvné
- prstencové

IV. Podle jiných hledisek

- jednojádrové
- vícejádrové
- s rozebíratelným magnetickým obvodem
- s několika sekundárními výstupy
- kaskádové
- sčítací

3.1.2. Základní typy přístrojových transformátorů

Transformátory proudu je možné rozdělit podle primárního vinutí, a to na jednozávitové (primární vodič prochází magnetickým obvodem pouze jednou) a závitové (závitové tolikrát, kolik má primární vinutí závitů).

a) Jednozávitový transformátor proudu – podpěrný

Tento transformátor má primární svorky na temeni izolačního tělesa a spodní část má uchycenu k uzemněnému rámu nebo nádobě. Tento transformátor může plnit i funkci podpěry.

b) Jednozávitový transformátor proudu – tyčový

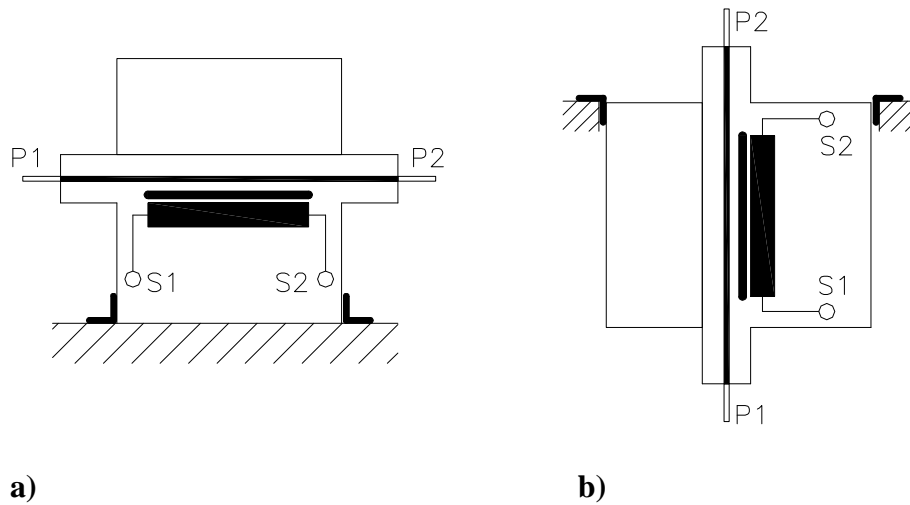
U tohoto transformátoru je primární vodič tvořen vodičem ve tvaru tyče nebo pásu. U vysokonapěťových transformátorů je jeho izolace provedena jako průchodková. Transformátor je pak řešen jako průchozí nebo průchodkový, kdy současně plní funkci průchodky.

c) Jednozávitový transformátor proudu – násuvný

Násuvný transformátor nemá vestavěný primární vodič. Vlastní transformátor tvoří magnetický obvod se sekundárním vinutím a izolační předěl. Při montáži se nasouvá na přípojnicí nebo na průchodku – vyrábí se jako průchozí nebo průchodkový.

d) Jednozávitový transformátor proudu – prstencový

Tento transformátor má magnetický obvod ve tvaru prstence, na němž je sekundární vinutí rovnoměrně rozloženo po celém obvodu. Tento transformátor nemá vestavěný primární vodič a používá se jako násuvný.



Obr. 13: Tyčový transformátor proudu a) průchozí, b) průchodkový

e) Závitový transformátor proudu – podpěrný

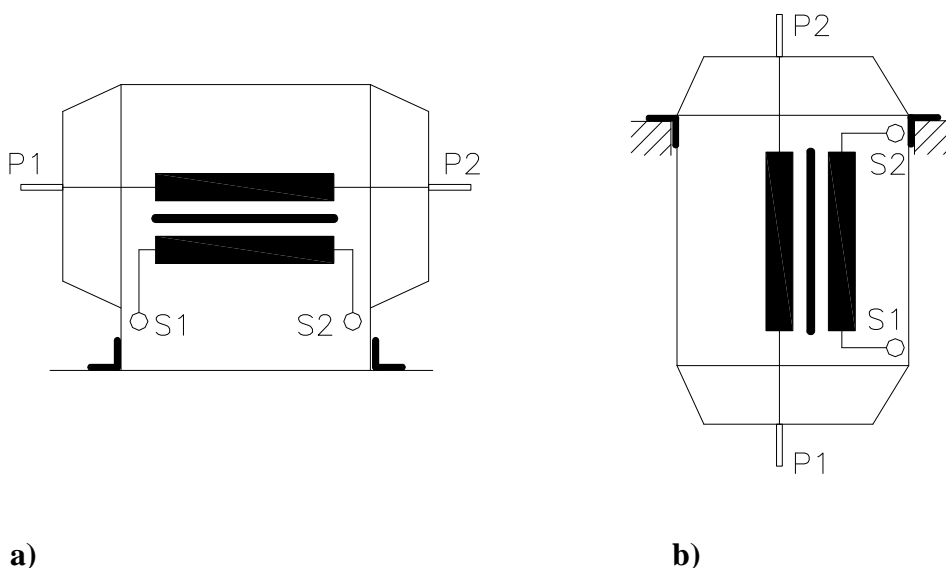
Má primární svorky na temeni izolačního tělesa a spodek je uchycen k uzemněnému rámu nebo nádobě. Na rozdíl od jednozávitového podpěrného transformátor proudu má primární vinutí provedeno s několika závity.

f) Závitový transformátor proudu – průchozí

Tento transformátor má primární svorky na opačných stranách podélného izolačního tělesa. Uprostřed je uzemněný rám, který slouží pro připevnění transformátoru na základnu.

g) Závitový transformátor proudu – průchodkový

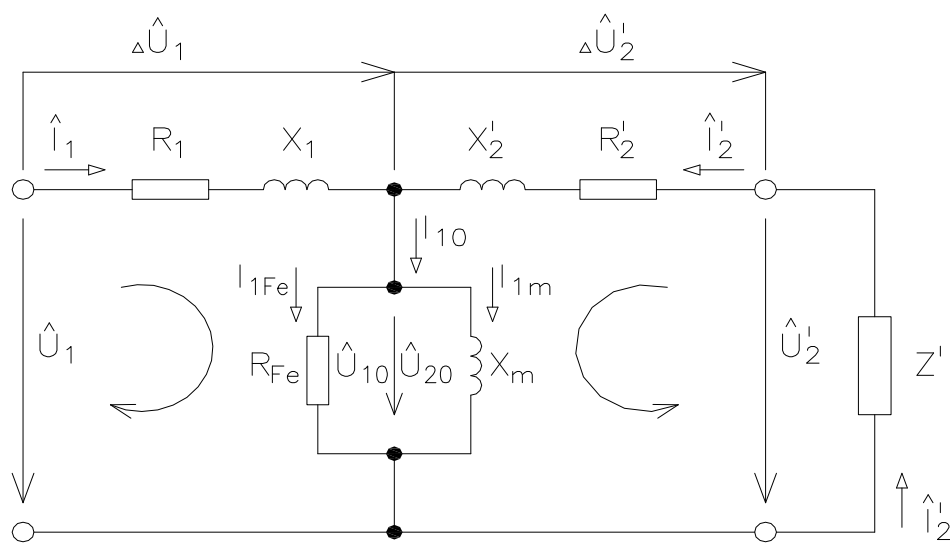
Jde ve své podstatě o transformátor průchozí, který se současně využívá jako průchodka. Od průchozího se liší umístěním patek.



Obr. 14: Závitový transformátor proudu a) průchozí, b) průchodkový

3.2. Funkce přístrojového transformátoru proudu

Transformátory proudu se používají pro napájení měřicích, jisticích a regulačních přístrojů. Primární vinutí je zapojeno do série s obvodem. Poměrem počtu závitů primárního vinutí N_1 a sekundárního vinutí N_2 je dán (při zanedbání chyby) poměr primárního proudu I_1 a sekundárního proudu I_2 . Napětí obou vinutí je dáno součinem proudu a příslušných impedancí.



Obr. 15: Náhradní schéma transformátoru

Pro jednotlivé obvody z obrázku náhradního schématu platí:

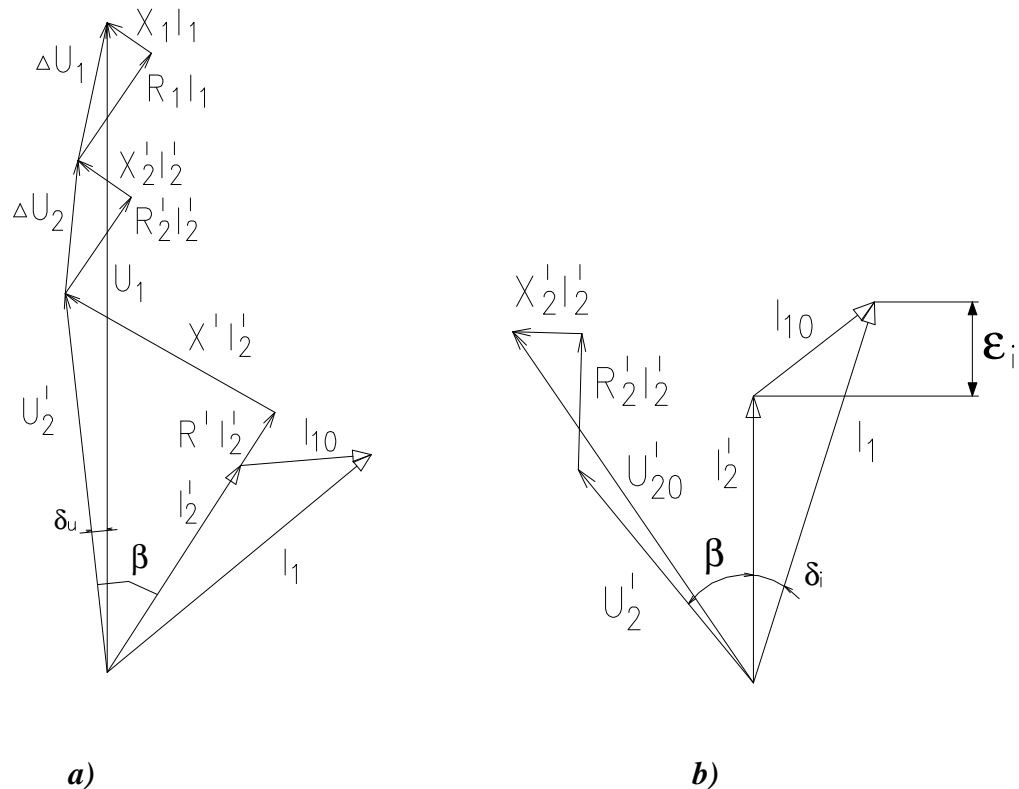
$$\hat{U}_1 = R_1 \hat{I}_1 + jX_1 \hat{I}_1 + \hat{U}_{10} \quad (1)$$

$$\hat{U}'_2 = R'_2 \hat{I}'_2 + jX'_2 \hat{I}'_2 + \hat{U}'_{20} \quad (2)$$

Úpravou rovnic (1) a (2) dostaneme výsledný vztah:

$$\hat{U}_1 = \hat{U}'_2 + (R_1 + jX_1) \hat{I}'_{10} + (R_1 + R'_2 + jX_1 + jX'_2)(-\hat{I}'_2) \quad (3)$$

Na obr. 16 je znázorněný fázorový diagram.

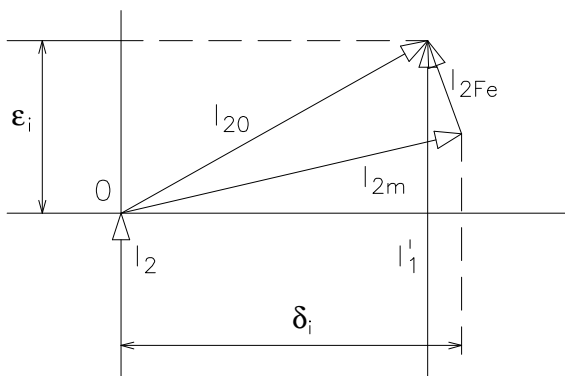


Obr. 16: Fázorový diagram a) a pootočený pro I_2' ve svislé ose b)

Z názorového diagramu je zřejmé, že celková chyba transformátoru proudu je dána fázorem proudu I_{10} , který můžeme rozložit na chybu proudu ϵ_i a chybu úhlu δ_i . Fázor I_{10} se skládá ze dvou složek – z proudu magnetizačního (I_{1m}) a proudu na krytí ztrát v železe (I_{1Fe}). U transformátoru proudu se změnou zátěže na sekundárních svorkách mění napětí U_2' a tedy i indukované napětí U_{20}' . Tomuto napětí je přímo úměrná hodnota magnetické indukce v magnetickém obvodu, které odpovídá určité magnetické napětí (budící proudění) a tím i proud I_{10} . Lze tedy konstatovat, že se zvyšující se zátěží roste proud I_{10} , tedy celková chyba. Tato závislost však není lineární.

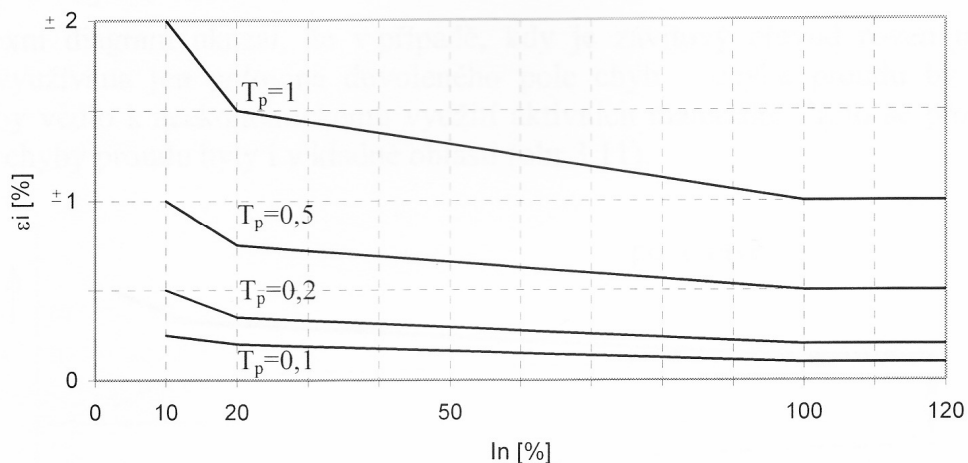
3.2.1. Chyby transformátoru proudu

Pro vyjádření chyb transformátoru uvažujeme za výchozí sekundární veličiny přepočteny na počet závitů sekundárního vinutí. Výchozím bodem pro sestavení diagramu chyb bude koncový bod fázoru proudu I_2 . Rozdíl mezi fázory I_2 a I_1' bude názorová chyba $\Delta I = I_{20}$. Tuto chybu je možné rozložit na chybu proudu ϵ_i vyjádřenou v % a chybu úhlu δ_i vyjádřenou v min. Jedná se maximálně o úhly do $120'$ a proto je možné považovat fázory I_1' a I_2 za prakticky rovnoběžné.

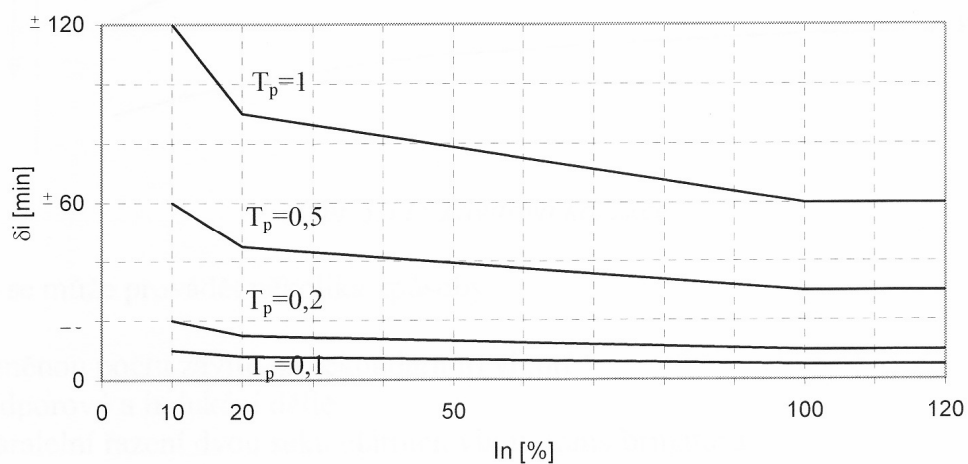


Obr. 17: Komplexní diagram chyb

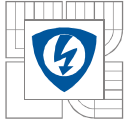
Obrázek 17 je základem komplexního diagramu chyb transformátoru proudu. Tento diagram vyjadřuje chybu proudu a současně i chybu úhlu. Hranice chyb se mění podle velikosti proudu, jak je zřejmé z obr. 18 [2] a 19 [2]. Koncové body třídy přesnosti jsou určeny pro rozmezí 0,1-1,2 I_n .



Obr. 18: Třídy přesnosti MTP - hranice chyb proudu



Obr. 19: Třídy přesnosti MTP - hranice chyb úhlu



3.2.2. Závislost chyb na jednotlivých veličinách

V následujícím textu budou uvedeny 4 závislosti na veličinách, které ovlivňují chybu.

1. Závislost na proudu

Vydeme z požadavku, že transformátor proudu musí splňovat požadavky třídy přesnosti pro proudy 0,1-1,2 I_n a z uvažování konstantního břemene na sekundárních svorkách. Při konstantním břemeni se bude se změnou proudu měnit i indukované napětí U'_{20} a tím i magnetická indukce, které odpovídá určitá velikost proudu I_{20} . Z magnetizační charakteristiky $B=f(H)$ lze sestavit budicí charakteristiku $I_{20}=f(U_{20})$, tedy závislost celkové chyby na indukovaném napětí pro konkrétní transformátor. Závislost celkové chyby na indukovaném napětí je nelineární.

2. Závislost na břemeni

I v tomto případě se jedná o změnu indukovaného napětí, ovšem při konstantním proudu. Obecně celková chyba $\Delta I=I_{20}$ s břemenem roste, ale nelineárně – závislost $I_{20}=f(U_{20})$ je nelineární.

3. Závislost na sekundárním účinníku

Při této závislosti je předpokladem konstantní břemeno a konstantní proud I_1 . Koncový bod fázoru celkové chyby I_{20} se pohybuje po kružnici I_{20} a středem v počátku. Podle změny úhlu β se mění i velikost chyby ε_i a δ_i .

4. Závislost na kmitočtu

Při změně kmitočtu se nepřímo úměrně mění i magnetická indukce. Při poklesu magnetické indukce klesá i hodnota celkové chyby I_{20} a jejich složek ε_i a δ_i .

3.2.3. Úprava chyb – závitová korekce

V případě, kdy je závitový převod roven jmenovitému převodu, je využívána jen polovina dovoleného pole chyb. V tom případě by byla chyba proudu pouze záporná. Proto se provádí úprava chyb tak, aby chyby proudu byly i v kladné oblasti. Úprava chyb pro kladnou i zápornou oblast je znázorněna na obrázku 20.

Úpravu chyb je možné provést několika způsoby:

- změnou počtu závitů na sekundárním vinutí – tato úprava je nejjednodušší a korekce je dostatečně jemná. Obtížnější korekce je u jednozávitových tyčových nebo průchodkových transformátorů, kde snížení počtu sekundárních závitů o 1 závit může znamenat i několik % z celkového počtu sekundárních závitů N_2 .
- odporovým a indukčním děličem – jedná se o dělič napětí, který se připojí mezi poslední a předposlední závit sekundárního vinutí. U odporového děliče se korekce děje plynule

posuvným jezdcem mezi krajními polohami, průřez odporového drátu se dimenzuje na jmenovitý sekundární proud. U indukčního děliče se korekce děje ve stupních, které odpovídají jednotlivým závitům indukčního děliče, průřez vodiče tohoto děliče se dimenzuje stejně jako vodič sekundárního vinutí.

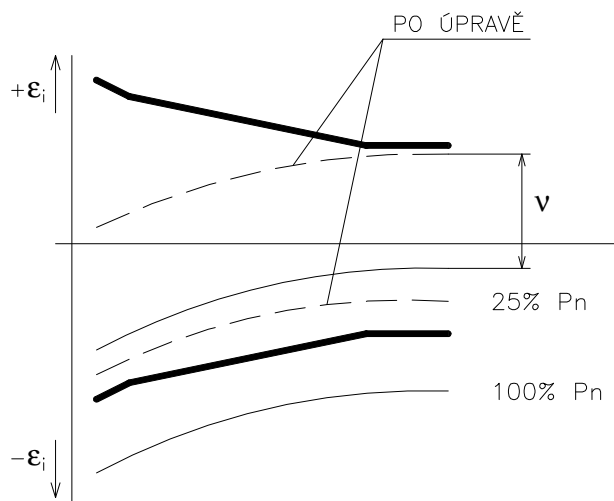
- c) paralelní řazení dvou sekundárních vinutí – celkový průřez jádra se rozdělí na dvě části, přičemž na každou část jádra se navine samostatné vinutí. Přitom musí platit

$$N_1 I_1 = N_2' I_2' = N_2'' I_2'' \quad [A] \quad (4)$$

a současně

$$I_2' + I_2'' = I_{2n} \quad [A] \quad (5)$$

- d) rozdělení sekundárního vinutí na dvě paralelní větve.
e) provedení neúplného (zlomkového) závitu – tento způsob korekce je poměrně hodně rozšířen, jeho nevýhodou je, že závit se musí do jádra vložit už při výrobě (při navíjení). Poslední závit neobepíná celý průřez magnetického obvodu, ale pouze jeho část. Posledním závitem pak neprochází celý magnetický tok, ale pouze jeho část a indukované napětí je v tomto závitu nižší než v ostatních závitech.

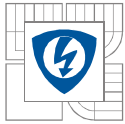


Obr. 20: Závítová korekce

3.2.4. Transformátor proudu v nadproudové oblasti

Transformátor proudu má dvě pracovní oblasti – oblast provozní a oblast nadproudovou. V oblastech provozních pracuje transformátor za normálního provozu v síti a v oblasti nadproudové při přetíženích a poruchových stavech (zkratech) v sítích.

U měřicích transformátorů proudu je jedním z parametrů nadproudové číslo transformátoru proudu označované FS. Nadproudové číslo určuje násobek jmenovitého



primárního proudu, kdy chyba bude menší než 10%. Například označení u transformátoru 50/5A, 5P10 znamená, že nadproudovým číslem 10 je zaručena správná funkce měřicího transformátoru proudu až do hodnoty 10-ti násobku jmenovitého primárního proudu. Nesmí ale být překročena jmenovitá zátěž ve VA, protože by to mohlo ovlivnit nadproudové číslo. Například je-li uvedená zátěž 10 VA a nadproudové číslo 10, tak při zatížení vinutí břemenem o výkonu 15 VA se sníží nadproudové číslo na 7. Nadproudové číslo má být co nejmenší. Lze jej vypočítat z indukce nasycení magnetického materiálu a jmenovité indukce podle vztahu

$$n = \frac{B_m}{0,9 \cdot B_n} \quad [-, T] \quad (6)$$

kde: B_n je jmenovitá indukce při jmenovité zátěži a jmenovitém proudu
 B_m je indukce nasycení pro konkrétní materiál

Dalším parametrem je celková chyba ε_c . Celková chyba je v podmínkách ustáleného provozu efektivní hodnota integrálu rozdílu mezi okamžitou hodnotou primárního proudu a okamžitou hodnotou sekundárního proudu násobenou jmenovitým převodem.

Nadproudová charakteristika, jako další parametr v nadproudové oblasti, je závislost sekundárního proudu na proudu primárním v nadproudové oblasti transformátoru proudu.

3.2.4 Transformátor proudu při zkratech

Zkratová odolnost transformátoru je schopnost odolávat dynamickým, tepelným a elektrickým účinkům nadproudů, které jsou způsobeny zkraty v síti. Zkratovou odolnost dělíme na vnitřní a vnější – zkratová odolnost transformátoru zahrnuje obě. Zkratová odolnost vnější vyjadřuje schopnost odolat účinkům, které vznikají působením nadproudů na bezprostředním okolí, jako jsou např. dynamické síly od primárních přívodů na primární svorky atd. Vnitřní zkratová odolnost představuje schopnost transformátoru odolat těm dynamickým, tepelným a elektrickým účinkům, které vznikají působením nadproudů v samotném transformátoru. Vlastního návrhu transformátoru se dotýká zejména vnitřní zkratová odolnost, vnější zkratová odolnost souvisí s celým zařízením. Zkratová odolnost je charakterizována dynamickým proudem I_{dyn} , jmenovitým krátkodobým proudem I_{thn} a zkratovou třídou.

Jmenovitý dynamický proud I_{dyn} je vrcholová hodnota největší (první) amplitudy primárního proudu bez poškození jakékoliv části mechanicky nebo elektricky dynamickým účinkem proudu nebo přepětí.

Jmenovitý krátkodobý proud I_{thn} je efektivní hodnota primárního proudu, který transformátor snese po dobu jedné sekundy při sekundárním vinutí spojeném nakrátko bez poškození kterékoliv jeho části vzniklým teplem. Vypočítá se podle vztahu

$$I_{thn} = \frac{S_v \cdot \sigma_{thn}}{1000} \quad [kA, mm^2, A/mm^2] \quad (7)$$

kde,

S_v – průřez primárního vodiče



σ_{thn} – proudová hustota vodičů primárního vinutí při jmenovitém krátkodobém proudu

3.2.5 Izolace přístrojových transformátorů proudu

Izolace je jedním z nejdůležitějších prvků při řešení přístrojového transformátoru. Přístrojové transformátory jsou vystaveny dvojímu druhu namáhání – napětí o průmyslovém kmitočtu a přepětí v sítích. Návrh izolace vychází ze jmenovitého izolačního napětí a přiřazených zkušebních napětí. Podle těch se potom volí uspořádání vinutí, izolační vzdálenosti a materiály.

Izolace se dělí na vnější a vnitřní. Na vnější izolaci působí vnější vlivy jako je vnější atmosféra, prach, vlhkost atd. Vnitřní izolace zahrnuje vnitřní izolaci vinutí, tedy izolaci vinutí, izolaci cívek, izolaci vinutí proti sobě a proti uzemněným částem, mezipolohovou a mezivrstvou izolaci. Významnou částí vnitřní izolace je izolační předěl, tj. dielektrikum, které odděluje primární obvod od obvodu sekundárního.

Pro izolační bezpečnost transformátoru je vhodné, aby izolační hladina vnitřní izolace byla vyšší, než izolační hladina vnější izolace. Hlavní rozměry přístrojových transformátorů pro vnitřní montáž na vn závisí na tvaru a materiálu izolačního tělesa. Pro izolační napětí je zpravidla rozhodující zkušební napětí rázové vlny kladné polarity.

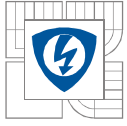
3.3. Oteplení přístrojových transformátorů

3.3.1 Oteplení transformátoru proudu při $I_n=10-120\%$

U přístrojových transformátorů proudu nesmí trvalá teplota nejteplejšího místa izolačních hmot přesáhnout dovolenou trvalou teplotu podle normy ČSN EN 60044-1. Dovolená trvalá teplota vinutí je dána dovolenou trvalou teplotou použité izolace. S ohledem na rozdíl teploty mezi místy s největší a střední teplotou se dovoluje snížit hodnotu ustáleného oteplení o 10°C, než rozdíl dovolené trvalé teploty izolantu a průměrné teploty okolí +35°C podle ČSN.

U přístrojových transformátorů proudu je oteplení vinutí dáno proudem a nezávisí na velikosti břemene a jmenovité zátěži. Ustálené oteplení, během provozu, je vzhledem k malé proudové hustotě většinou nízké a vyšších hodnot nabývá jen u transformátorů s nižší zkratovou odolností. Primární vinutí je nutné kontrolovat jen u těch transformátorů, které jsou konstrukčně provedeny tím způsobem, že primární vinutí je obaleno tlustou vrstvou izolantu tvořícího izolační předěl. V něm může vzniknout velký teplotní spád a také se tento předěl může oteplovat vlastními dielektrickými ztrátami. Podstatně vyšší oteplení vinutí nastává při nadproudech v síti – toto oteplení smí být jen krátkodobé.

Oteplení magnetického obvodu transformátoru proudu je závislé na břemeni i proudu, protože indukce, a tím i jeho oteplení, je přímo úměrné zátěži. Největších hodnot nabývá oteplení magnetického obvodu v případě, že sekundární obvod je rozpojen. Jestliže jsou sekundární svorky transformátoru při provozu rozpojeny, znamená to poruchový stav. V tom případě se celé primární proudění stává prouděním magnetizačním a během krátkého časového úseku dojde k nasycení magnetizačního obvodu.



Magnetický tok se od určité velikosti proudění už nezvětšuje a zůstává konstantní. Potom dojde během krátkého časového úseku sinusovky ke změně o hodnotu $2\phi_{\max}$. V tom okamžiku se indukuje v sekundárním vinutí největší napětí podle vztahu

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

Největší napětí potom bude při průchodu magnetického toku nulou. Toto napětí může dosahovat hodnot až desítek kilovoltů a může být tedy velice nebezpečné.

3.4. Oteplení proudového transformátoru

3.4.1 Výpočet oteplení primárního vodiče proudového transformátoru

Při průchodu proudu primárním vodičem transformátoru proudu dochází k oteplování tohoto vodiče. Zejména při průchodu vyšších proudů než jsou jmenovité hodnoty dochází k většímu (a při průchodu větších nadproudů nebo zkratů) i rychlejšímu oteplování vodiče.

Pro výpočet oteplení budeme uvažovat přístrojový transformátor proudu průvlekový jednovávitový.

Parametry transformátoru jsou z [2]:

Jmenovitý výkon (P)	15VA
Jmenovitý primární proud (I_{1n})	400A
Jmenovitý sekundární proud (I_{2n})	5A
Třída přesnosti (T_p)	0,5
Nadproudové číslo (FS)	5
Izolační napětí (U_{izol})	12kV
Průřez jádra (S)	400mm ²
Materiál magnetického obvodu	Armco M6x

Provedeme výpočet oteplení vodiče Cu procházejícího uvedeným transformátorem proudu.

Parametry vodiče jsou:

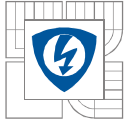
Dovolený zatěžovací proud vodiče (I_z)	: 897A
Časová oteplovací konstanta vodiče (τ)	: 1454 s
Provozní teplota vodiče (ϑ_2)	: 70°C
Dovolená teplota při přetížení (ϑ)	: 120°C

Ostatní hodnoty pro výpočet:

Teplota okolí (ϑ_0)	: 22°C
Zvolený nadproud (I_1)	: 400A, 480A, 600A, 800A, 1000A, 1200A, 1400A

Pro výpočet oteplovací křivky daného vodiče vyjdeme ze vztahu

$$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_0 = (\vartheta_2 - \vartheta_0) \left(\frac{I_1}{I_z} \right)^{2,492} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (9)$$



Pro výpočet času, kdy vodič dosáhne dovoleného oteplení při uvoleném nadproudu I_2 použijeme vztah

$$t = \tau \ln \frac{1}{1 - \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \vartheta_z(i)^{2,492}}} \quad (10)$$

kde

$$i = \frac{I_1}{I_z} \quad (11)$$

Úpravou dostaneme vztah

$$t = \ln \left(1 - \frac{\Delta \vartheta}{\vartheta - \vartheta_o} \cdot \left(\frac{I_z}{I_1} \right)^{2,492} \right) \cdot (-\tau) \quad (12)$$

Příklady výpočtů

Výpočet pro primární proud $I_1=400A$ pro čas $t=240s$

$$\Delta \vartheta = (70 - 22) \left(\frac{400}{897} \right)^{2,492} \left(1 - e^{-\frac{240}{1454}} \right) = 0,98^\circ C$$

Příklad výpočtu pro primární proud $I_1=480A$ pro čas $t=240s$

$$\Delta \vartheta = (70 - 22) \left(\frac{480}{897} \right)^{2,492} \left(1 - e^{-\frac{240}{1454}} \right) = 1,54^\circ C$$

Příklad výpočtu pro primární proud $I_1=600A$ pro čas $t=240s$

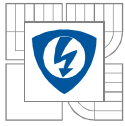
$$\Delta \vartheta = (70 - 22) \left(\frac{600}{897} \right)^{2,492} \left(1 - e^{-\frac{240}{1454}} \right) = 2,68^\circ C$$

Příklad výpočtu pro primární proud $I_1=800A$ pro čas $t=240s$

$$\Delta \vartheta = (70 - 22) \left(\frac{800}{897} \right)^{2,492} \left(1 - e^{-\frac{240}{1454}} \right) = 5,5^\circ C$$

Příklad výpočtu pro primární proud $I_1=1000A$ pro čas $t=240s$

$$\Delta \vartheta = (70 - 22) \left(\frac{1000}{897} \right)^{2,492} \left(1 - e^{-\frac{240}{1454}} \right) = 9,58^\circ C$$



Výpočet pro primární proud $I_1=1200\text{A}$ pro čas $t=240\text{s}$

$$\Delta\vartheta = (70 - 22) \left(\frac{1200}{897} \right)^{2,492} \left(1 - e^{-\frac{240}{1454}} \right) = 15,1^\circ\text{C}$$

Výpočet pro primární proud $I_1=1400\text{A}$ pro čas $t=240\text{s}$

$$\Delta\vartheta = (70 - 22) \left(\frac{1400}{897} \right)^{2,492} \left(1 - e^{-\frac{240}{1454}} \right) = 22,15^\circ\text{C}$$

Výpočet času, kdy dosáhne vodič dovoleného oteplení při zvoleném nadproudu $I_2=1200\text{A}$

$$t = \ln \left(1 - \frac{98}{70 - 22} \cdot \left(\frac{897}{1200} \right)^{2,492} \right) \cdot (-1454) = 6505,4\text{s}$$

Tabulky oteplení v čase

Tabulka 1: Oteplení v časech t pro nadproud $I_1 = 400\text{A}$

t [s]	60	120	240	360	480	600	960	1440	1800	3600
$\Delta\vartheta$ [°C]	0,26	0,5	0,98	1,4	1,8	2,17	3,1	4,03	4,55	5,88

Tabulka 2: Oteplení v časech t pro nadproud $I_1 = 480\text{A}$

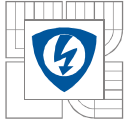
t [s]	60	120	240	360	480	600	960	1440	1800	3600
$\Delta\vartheta$ [°C]	0,41	0,8	1,54	2,22	2,84	3,42	4,88	6,35	7,17	9,26

Tabulka 3: Oteplení v časech t pro nadproud $I_1 = 600\text{A}$

t [s]	60	120	240	360	480	600	960	1440	1800	3600
$\Delta\vartheta$ [°C]	0,71	1,4	2,68	3,86	4,95	5,96	8,52	11,1	12,5	16,1

Tabulka 3: Oteplení v časech t pro nadproud $I_1 = 800\text{A}$

t [s]	60	120	240	360	480	600	960	1440	1800	3600
$\Delta\vartheta$ [°C]	1,46	2,86	5,5	7,92	10,15	12,2	17,44	22,68	25,62	33,1



Tabulka 4: Oteplení v časech t pro nadproud $I_1 = 1000\text{A}$

t [s]	60	120	240	360	480	600	960	1440	1800	3600
$\Delta\vartheta$ [°C]	2,54	4,98	9,57	13,8	17,7	21,28	30,4	39,6	44,68	57,64

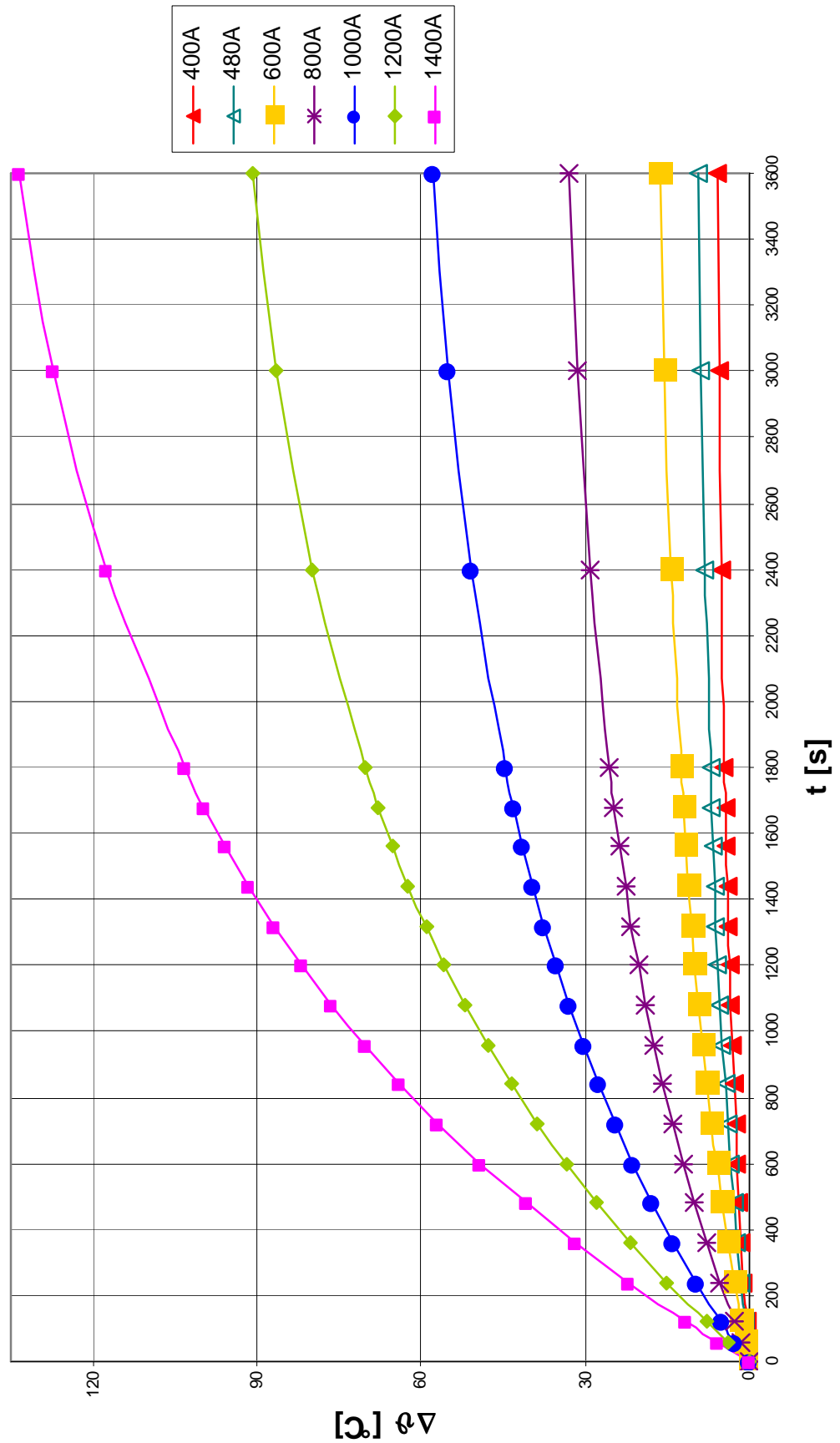
Tabulka 5: Oteplení v časech t pro nadproud $I_1 = 1200\text{A}$

t [s]	60	120	240	360	480	600	960	1440	1800	3600
$\Delta\vartheta$ [°C]	4,01	7,85	15,1	21,7	27,87	33,5	47,9	62,31	70,4	90,79

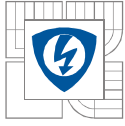
Tabulka 6: Oteplení v časech t pro nadproud $I_1 = 1400\text{A}$

t [s]	60	120	240	360	480	600	960	1440	1800	3600
$\Delta\vartheta$ [°C]	5,88	11,5	22,15	31,92	40,9	49,21	70,3	91,5	103,3	133,3

Oteplovací křivky vodiče 1-YY 1x400



Graf 1: Oteplovací křivka vodiče 1-YY 1x400 mm²



3.4.2 Výpočet chyb a magnetické indukce

Výpočet chyb a magnetické indukce bude proveden pro 100% jmenovitého břemene ($Z_n=100\%$) a násobky sekundárního proudu I_{2n} ($I_{2n}=100\% - 350\%$). Pro výpočet chyb potřebujeme znát délku závitů sekundárního vinutí a odpor sekundárního vinutí (vnitřní břemeno). Tyto hodnoty jsou:

$$l_2=105,03 \text{ mm} \quad [2]$$

$$R_2=0,075 \Omega \quad [2]:$$

Induktivní reaktanci sekundárního vinutí zanedbáváme, protože se jedná o toroidní jádro s rovnoměrným rozložením tohoto vinutí po celém obvodu.

Vnitřní zátěž při jmenovitém proudu vypočteme podle vztahu

$$P_i=R_2 I_{2n}^2 \quad [\text{VA}, \Omega, \text{A}] \quad (13)$$

$$P_i=0,075 \cdot 5^2=1,875 \text{VA}$$

Jmenovité břemeno a jeho složky ($\cos\beta=0,8$)

$$Z_n = \frac{P_n}{I_{2n}^2} \quad [\Omega, \text{VA}, \text{A}] \quad (14)$$

$$Z_n = \frac{15}{5^2} = 0,6 \Omega$$

Činná složka

$$R = Z_n \cdot \cos \beta \quad [\Omega] \quad (15)$$

$$R = 0,6 \cdot 0,8 = 0,48 \Omega$$

Jalová složka

$$X = Z_n \cdot \sin \beta \quad [\Omega] \quad (16)$$

$$X = 0,6 \cdot 0,6 = 0,36 \Omega$$

Činná složka jmenovité zátěže

$$P_c = P_n \cdot \cos \beta \quad [\text{VA}] \quad (17)$$

$$P_c = 15 \cdot 0,8 = 12 \text{VA}$$

Jalová složka jmenovité zátěže

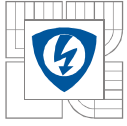
$$P_j = P_n \cdot \sin \beta \quad [\text{VA}] \quad (18)$$

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

Celková zátěž transformátoru při jmenovitém proudu

$$P_c = \sqrt{(P_c + P_i)^2 + P_j^2} \quad [\text{VA}] \quad (19)$$

$$P_c = \sqrt{(12 + 1,875)^2 + 9^2} = 16,538 \text{VA}$$



Hodnota jmenovité magnetické indukce při jmenovité zátěži a jmenovitém proudu

$$B_{sk} = \frac{P_c}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 I_2} \quad [\text{T, VA, Hz, m}^2, \text{A}] \quad (20)$$

kde:

S – průřez jádra – $S=400 \text{ mm}^2$ [2]

ξ - činitel plnění magnetického obvodu (0,9-0,95) – volíme 0,9 [2]

N_2 – počet sekundárních závitů – $N_2=80$ závitů [2]

Magnetická indukce pro jmenovitou zátěž a jmenovitý proud

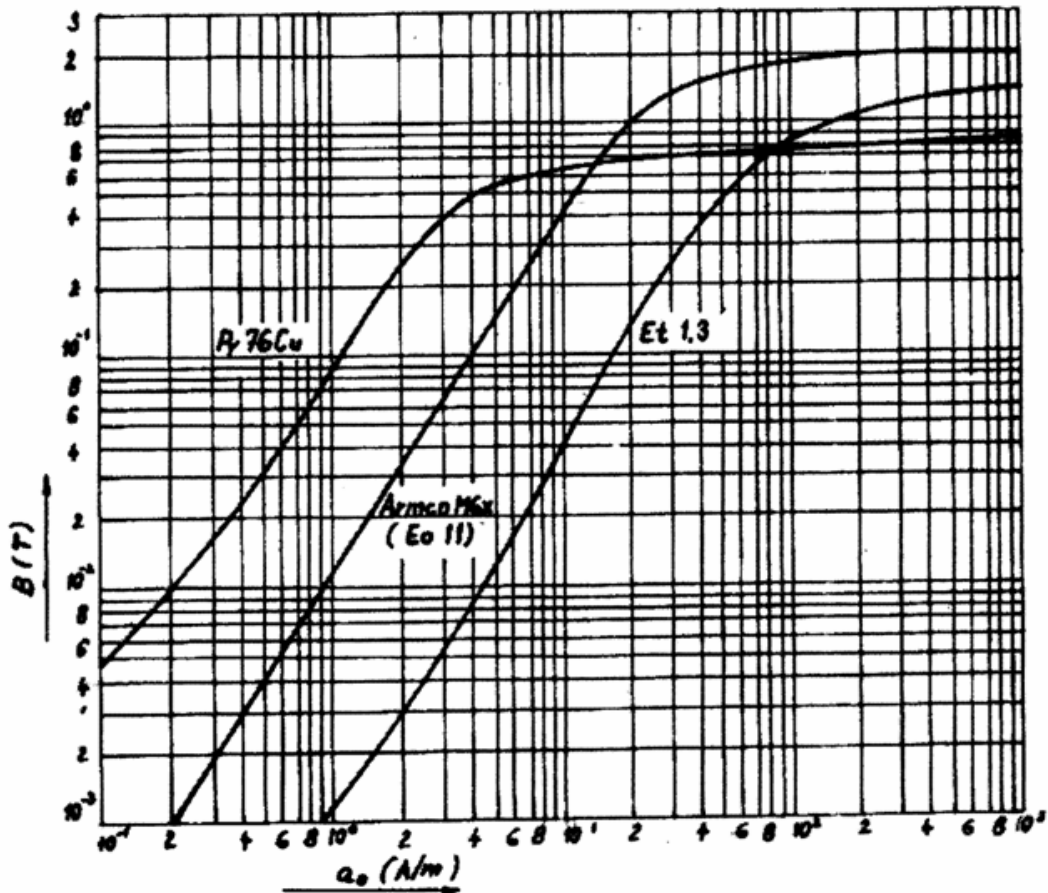
$$B_{sk} = \frac{16,538}{4,44 \cdot 50 \cdot 400 \cdot 10^{-6} \cdot 0,9 \cdot 80 \cdot 5} = 0,517 \text{ T}$$

Výpočet chyb provedeme pro 100% jmenovitého břemene a 100% - 350% jmenovitého sekundárního proudu I_{2n} . Z těchto hodnot následně vyneseme křivky chyb, které po navržené korekci musí ležet uvnitř dovoleného pole chyb. Výsledné hodnoty jsou shrnuty do tabulky 7.

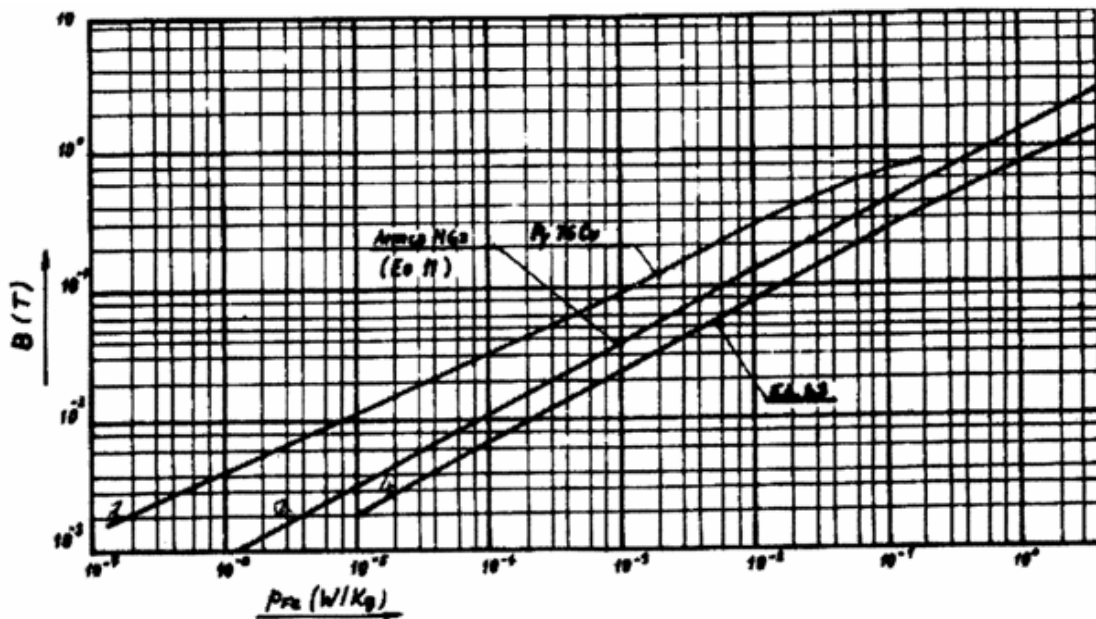
Tabulka 7: Chyby a magnetická indukce

I_{2n} [A]	5	6	7,5	10	12,5	15	17,5
B_{sk} [T]	0,517	0,621	0,776	1,035	1,293	1,552	1,811
a_0 [A/m]	12	15	17	24	28	35	49
P_{Fe} [W/kg]	0,15	0,19	0,25	0,6	0,9	1,1	1,8
a_g [A/m]	9,8	10,34	10,88	19,58	23,52	23,94	33,58
I_{2Fe} [A]	0,046	0,049	0,051	0,092	0,111	0,113	0,158
I_{20} [A]	0,0566	0,071	0,08	0,113	0,132	0,165	0,231
γ [°]	54,75	43,58	39,79	54,7	56,14	43,16	43,26
β_c [°]	32,97	32,97	32,97	32,97	32,97	32,97	32,97
α [°]	2,28	13,45	17,24	2,33	0,89	13,87	13,77
ϵ_i [%]	-1,131	-1,151	-1,019	-1,129	-1,056	-1,068	-1,282
δ_i [min]	1,55	9,47	10,87	1,58	0,564	9,1	10,81

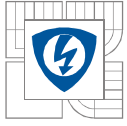
Z tabulky vypočítaných hodnot je zřejmé, že pro hodnoty proudu vyšší jak 3,5-násobek jmenovitého sekundárního proudu dojde k přesycení jádra a sekundární proud nebude měnit hodnotu. Jádro je z materiálu Armco M6x s maximální indukcí $B_{max}=1,8\text{-}2\text{T}$. Při dosažení nasycení chyba vyjádřená v % v absolutní hodnotě nebude mít vliv na skutečnou a teoretickou hodnotu sekundárního proudu (danou převodem).



Obr. 21: Závislost budícího proudění a_0 na magnetické indukci B



Obr. 22: Závislost ztrát P_{Fe} na magnetické indukci B



Příklad výpočtů hodnot z tabulky 7 pro $I_{2n}=100\%$ (5A) a $I_{2n}=300\%$ (15A)

Sekundární jmenovitý proud $I_{2n}=5A$

Skutečná hodnota magnetické indukce pro 100% Z_n a 100% I_{2n}

$$B_{sk}^{1.0} = \frac{\sqrt{[(R + R_2) \cdot (I_{2n})^2]^2 + [X \cdot (I_{2n})^2]^2}}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 I_{2n}} \quad [T, \Omega, Hz, m^2, A] \quad (21)$$

$$B_{sk}^{1.0} = \frac{\sqrt{[(0,48 + 0,075) \cdot (5)^2]^2 + [0,36 \cdot (5)^2]^2}}{4,44 \cdot 50 \cdot 400 \cdot 10^{-6} \cdot 0,9 \cdot 80 \cdot 5} = 0,517T$$

Hodnotu měrného budicího proudění pro skutečnou hodnotu magnetické indukce odečteme z magnetizační charakteristiky [1] (obr. 21)

$$a_0 = 12 \text{ A/m}$$

Měrné ztráty P_{Fe} odečteme z příslušné charakteristiky [1] (obr. 22)

$$P_{Fe} = 0,15 \text{ W/kg}$$

Měrná hmotnost pro materiál Armco M6x

$$\gamma_{Fe} = 7500 \text{ kg} \cdot m^3$$

Měrné budicí proudění činné

$$a_g = \frac{P_{Fe} \cdot \gamma_{Fe}}{4,44 \cdot f \cdot B_{sk}^{1.0}} \quad [A, m, W, T, kg] \quad (22)$$

$$a_g = \frac{0,15 \cdot 7500}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,517} = 9,8 A \cdot m^{-1}$$

Proud v železe

$$I_{2Fe} = a_g \cdot l_m \cdot \frac{1}{N_2} \quad [A, m] \quad (23)$$

kde l_m je střední délka magnetického obvodu

$$l_m = \pi \cdot D \quad [m] \quad (24)$$

$$l_m = \pi \cdot 0,120 = 0,377m$$

Proud v železe potom bude

$$I_{2Fe} = 9,8 \cdot 0,377 \cdot \frac{1}{80} = 0,046A$$

Celková chyba transformátoru proudu přepočtená na sekundární počet závitů

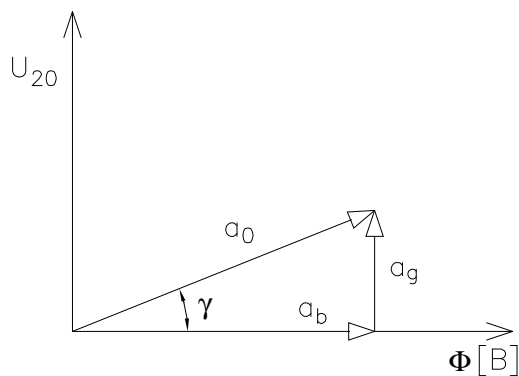
$$I_{20} = a_0 I_m \cdot \frac{1}{N_2} \quad [\text{A, m}] \quad (25)$$

$$I_{20} = 12,0,377 \cdot \frac{1}{80} = 0,0566 \text{ A}$$

Chybu proudu vypočteme podle vztahu

$$\varepsilon_i = -\frac{I_{20}}{I_{2n}} \cos \alpha \cdot 100 \quad [\%, \text{ A}] \quad (26)$$

Úhel γ vypočítáme podle trojúhelníku budicího proudění, viz obr. 23



Obr. 23: Trojúhelník budicího proudění

$$\gamma = \arcsin \frac{a_g}{a_o} \quad [^\circ] \quad (27)$$

$$\gamma = \arcsin \frac{9,8}{12} = 54,75^\circ$$

Protože úhel α se vypočte podle vztahu

$$\alpha = 90 - (\beta_c + \gamma) \quad [^\circ] \quad (28)$$

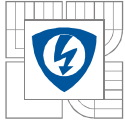
je nutno nejprve vypočítat úhel β_c podle vztahu

$$\text{tg} \beta_c = \frac{X}{R + R_2} \Rightarrow \beta_c = \text{arctg} \frac{X}{R + R_2} \quad [^\circ] \quad (29)$$

$$\beta_c = \text{arctg} \frac{0,36}{0,48 + 0,075} = 32,97^\circ$$

Úhel α potom bude

$$\alpha = 90 - (32,97 + 54,75) = 2,28^\circ$$



Chyba proudu pro 100% bude

$$\varepsilon^{1.0} = -\frac{0,0566}{5} \cos 2,28 \cdot 100 = -1,131\%$$

Chybu úhlu vypočteme podle vztahu

$$\delta = 3440 \frac{I_{20}}{I_{2n}} \sin \alpha \quad [\text{min, A}] \quad (30)$$

Chyba úhlu pro 100% bude

$$\delta^{1.0} = 3440 \frac{0,0566}{5} \sin 2,28 = 1,55 \text{ min}$$

Sekundární jmenovitý proud $I_{2n}=15A$

Skutečná hodnota magnetické indukce pro 100% Z_n a 300% I_{2n}

$$B_{sk}^{3.0} = \frac{\sqrt{[(0,48 + 0,075) \cdot 15^2]^2 + [0,36 \cdot 15^2]^2}}{4,44 \cdot 50 \cdot 400 \cdot 10^{-6} \cdot 0,9 \cdot 80 \cdot 15} = 1,552T$$

Hodnotu měrného budicího proudění pro skutečnou hodnotu magnetické indukce odečteme z magnetizační charakteristiky [1] (obr. 21)

$$a_0 = 35 \text{ A/m}$$

Měrné ztráty P_{Fe} odečteme z příslušné charakteristiky [1] (obr. 22)

$$P_{Fe} = 1,1 \text{ W/kg}$$

Měrná hmotnost pro materiál Armco M6x

$$\gamma_{Fe} = 7500 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$$

Měrné budicí proudění činné

$$a_g = \frac{1,1 \cdot 7500}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,552} = 23,94 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Proud v železe

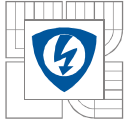
$$I_{2Fe} = 23,94 \cdot 0,377 \cdot \frac{1}{80} = 0,113A$$

Celková chyba transformátoru proudu přepočtená na sekundární počet závitů

$$I_{20} = 35 \cdot 0,377 \cdot \frac{1}{80} = 0,165A$$

Úhel γ

$$\gamma = \arcsin \frac{23,94}{35} = 43,16^\circ$$



Úhel β_c

$$\beta_c = \arctg \frac{0,36}{0,48 + 0,075} = 32,97^\circ$$

Úhel α potom bude

$$\alpha = 90 - (32,97 + 43,16) = 13,87^\circ$$

Chybu proudu pro 300%

$$\varepsilon^{3,0} = -\frac{0,165}{15} \cos 13,87 \cdot 100 = -1,068\%$$

Chybu úhlu pro 300% bude

$$\delta^{3,0} = 3440 \frac{0,165}{15} \sin 13,87 = 9,1 \text{ min}$$

3.4.3 Ztráty v magnetickém obvodu a v sekundárním vinutí

Ztráty v magnetickém obvodu vycházejí z použitého materiálu jádra a jeho parametrů. Jádro uvažovaného transformátoru je z plechů ArmcoM6x (plechy Eo11). Měrná hmotnost těchto plechů je $\gamma_{Fe}=7500 \text{ kg/m}^3$. Vzhledem k tvaru a rozměrům jádra [2] bude tedy objem jádra:

$$V = \pi \cdot v \cdot (R^2 - r^2) \quad [\text{m}^3, \text{m}] \quad (31)$$

$$V = \pi \cdot 0,02 \cdot (0,07^2 - 0,05^2) = 1,51 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Pro vypočtené magnetické indukce (pro jednotlivé proudy v sekundárním vinutí) odečteme z obr. 22 ztráty v železe P_{Fe} .

Hmotnost jádra bude

$$m = \gamma_{Fe} \cdot V \quad [\text{kg}, \text{kg/m}^3, \text{m}^3] \quad (32)$$

$$m = 7500 \cdot 1,51 \cdot 10^{-4} = 1,1 \text{ kg}$$

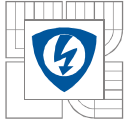
Hodnoty magnetické indukce a odečtených ztrát v železe jsou v tabulce 7. Vypočtená skutečná magnetická indukce je v rozmezí 0,517 – 1,811 T a tomu odpovídající ztráty 0,15 – 1,8 W/kg. To znamená, že největší ztráty by dosahovaly hodnoty do 2W a ztráty v magnetickém obvodu budeme zanedbávat.

Ztráty v sekundárním vinutí vycházejí z odporu sekundárního vinutí a z proudu procházejícím tímto vinutím.

$$P_2 = R_2 \cdot I_2^2 \quad [\text{W}, \Omega, \text{A}] \quad (33)$$

Příklad výpočtu ztrát při $I_2=10\text{A}$

$$P_2 = 0,075 \cdot 10^2 = 7,5 \text{ W}$$



Tabulka 8: Ztráty v sekundárním vinutí

R [Ω]	I [A]	P [W]
0,075	5	1,875
0,075	6	2,7
0,075	7,5	4,219
0,075	10	7,5
0,075	12,5	11,72
0,075	15	16,875
0,075	17,5	22,969

Při výpočtu oteplení primárního i sekundárního vinutí byla ve výpočtech zanedbána změna odporu při zvýšení teploty nad teplotu 20°C. Pokud bychom chtěli tuto změnu uvažovat, hodnota odporu by se přepočítávala podle vztahu

$$R_{\vartheta} = R_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta - \vartheta_{20})] \quad [\Omega, ^\circ\text{C}] \quad (34)$$

,kde

R_{ϑ} - výsledný odpor při vyšší teplotě

R_{20} - odpor při teplotě 20°C

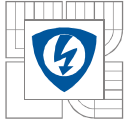
α_{20} - teplotní součinitel [K^{-1}]

ϑ - teplota pro přepočet odporu

ϑ_{20} - teplota 20°C

Z výše uvedeného popisu v předešlých kapitolách je zřejmé, že v přístrojovém transformátoru proudu vznikají v důsledku ztrát způsobených průchodem nadproudu tři zdroje tepla, které způsobují oteplování transformátoru – oteplování primárního vodiče, oteplování sekundárního vinutí a oteplování magnetického jádra transformátoru. V transformátoru působí jako tepelná izolace převážně vzduch a epoxidová pryskyřice.

V následující kapitole diplomové práce bude provedena analýza oteplování transformátoru v důsledku působení zmiňovaných zdrojů tepla v programu ANSYS Workbench.



4. ANSYS Workbench

V této části bude provedena teplotní analýza přístrojového transformátoru proudu v oblasti nadproudů, kdy na přístroj působí tři zdroje tepla. Před samotnou prací v programu ANSYS Workbench se zmíníme alespoň ve stručnosti o programu samotném a principu práce, případně spolupráce s jinými programy.

4.1. Co je ANSYS Workbench

Program ANSYS Workbench je založený na metodě konečných prvků (MKP, anglicky Finite Element Method – FEM). Používá se například pro statické a dynamické výpočty. Je možné řešit například tato fyzikální pole: elektromagnetické, teplotní pole atd. V tomto prostředí je možné provádět typy analýz, umožňuje výměnu dat mezi jednotlivými programy pro modelování. Program ANSYS Workbench spolupracuje mj. s výpočetními programy – ANSYS DesignSpace, ANSYS Professional, ANSYS Fatigue, ANSYS DesignModeler, ANSYS DesignXplorer atd.

ANSYS DesignSpace

Do prostředí Workbench je plně integrovaný program ANSYS DesignSpace, který umožňuje rychlé a snadné analýzy. Tento program je používán především konstruktéry, uplatnění nalezne ale i výpočtářů specialistů. Má přímou návaznost na CAD programy:

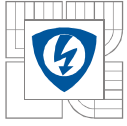
- Autodesk Inventor
- Autodesk Mechanical Desktop
- Pro/ENGINEER
- SolidWorks
- SolidEdge
- Unigraphics

S těmito formáty je asociativní oboustranně, z ostatních může importovat geometrii ve formátech PARASOLID, ACIS (SAT) a STEP. K dispozici jsou tři verze:

- ANSYS DesignSpace Entra – základní programová je pro lineárně statické výpočty jednotlivých dílů
- ANSYS DesignSpace Structural – umožňuje statické pevnostní analýzy, výpočty vlastních frekvencí a lineární stability na jednotlivých dílech a komplexních sestavách, a to včetně výpočtů kontaktních úloh
- ANSYS DesignSpace – zde jsou navíc oproti verzi Structural k dispozici výpočty stacionárních teplotních polí

ANSYS Professional

ANSYS Professional je plně integrovaný do prostředí Workbench, nabízí další rozšíření základních možností programu DesignSpace. Jsou to např. lineární dynamické analýzy na základě rozvoje vlastních tvarů kmitání, nelineární statické výpočty, více druhů kontaktních prvků a další. Rozlišujeme tři základní licence:



- ANSYS Professional NLT – rozšiřuje možnost programů DesignSpace především o nestacionární teplotní výpočty. Součástí výpočtů jsou i modely radiace a změny fáze
- ANSYS Professional NLT/Emag – rozšířený program Professional NLT o možnosti výpočtů nízkofrekvenčního magnetismu
- ANSYS Professional NLS – tato konfigurace rozšiřuje možnosti programů DesignSpace především o nelineární statické výpočty. Do výpočetního modelu lze zahrnout velké deformace a přemístění, bilineární modely popisující plasticitu materiálů (chování při zatěžování za mezí kluzu) a hyperelastické materiály (pryže).

ANSYS Fatigue

ANSYS Fatigue umožňuje simulovat chování konstrukce během nízko nebo vysoko cyklického zatěžování a hodnocení únavy.

ANSYS DesignModeler

Je to parametrické prostředí pro tvorbu 2D i 3D modelů, vytváření koncepčních modelů, možnost automatického čištění a oprav. Umožňuje opravy geometrií v CAD programech.

ANSYS DesignXplorer

Umožňuje parametrickou optimalizaci v prostředí Workbench. Lze jej použít jak pro výpočty strukturální, tak i pro výpočty proudění. Geometrické parametry se definují v prostředí DesignModeler, nebo na základě obousměrné asociativity v příslušném CAD programu.

4.2. Metoda konečných prvků - MKP

Metoda konečných prvků (FEM) je numerická metoda pro analýzu struktur a těles. Základním principem FEM je rozdělení tělesa (diskretizace) na malé části, které jsou matematicky snadno popsitelné. To znamená, že se na analyzovaném modelu vytvoří uzlová síť a pro tyto uzly jsou potom sestavovány rovnice s určením okrajových podmínek, které následně řeší program.

Je tedy důležité zvolit optimální hustotu sítě, aby vytvořené body uzlové sítě nebyly moc vzdálené od sebe nebo naopak, aby nebyly moc u sebe. To znamená, že kde je požadavek na přesnější analýzu, je vhodnější navrhnout síť s větší hustotou uzlových bodů a tam, kde není takový požadavek, je možné síť nastavit s většími vzdálenostmi. Hustější síť ale zvyšuje nároky na výpočet a ten potom probíhá mnohem déle než u sítě řidší. Elementy sítě lze volit – vytvořené uzly mohou vytvářet například čtverce nebo trojúhelníky v 2D zobrazení. Ve 3D zobrazení je uzlová síť tvořena např. krychlemi či jehlami.



4.3. Spolupráce Inventoru a ANSYS Workbench

Podstatnou část práce v programu ANSYS zabere tvorba modelu, přiřazení okrajových podmínek plochám a materiálových vlastností tělesům. Vytvoření modelu přímo v programu ANSYS nemusí být tak uživatelsky výhodné, jako v jiném programu pro 3D modelování, například v programu Autodesk Inventor, ale lze i v ANSYSu modely vytvářet. Pokud je model vytvořen v jiném programu, je do Workbench pouze importován a modelu jsou přiřazeny okrajové podmínky a materiálové vlastnosti tělesům.

Protože se okrajové podmínky v ANSYSu přiřazují např. plochám nebo objemům, je nutné již při modelování kontrolovat nepřekrývání objemů jednotlivých prvků soustavy.

Pro importování modelu vytvořeného v programu Autodesk Inventor do Workbenche je nutné tento model uložit do jednoho z podporovaných formátů, např. .sat, .iam nebo .iges.

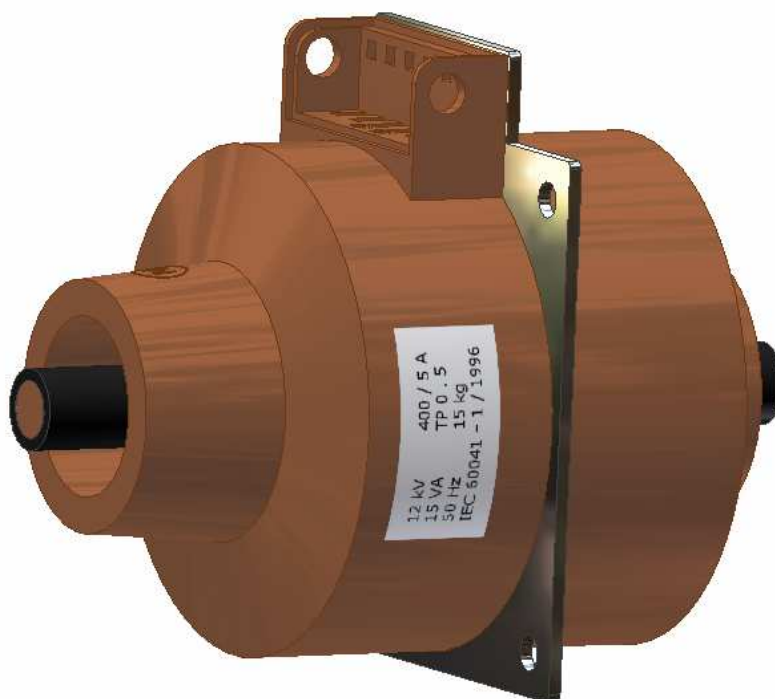
4.4. Teplotní analýza přístrojového transformátoru proudu

Postup řešení teplotní analýzy je zpravidla rozdělen do tří základních etap:

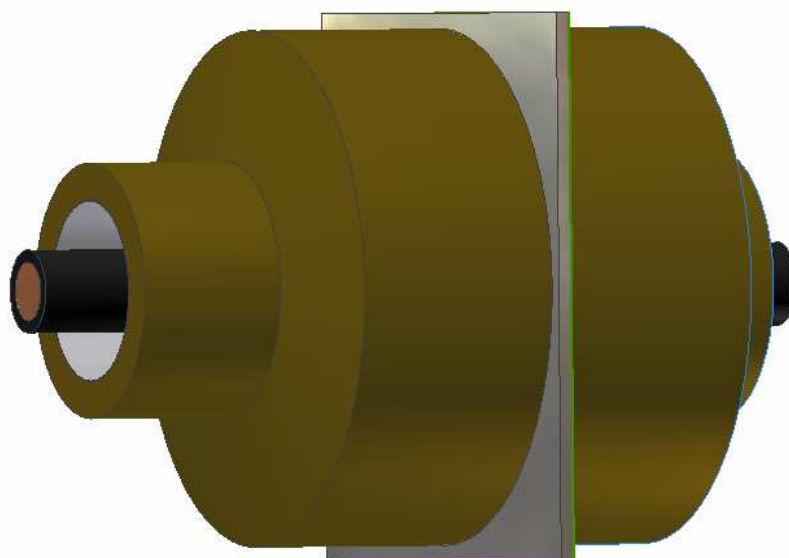
1. **PreProcessing** – v této fázi dochází k vytváření modelu a k zadání základních rozměrů (tato fáze odpadá samozřejmě v případě, že pro analýzu je použit model součásti nebo sestavy již vytvořený v jiném programu, například v Inventoru).
2. **Solution** – zde dochází k vlastnímu řešení. Probíhá zde volba analýzy, dále je v této fázi proveden výběr materiálu a jeho vlastností a generování a výpočet sítě. Dochází i k definování okrajových podmínek a všech okolních vlivů, které na analyzovaný objekt působí.
3. **PostProcessing** – v této závěrečné fázi se provádí vyhodnocení výsledků řešené úlohy. Výsledek teplotní analýzy je zobrazen v přehledném barevném vyobrazení.

4.4.1. Import do programu ANSYS Workbench

Výpočet oteplení byl prováděn na zjednodušeném modelu přístrojového transformátoru proudu (obr. 25), protože použití reálného modelu (obr. 24) nebylo po prvotních pokusech vhodné. Problém nastal hned v několika rovinách – jedním problémem bylo to, že při tvorbě modelu pro potřeby animace tvorby modelu byly některé prvky v „kolizi“, tedy některé součásti se navzájem překrývaly, případně byly, byť i minimálně, vyoseny. Dalším důvodem, proč byl pro analýzu vytvořen nový, jednodušší model byl ten, že při vytváření sítě *Mesh* pro provedení výpočtu byly na modelu vytvořeny části, které pro výpočet nejsou nutné (neovlivňují výsledek), ale zásadním způsobem ovlivňují dobu zpracování a vyhodnocení. Zjednodušení původního modelu spočívalo i v odstranění všech otvorů, svorkovnice, štítku atd.

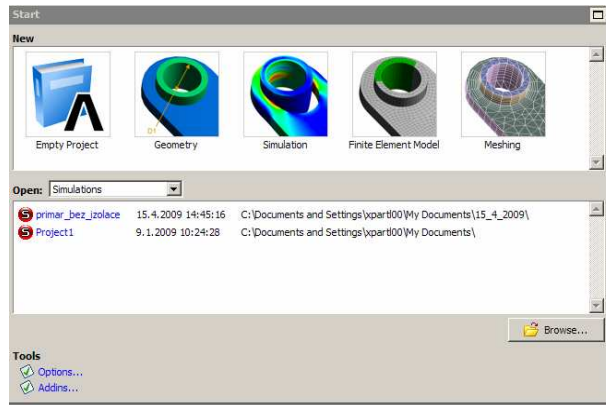


Obr. 24: Původní úplný model



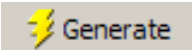
Obr. 25: Zjednodušený model

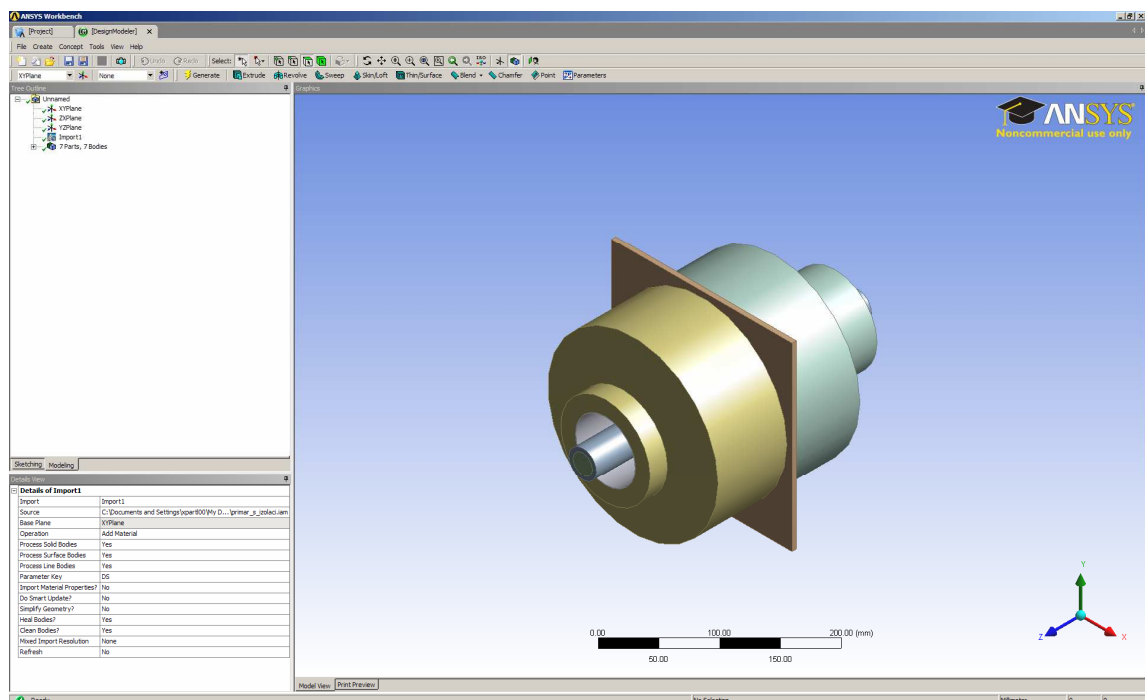
Vytvořený model tedy budeme importovat do prostředí Workbench. Při spuštění programu vytvoříme nový projekt.



Obr. 26: Start v programu ANSYS Workbench

Nejprve zvolíme volbu *Geometry* na úvodní stránce. V případě, že se tato volba neobjeví a program přímo přejde do prázdného projektu, je nutné v levém sloupci zvolit *NEW geometry* a program se přepne přímo do záložky *DesignModeler*. Zde se zvolí v levém sloupci položka *ZXPlane*. Tím je programu řečeno, která rovina je pro importovaný model půdorys.

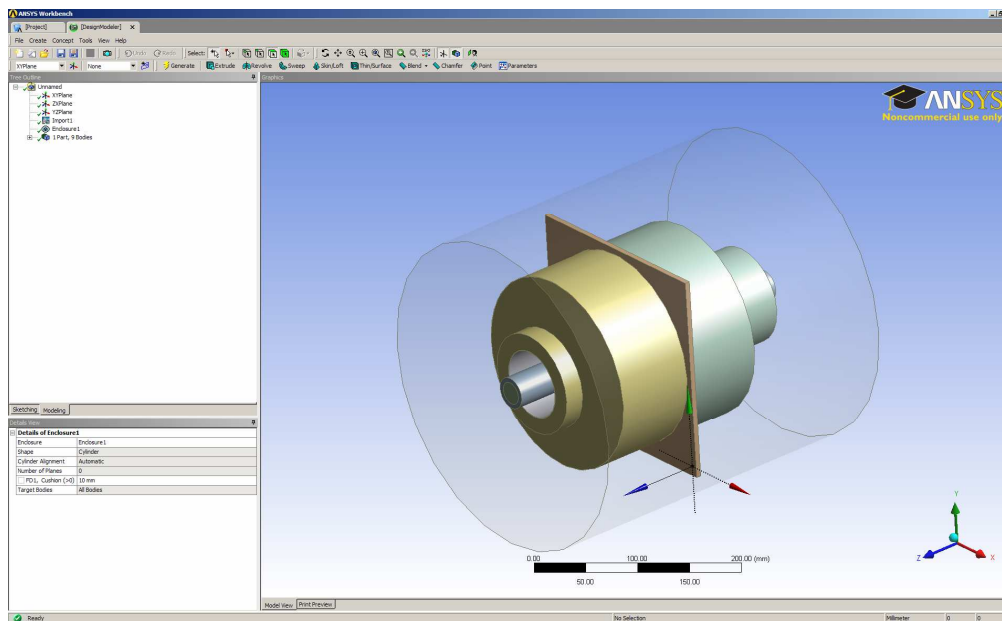
Pro vlastní import modelu je postup přes záložku *File* => položku *Import External Geometry File* a vybereme soubor vyexportovaný z modeláře. V levém sloupci v soupisu konstrukční rovin se objeví položka *Import1*. Na ni klikneme pravým tlačítkem a vybereme volbu *Generate* . Pak dojde k načtení a zobrazení modelu.



Obr. 27: Zjednodušený model importovaný do ANSYS Workbench

4.4.2. Nastavení simulace

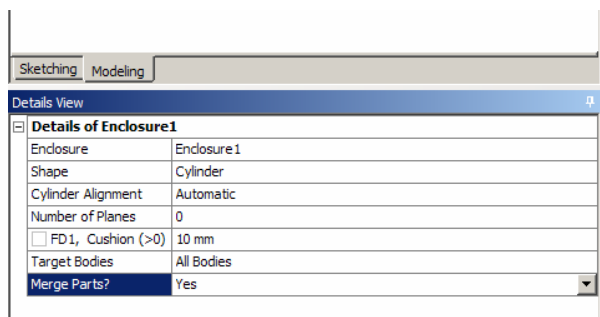
Pro další práci s modelem musíme definovat okolní prostředí. Proto jej uzavřeme do objemu, který představuje okolní prostředí - vzduch příkazem *Tools =>Enclosure*.



Obr. 28: Model uzavřený do vzduchového válce

Pro vytvoření okolí musíme v okně Details View (obr. 29) nastavit parametry:

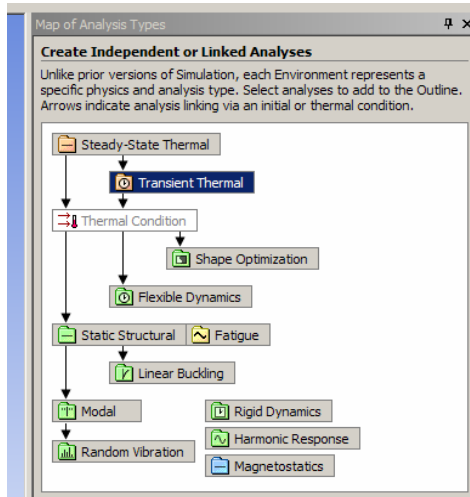
- tvar kapsy – válec (Cylinder)
- uzavření válce - ve vzdálenosti 10mm od hrany (Cushion(>0))
- spojení všech částí – YES (Merge Parts)



Obr. 29: Nastavení parametrů vzduchové kapsy

Po nastavení vlastností je nutné opět stisknout tlačítko *Generate*. Model je v tuto chvíli uzavřen do vzduchu (definovaného prostředí). Takto nastavený model je vhodné uložit, poté se přepneme do záložky *Project* a zvolíme *New Simulation*.

Model je vložen do simulace a dalším krokem je volba teplotní analýzy: *Transient Thermal*.

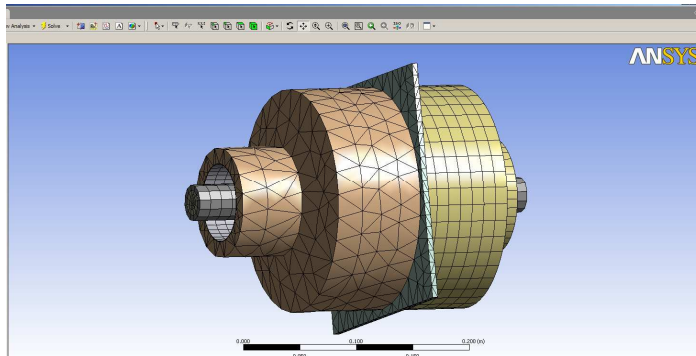


Obr. 30: Výběr typu analýzy

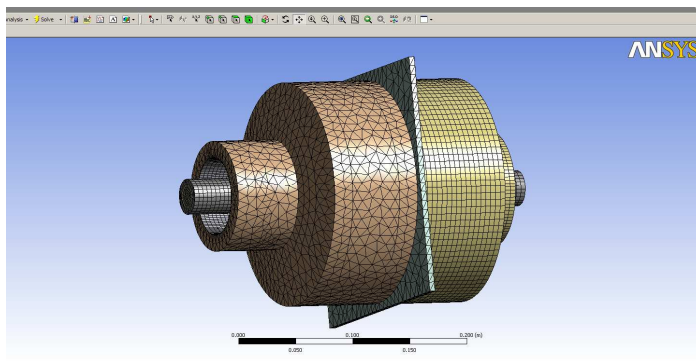
Pro další výpočet vytvoříme síť *Mesh*. Vytvoření sítě můžeme nastavit s různou hodnotou, případně měnit tuto hustotu ve vlastnostech *Meshe*. Hustota sítě byla při výpočtech pro jmenovitý proud měněna, ale na výsledek měla pouze zanedbatelný vliv. Hustota zvolené sítě ovlivňuje dobu vytváření této sítě. Pro výpočet byla zvolena přednastavená hustota sítě. Po nastavení hustoty sítě *Mesh* stiskneme tlačítko *Generate Mesh* pro vygenerování sítě.

Details of "Mesh"	
Defaults	
Physics Preference	Electromagnetics
Relevance	0
Advanced	
Relevance Center	Medium
Element Size	Default
Shape Checking	Electromagnetics
Solid Element Midside Nodes	Kept
Straight Sided Elements	Yes
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Statistics	
Nodes	166224
Elements	88216

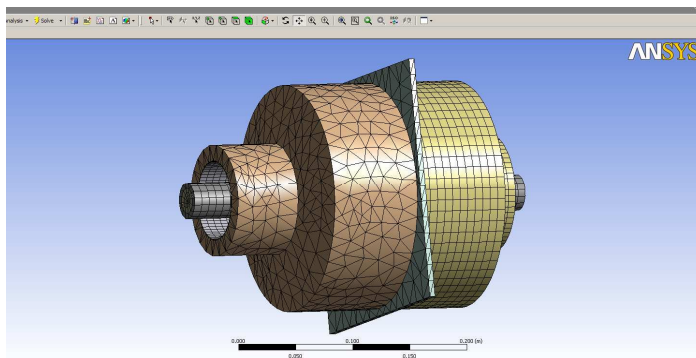
Obr. 31: Nastavení sítě *Mesh*



Obr 32 a): Malá hustota sítě Mesh

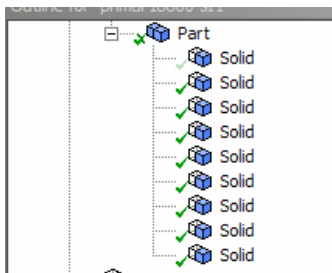


Obr 32 b): Velká hustota sítě Mesh



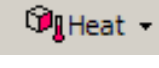
Obr. 32 c): Střední hustota sítě Mesh

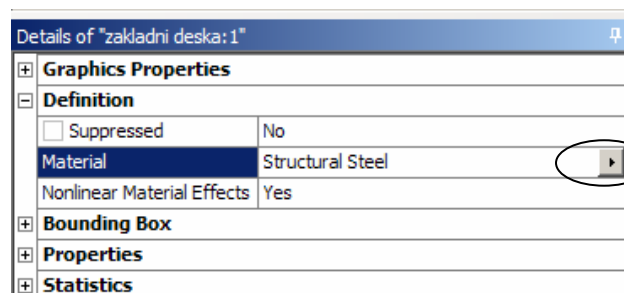
V levém okně v *Projekt - Geometry – Part* jsou znázorněny jednotlivé vygenerované prvky, které jsou implicitně pojmenovány *Solid*. V tomto bodě je vhodné si jednotlivé části pojmenovat pro jednodušší identifikaci jednotlivých prvků modelu přístroje, například při vypínání viditelnosti atp. Přejmenování je možné po na určitý prvek (*Solid* v seznamu) a stiskem funkční klávesy F2 název prvku přepsat.



Obr. 33: Vygenerované prvky po vytvoření Mesh

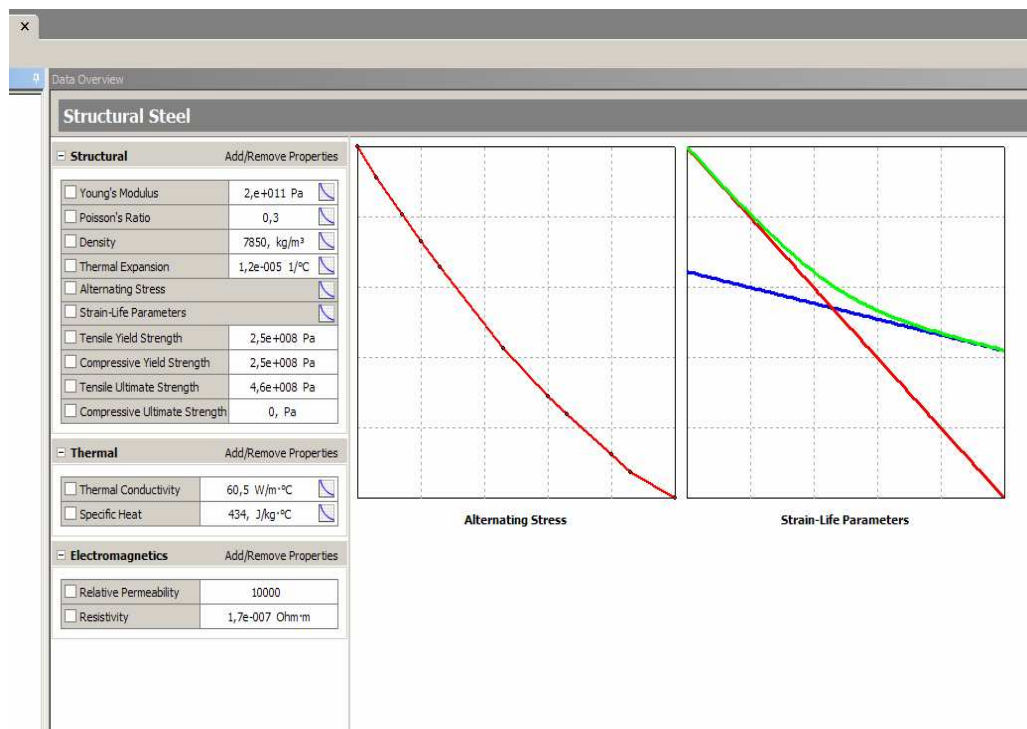
Po vytvoření sítě Mesh je ještě nutné pro požadovanou teplotní analýzu zadat teploty, které budou v přístroji působit a zejména místa působení (zdroje tepla).

Teplu, vzniklé působením ztrát, bude působit v primárním vodiči, teplo, vzniklé ztrátami v jádru transformátoru a v sekundárním vinutí budou prezentovány jako jeden zdroj tepla – podle předešlých výpočtů v kapitole 3.4.3. ztráty v jádře zanedbáváme. Vložíme tedy dva zdroje tepla. Klikneme na tlačítko  a vybereme *Internal Heat Generation*. Takto označíme primární vodič (pouze měděný vodič) a vytvořené jádro se sekundárním vinutím. Jednotlivým prvkům (dílům) přístroje ještě musíme přiřadit materiály. Příklad je zobrazen na obr. 34 a 35 pro základní desku. Stejným způsobem provedeme přiřazení materiálu všem prvkům. V analyzovaném zjednodušeném modelu jsou použité materiály: vzduch, měď, epoxidová pryskyřice a ocel.



Obr. 34: Nastavení parametrů základní desky

Kliknutím na rozbalovací šipku se zobrazí možnost výběru nového materiálu nebo editaci zvoleného materiálu, viz obr. 35



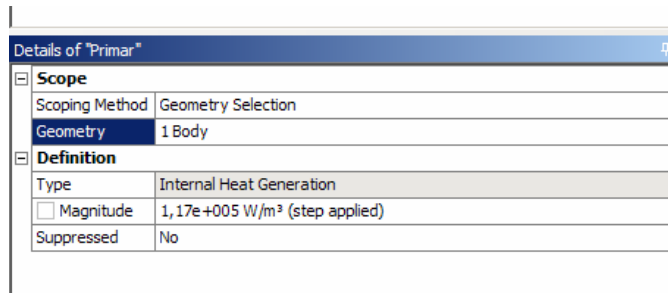
Obr. 35: Okno editace přednastavených parametrů materiálu

Důležitými prvky pro spuštění teplotní analýzy jsou v *Thermal* položka *Thermal Conductivity* (tepelná vodivost) a v *Structural* položka *Density* (hustota).

Po výběru zdrojů tepla je správně provedené zadání je označeno ✓ v rozbaleném stromu *Project* u *Temperature* a *Temperature 2*. Pro další práci si tyto názvy přepíšeme stejným způsobem jako u změny názvů jednotlivých prvků přístroje – primární vodič na „Primár“ a sekundární vinutí na „Sekundár“. Teplota materiálu je nastavena na běžnou pokojovou teplotu přednastavenou na 22°C, Symboly ⚡ jsou označeny ty položky, u kterých ještě nebyl proveden výpočet. V případě, že by se objevil !, tak je u označené položky nějaký problém (špatně zadaná hodnota, případně nezadaná některá hodnota potřebná pro teplotní analýzu, kolize při provádění výpočtu atd.).

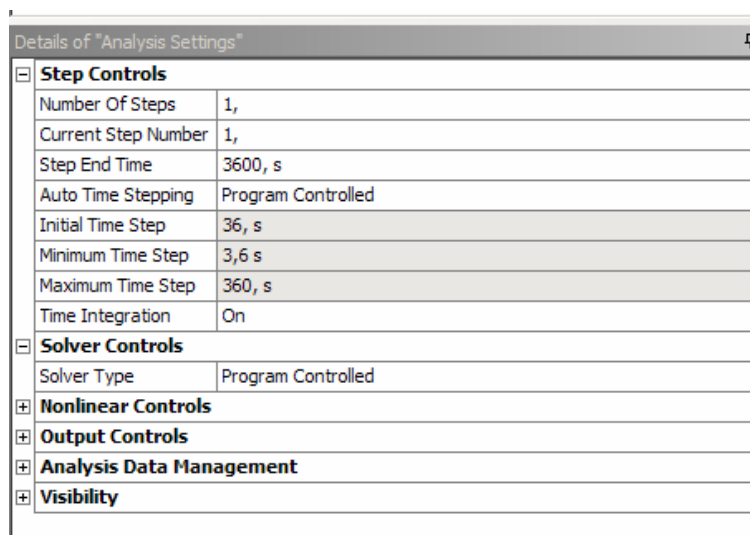
Protože oteplení je prezentováno ztrátami W/m^3 , je nutné nejprve vypočítat ztráty v primárním vodiči při jednotlivých nadproudech (ztráty v sekundárním vinutí jsou vypočítány v kap. 3.4.3. tab. 8) a následně tyto ztráty přepočítat na objem m^3 .

Celý výpočet zde nebude uváděn, jen textem bude naznačen výpočet ztrát pro použitelnou hodnotu W/m^3 pro teplotní výpočet. Odpor vodiče přepočteme na modelovou délku 0,32m, vypočteme ztráty pro jednotlivé nadproudy a pro daný průměr měděného jádra vypočteme objem. Ztráty ve vodiči potom přepočítáme na objem m^3 .



Obr. 36: Detail nastavení působení tepla v primárním vodiči pro 1000A

Stejným způsobem je zapotřebí nastavit i ztráty v sekundárním vinutí. Nakonec je ještě nutno nastavit požadované parametry analýzy, jako je celkový čas, minimální a maximální časový krok atd. viz obr. 37.



Obr. 37: Nastavení požadovaných parametrů

Pokud jsou tedy zadány správně všechny hodnoty, je možné příkazem *Solve* spustit výpočet teplotní analýzy.

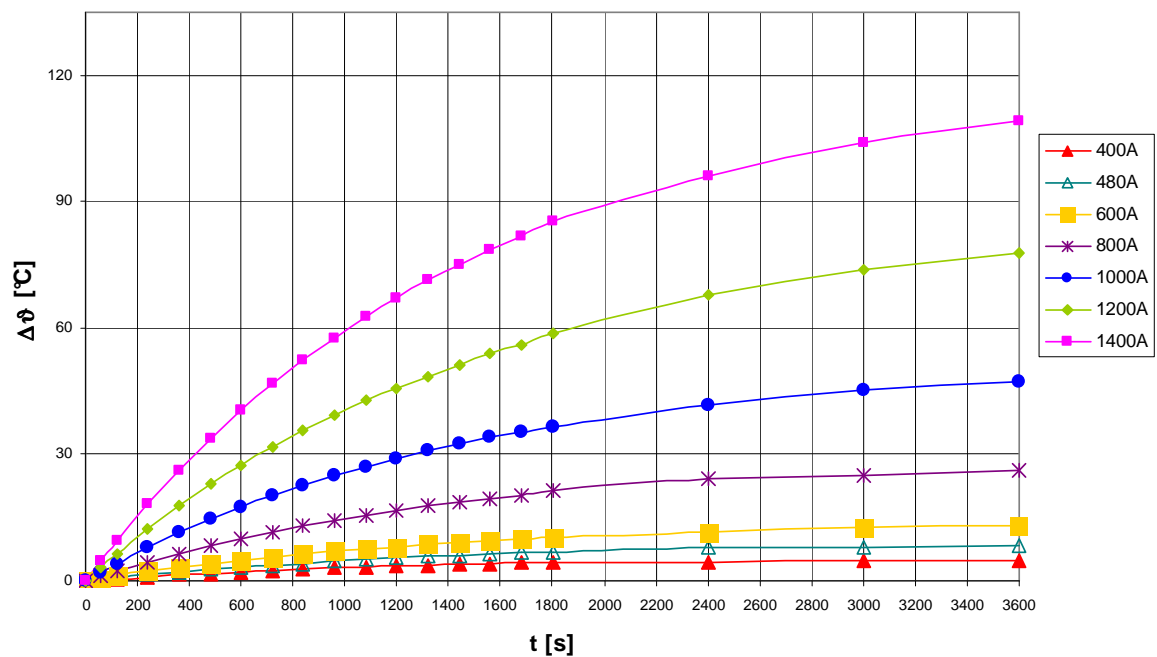
4.4.3. Výsledek teplotní analýzy

Výsledek teplotní analýzy je možné vidět na následujících grafech a obrázcích. Analýza byla prováděna ve dvou režimech – poprvé byl jako zdroj tepla v důsledku ztrát uvažován pouze primární vodič, ve druhém případě byly zdroje tepla jak primární vodič tak i sekundární vinutí. Jak je vidět z grafů 2 a 3, oteplení v důsledku průchodu nadproudu sekundárním vinutím má vliv na celkovou tepelnou bilanci, ale malý a zejména při větších nadproudech. Výsledné hodnoty z průběhu simulace jsou postupně zaznamenávány do tabulky (obr. 38)

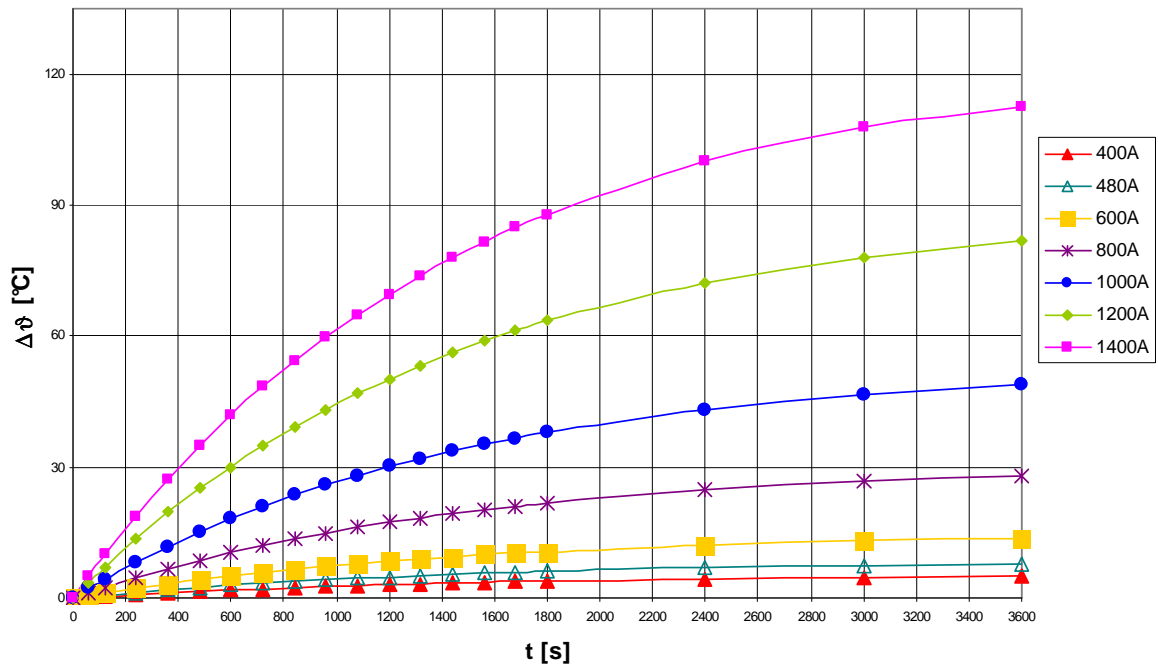
a tyto hodnoty byly následně exportovány do formátu .xls, a z nich byly vytvořeny výsledné grafy.

Tabular Data			
	Time [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]
1	36,	21,896	24,498
2	70,238	21,983	25,151
3	104,48	21,992	25,564
4	207,19	22,	28,167
5	515,33	22,	33,728
6	875,33	22,	38,048
7	1235,3	22,	40,999
8	1595,3	22,	43,068
9	1955,3	22,	44,555
10	2315,3	22,	45,648
11	2675,3	22,	46,467
12	3035,3	22,	47,094
13	3395,3	22,	47,579
14	3600,	22,	47,818

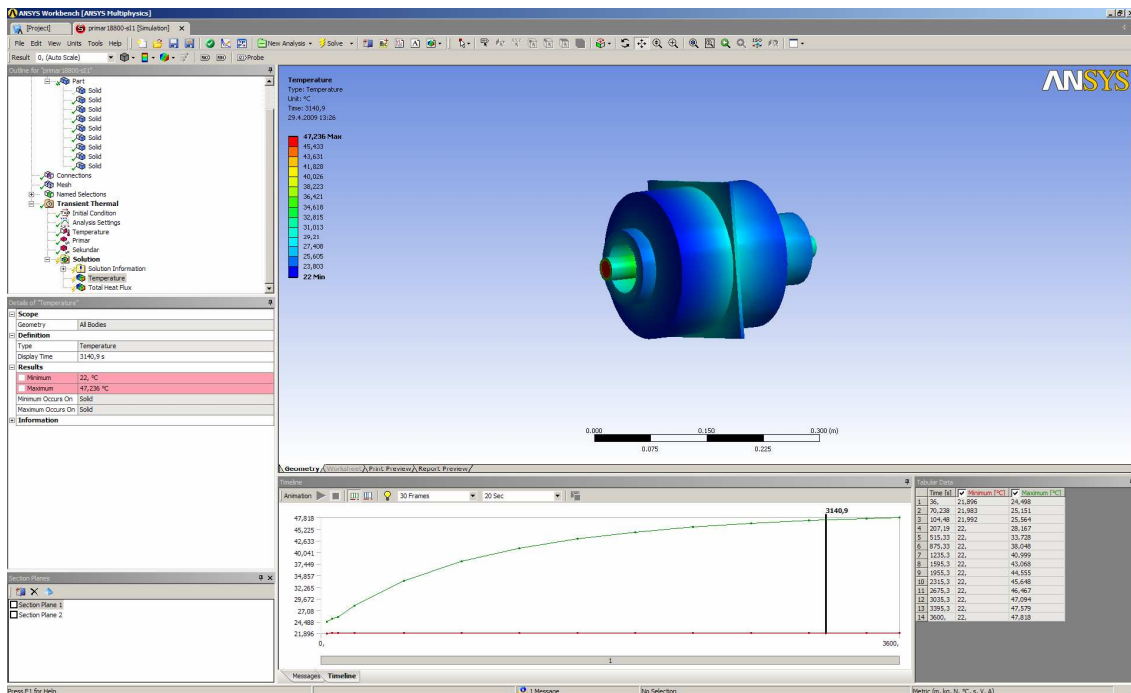
Obr. 38: Výsledná tabulka hodnot pro $I_1=800A$, $I_2=10A$



Graf 2: Oteplovací křivky oteplení primárního vodiče

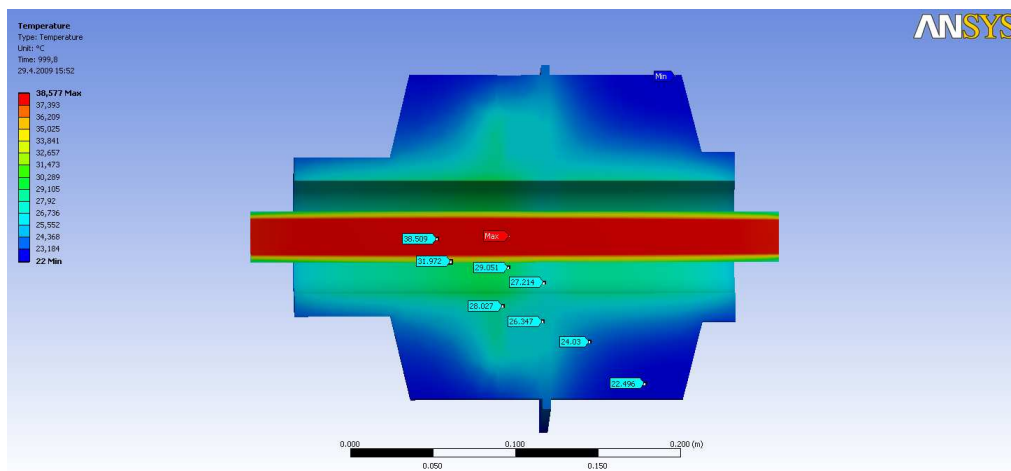


Graf 3: Oteplovací křivky oteplení primárního vodiče a sekundárního vinutí

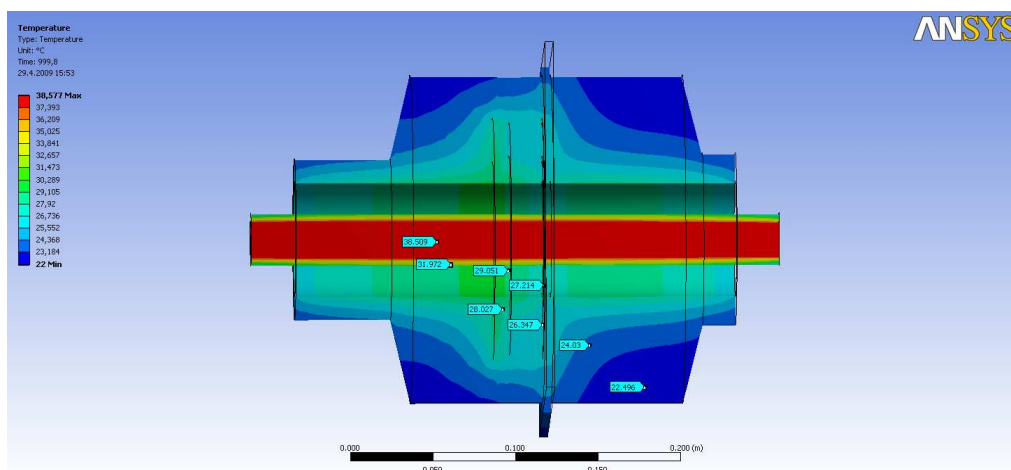


Obr. 39: prostředí ANSYS Workbench po ukončení výpočtu

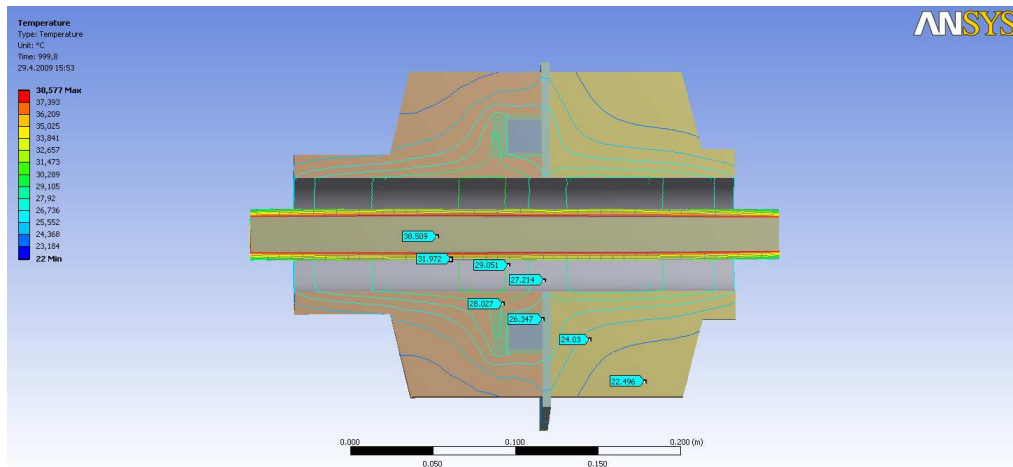
Na obr. 39 je vyobrazena celá obrazovka programu ANSYS Workbench po provedené teplotní analýze oteplení přístrojového transformátoru proudu při působení oteplení primárního vodiče i sekundárního vinutí. V hlavní části je znázorněn model s rozložením teploty po povrchu (na dalších obrázcích jsou potom znázorněny řezy) se sloupcem znázorňujícím barvy přiřazené teplotám, ve spodní části je výsledná křivka závislosti teploty na čase a v levé části jsou nastavené hodnoty a shrnutí. Výsledky je možné zobrazovat v různých režimech, jako je zapnutí/vypnutí viditelnosti hran, volbou *Probe* je možné zobrazit teploty v konkrétních bodech, znázornění teplotních izolinií a další.



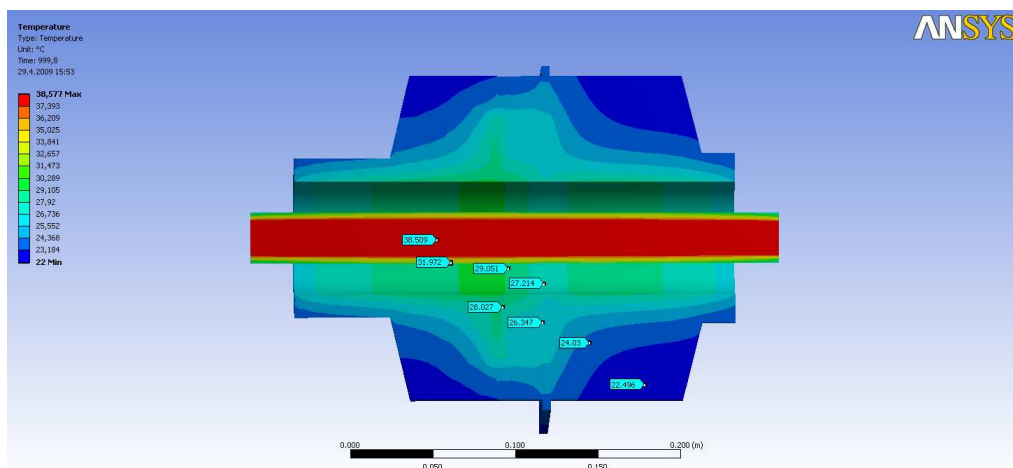
Obr. 40: Znázornění teplotních bodů v řezu



Obr. 41: Zapnutí viditelnosti hran jednotlivých částí

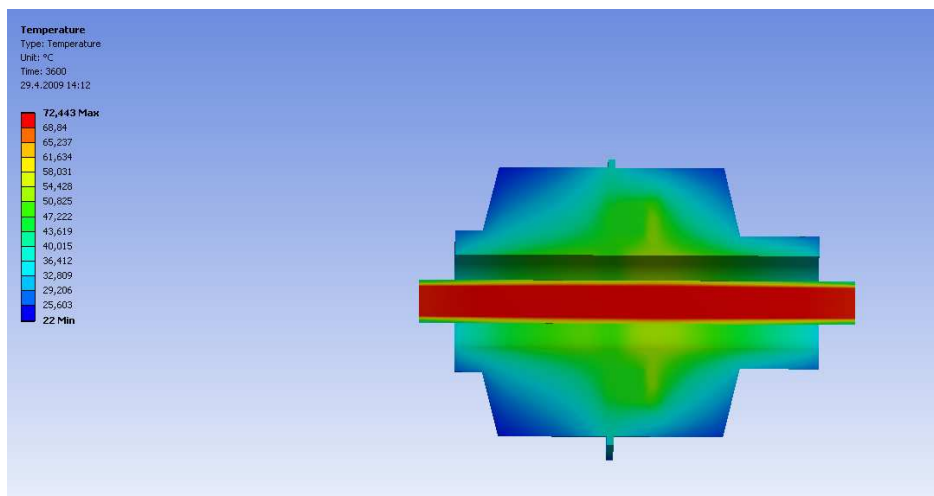


Obr. 42: Znáznornění izolinií teplot

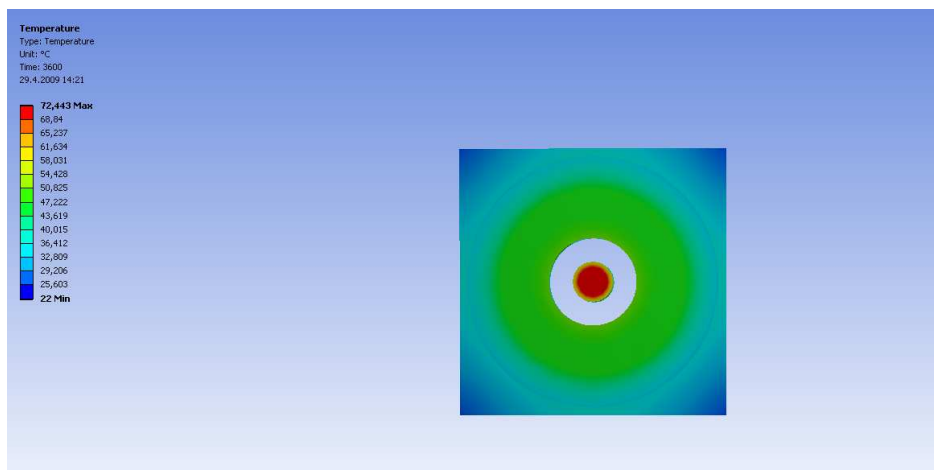


Obr. 43: Ohraničení teplotních pásem

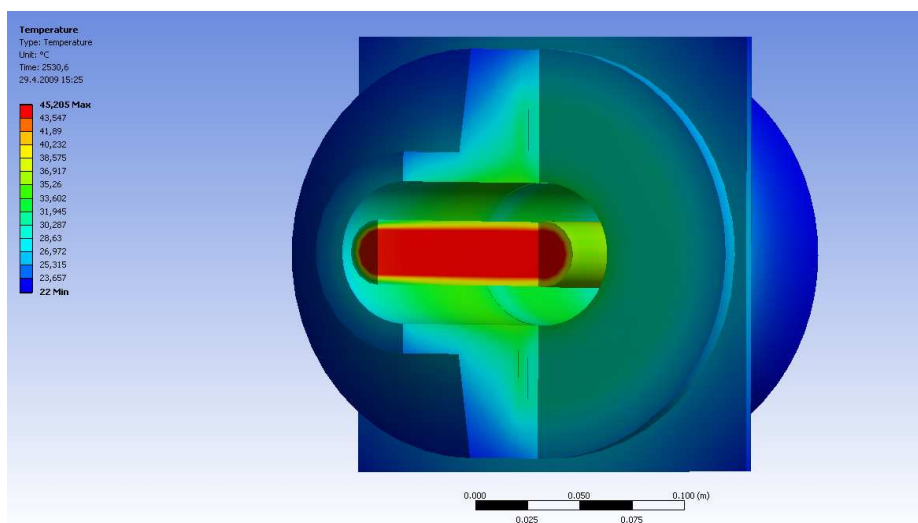
Jak již bylo zmíněno, oteplení transformátoru bylo analyzováno pro různé hodnoty nadproudů procházejících primárním i sekundárním vinutím. Na obr. 44 a 45 je rozložení teploty při proudech $I_1=1000\text{A}$ a $I_2=12,5\text{A}$. Vlevo je zobrazeno barevné přiřazení jednotlivým teplotám.



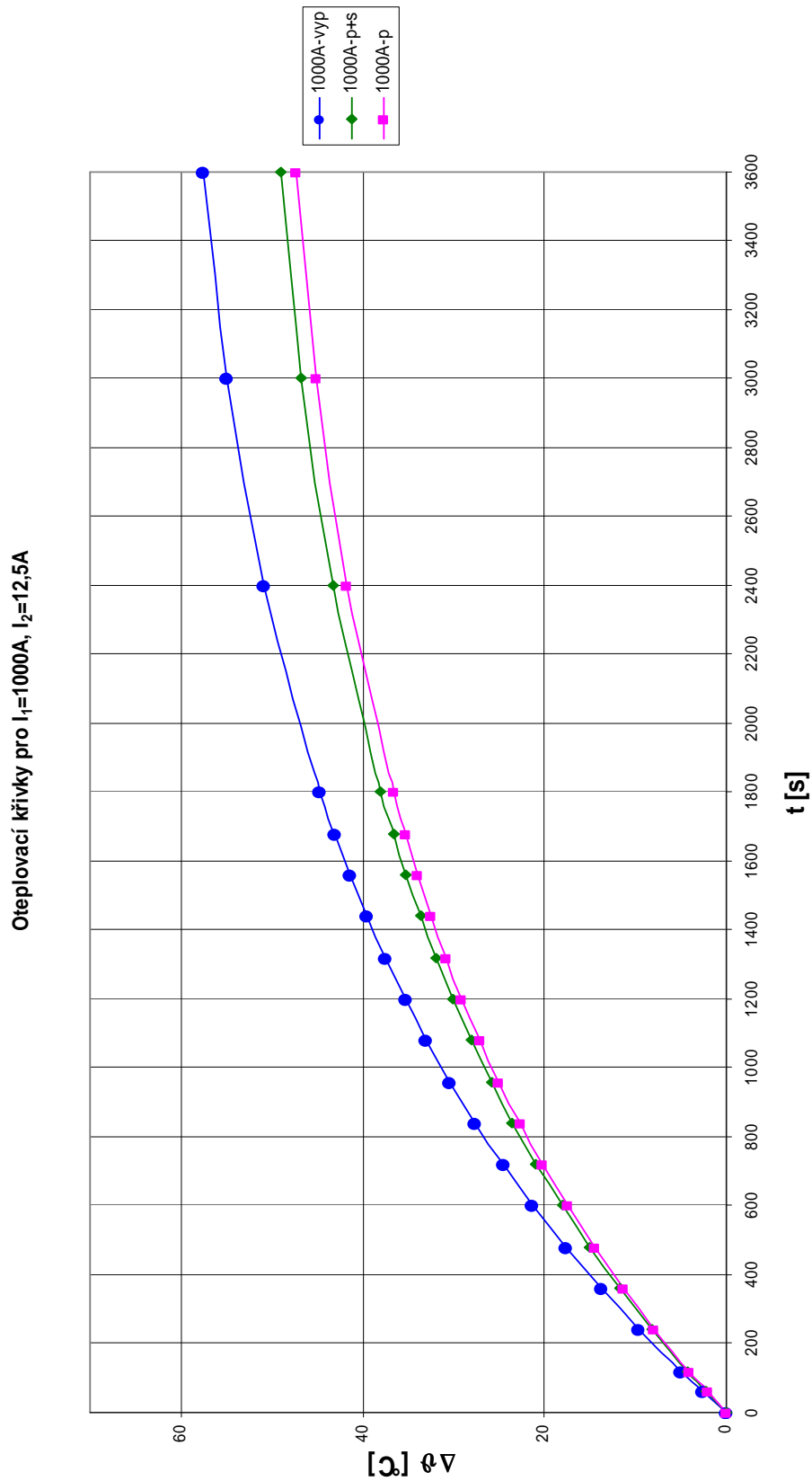
Obr. 44: Podélný řez



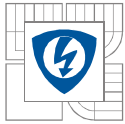
Obr. 45: Příčný řez



Obr. 46: Další možnost řezu – částečný řez



Graf 4: Oteplovací křivky vypočtených hodnot a výsledných hodnot tepelné analýzy pro $I_1=1000A$ a $I_2=12,5A$



5. Závěr

5.1. Shrnutí diplomové práce

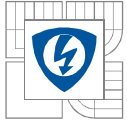
Obsah diplomové práce je rozdělen do dvou tematických částí. V první části se práce zabývá využitím moderního programu Raster Design pro tvorbu elektronických databází výkresů, které jsou k dispozici pouze v papírové podobě. Druhá tematická část je zaměřena na přístrojový transformátor proudu se zaměřením na oteplení při průchodu různých hodnot nadproudů. Ve druhé části práce je proveden výpočet oteplení, ve třetí části je oteplení analyzováno pomocí programu ANSYS Workbench.

V části věnované tvorbě elektronických databází výkresů je seznámení s jedním z nejvíce rozšířených programů pro převádění papírových výkresů do elektronické podoby, s programem Raster Design 2009, který je vytvořený společností Autodesk a úzce spolupracuje s ostatními CAD aplikacemi. Tento program umožňuje komplexní práci s výkresovou dokumentací. Importovat je možno jakýkoliv obrázek uložený v běžných formátech, jako jsou např. formáty .bmp, .gif, .jpg a další. V práci je uveden postup při převádění skenovaného výkresu včetně základního nastavení. To je důležité pro zpřesnění a také usnadnění (zrychlení) samotné práce. Importování je první krok, na který navazují další, například opravení zešikmení, odstranění nečistot, což bývá běžný problém u starší dokumentace a další potřebné úpravy. Na závěr je provedena vektorizace, tedy převedení rastrových čar, kružnic a dalších objektů na vektory a provedení vektorizace textu v dokumentu, aby mohl být výkres uložen v požadované podobě, jako výkres formátu .dwg. Takto uložený výkres dává další možnost práce s ním například v Inventoru, kdy po vložení do formátu prázdné šablony Norma.ipt je možné provádět další úpravy včetně výsledného zobrazení v 3D modelu atd.

Ve druhé části diplomové práce, kde je proveden výpočet oteplení přístrojového transformátoru proudu (PTP), je na úvod popsáno jejich základní rozdělení a jsou uvedeny základní typy. Dále je popsána funkce PTP včetně fázorových diagramů, chyb transformátoru a provedení korekce a teoretický rozbor chování transformátoru v oblasti nadproudů a zkratů. Pokud hovoříme o teplení vlivem ztrát v transformátoru, je potřeba uvažovat se všemi zdroji tepla. Ty jsou tři – oteplení způsobené:

- ztrátami v primárním vinutí (při použití průvlakovém transformátoru je primární vinutí tvořeno primárním vodičem)
- ztrátami v sekundárním vinutí
- ztrátami v magnetickém obvodu

Nejprve je proveden výpočet ztrát v primárním vodiči při různých hodnotách nadproudu procházejícím tímto vodičem a výsledné hodnoty zobrazeny v grafu 1. V dalším bodě je výpočet chyb a magnetické indukce pro jednotlivé hodnoty sekundárního proudu při jmenovité zátěži pro transformátor s převodem 400/5A. Z výsledků shrnutých v tabulce 7 je patrné, že při proudech vyšších jak 3,5 násobek jmenovitého sekundárního proudu dojde k přesycení jádra. Pokud by měl být transformátor provozován i v oblasti vyšších nadproudů, musely by se upravit parametry transformátoru, ovšem tyto úpravy by mohly ovlivnit jiné požadované parametry, jako například nadproudové číslo. Ztráty v sekundárním vinutí jsou shrnuty v tabulce 8 a vzhledem k nízkým výsledným hodnotám jsou tyto hodnoty použity

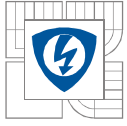


jako zdroj tepla při teplotní analýze v poslední části. Ztráty v magnetickém jádře byly ve výpočtech a v simulaci zanedbány úplně, protože vzhledem k vypočtené maximální hodnotě (při maximálním nadproudu) se dá předpokládat, že nebudou zásadním způsobem ovlivňovat celkové oteplení.

V poslední části je provedena teplotní analýza oteplení přístrojového transformátoru proudu v programu ANSYS Workbench. Program pracuje na principu metody konečných prvků, tedy rozdělení tělesa na malé části – vytvoření uzlové sítě. Popsána je také spolupráce s programem Inventor, protože i když je možné vytvoření modelu přímo ve Workbench, je možné vytvořit modelu např. v Inventoru a následně již vytvořený model importovat. Pro teplotní analýzu byl vytvořen zjednodušený model, protože vytváření sítě Mesh na reálném modelu by bylo časově náročné, stejně tak jako následně prováděná teplotní analýza. Výsledné hodnoty teplotní analýzy jsou znázorněny v grafech 2 a 3 – graf 2 znázorňuje oteplení pouze v primárním vodiči, do grafu 3 je zahrnuto působení všech zdrojů tepla v transformátoru. V grafu 4 je porovnání teplot pro primární proud $I_1=1000\text{A}$ a sekundární proud $I_2=12,5\text{A}$ mezi hodnotami vypočtenými v tabulce 4 (modrá křivka ozn. 1000Avyp), výslednými hodnotami z teplotní analýzy v ANSYS při průchodu proudu pouze primárním vodičem (růžová křivka ozn. 1000Ap) a s výslednými hodnotami z teplotní analýzy v ANSYS při průchodu proudu primárním i sekundárním vinutím (zelená křivka ozn. 1000Ap+s). Porovnáním všech grafů lze konstatovat:

- 1) Oteplení způsobené ztrátami v sekundárním vinutí představuje nárůst (při jejich uvažování) v oteplení o asi 3-5% podle velikosti nadproudu - grafy 2 a 3.
- 2) Rozdíl mezi vypočítaným oteplením primárního vodiče a oteplením primárního vodiče na základě výsledků teplotní analýzy provedené programem ANSYS Workbench je asi 15-20% - vypočítané hodnoty jsou vyšší – grafy 1 a 2.

Rozdílné hodnoty mezi vypočtenými hodnotami a hodnotami z ANSYS mohou být způsobeny několika faktory, například rozdílnými hodnotami použitých materiálů nadefinovaných při výpočtu.



5.2. Seznam použité literatury

- [1] Král J., Vaněk J.: Elektromagnetické přístroje. Skriptum VUT Brno, 1984
- [2] Juřina P: Diplomová práce. FEKT VUT Brno, 2005
- [3] Technické podklady společnosti Xanadu a.s.
- [4] Náповěda aplikace Inventor Series
- [5] Náповěda k programu ANSYS Workbench
- [6] <http://www.xanadu.cz>
- [7] <http://www.elektrorevue.cz>
- [8] http://www.techsoft-eng.cz/ansys_workbench_entry_solver_product/