

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh přístrojového transformátoru

Vedoucí práce: Ing. Jan Sedláček, Ph.D.

2021

Autor: Josef Kozojed

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Josef KOZOJED**
Osobní číslo: **E18B0129P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Návrh přístrojového transformátoru**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte úvodní přehled typů a použití přístrojových transformátorů.
2. Navrhněte přístrojový transformátor zadaného typu a parametrů.
3. Zhodnoťte navržené řešení.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

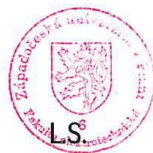
1. Král, J., Vaněk, J.: Elektromagnetické přístroje. VUT Brno 1984.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Sedláček, Ph.D.**
Nové technologie – výzkumné centrum

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Cílem této práce je návrh přístrojového transformátoru proudu pro síť nízkého napětí. Dále je v této práci rozebrána základní problematika přístrojových transformátorů a druhy jejich provedení.

Klíčová slova

Přístrojový transformátor, přístrojový transformátor proudu, návrh přístrojového transformátoru proudu, chyba proudu, chyba úhlu

Abstract

The aim of this thesis is design of current instrument transformer for low voltage grid. Basic issues of instrument transformers and design types are discussed in the thesis.

Key words

Instrument transformer, current instrument transformer, design of instrument transformer, ratio error, phase displacement

Prohlášení

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

Dále prohlašuji, že software použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

Podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Josef Kozojed

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Sedláčkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Obsah.....	8
Úvod.....	9
Seznam symbolů a zkratk.....	10
1. Problematika přístrojových transformátorů.....	11
1.1. Magnetizační křivka a hysterezní smyčka.....	12
1.2. Princip činnosti přístrojového transformátoru proudu.....	13
1.3. Chyby přístrojového transformátoru proudu.....	14
1.3.1. trojúhelníková chyba.....	14
1.3.2. celková chyba.....	14
1.3.3. Závislosti chyb na jednotlivých veličinách.....	14
1.3.3.1. Závislost na proudu.....	14
1.3.3.2. Závislost na břemeni.....	14
1.3.3.3. Závislost na sekundárním účinníku.....	15
1.3.3.4. Závislost na kmitočtu.....	15
1.4. Normativní požadavky.....	15
1.4.1. Jmenovitá zátěž SN.....	15
1.4.2. Chyba proudu ε	16
1.4.3. Chyba úhlu $\Delta\varphi$	16
1.4.4. Třída přesnosti.....	16
1.4.5. Celková chyba.....	16
1.4.6. Budicí charakteristika.....	16
1.5. Oteplení přístrojového transformátoru.....	17
2. Přehled přístrojových transformátorů proudu nízkého napětí.....	18
2.1. Přístrojové transformátory proudu.....	18
2.2. Základní konstrukční typy přístrojových transformátorů proudu.....	18
2.2.1. Jednozávitové transformátory proudu.....	18
2.2.2. Závitové transformátory proudu.....	20
2.3. Jistící transformátory proudu.....	21
2.4. Měřicí transformátory proudu.....	21
2.5. Shrnutí principu návrhu.....	22
3. Návrh přístrojového transformátoru.....	23
3.1. Výpočet počtu závitů.....	23
3.2. Výpočet průřezu primárního vodiče.....	23
3.3. Výpočet parametrů sekundárního vinutí.....	24
3.4. Výpočet rozměrů magnetického obvodu.....	25
3.5. Návrh vlastního jádra.....	25
3.6. Kontrola nadproudového čísla.....	26
3.7. Výpočet chyby.....	29
3.7.1 Příklad výpočtu pro 1% jmenovitého proudu.....	29
3.8. Vyhodnocení návrhu PTP.....	32
Závěr.....	35
Seznam literatury a informačních zdrojů.....	36
Příloha.....	37

Úvod

Předložená práce pojednává o návrhu přístrojového transformátoru proudu pro nízké napětí.

Obsah práce je rozdělen do 3 částí.

V první části se seznámíme s teoretickou částí o přístrojových transformátorech, magnetizačních parametrech, základech principu činnosti a chybách přístrojového transformátoru. Dále jsou zde vypsány základní normativní požadavky na přístrojové transformátory proudu.

Druhou část tvoří rozdělení druhů transformátorů s ukázkami konstrukce. Následuje rozdělení přístrojových transformátorů na měřicí a jistící, základy teorie o oteplení transformátoru a shrnutí principu návrhu.

Třetí část tvoří samotný návrh přístrojového transformátoru podle zadaných parametrů. Pro navržený transformátor jsou spočteny chyby proudu a fáze. Posledním krokem je vyhodnocení návrhu podle požadavků na chyby obsažených v normě.

Seznam symbolů a zkratek

PTP	přístrojový transformátor proudu
N_s [-]	počet sekundárních závitů
N_p [-]	počet primárních závitů
I_{pr} [A]	jmenovitý primární proud
I_{sr} [A]	jmenovitý sekundární proud
I_{th} [A]	jmenovitý krátkodobý proud
B [T]	magnetická indukce
f [Hz]	napájecí frekvence
P_r [W]	jmenovitý výkon
R_{ct} [Ω]	odpor sekundárního vinutí
P_{ct} [W]	vnitřní zátěž při jmenovitém proudu
Z_b [Ω]	jmenovité břemeno
R_b [Ω]	činná složka jmenovitého břemene
$\cos(\varphi)$ [-]	účinnost jmenovité zátěže
X_b [Ω]	jalová složka jmenovitého břemene
P_b [W]	činná složka jmenovité zátěže
Q_b [VAr]	jalová složka jmenovité zátěže
P_s [VA]	celková hodnota zátěže při jmenovitém proudu
a_g [A/m]	měrný činný budící proud
p_{Fe} [W/kg]	měrné ztráty ve feromagnetiku
I_{s0} [A]	celková chyba transformátoru
ε [%]	chyba proudu
$\Delta\varphi$ [min]	chyba úhlu

1. Problematika přístrojových transformátorů

Při měření velkých hodnot napětí a proudu jsou kladeny vysoké nároky na bezpečnost obsluhy, připojených měřících přístrojů a zařízení. Z toho důvodu se používají přístrojové transformátory, které sníží měřené veličiny na standardizované hodnoty. Dále se také omezí působení silného elektrického a magnetického pole na vlastní měřicí přístroj.

Dělení přístrojových transformátorů:

1. Podle transformované veličiny
 - transformátory proudu
 - transformátory napětí

2. Podle funkce
 - měřicí transformátory
 - jistící transformátory

3. Podle umístění
 - pro venkovní montáž
 - pro vnitřní montáž

4. Podle principu
 - induktivní
 - odporový dělič
 - kapacitní dělič
 - Rogowskiho cívka

Práce se zaměřuje na zadaný typ induktivního měřicího přístrojového transformátoru proudu. Další popisy jsou proto směřovány k tomuto typu.

Mezi nevýhody klasických induktivních přístrojových transformátorů patří nelineární magnetizační charakteristika magnetického jádra. V oblasti nasycení feromagnetika se magnetizační charakteristika odkloní od ideální lineární charakteristiky. Pro zvýšení rozsahu lineární části se musí vhodně dimenzovat magnetický obvod. Výrazné je to zejména u jistících transformátorů proudu. Musí se s nimi uvažovat už při návrhu a dostatečně dimenzovat magnetický obvod. Přesycení jádra má také pozitivní vliv. U přístrojových transformátorů proudu tím dochází k omezení sekundárního proudu. Jsou tak chráněna měřicí zařízení před účinky poruchových proudů.

S aplikací magnetického obvodu jsou spojeny také provozní ztráty. Hysterezní ztráty vznikají přemagnetováním feromagnetika. Vzniká tak neúčinné teplo, které je úměrné ploše

hysterezní smyčky. Tyto ztráty lze omezit použitím materiálů s velmi úzkou hysterezní smyčkou, jako jsou například permalloye. Ztráty vířivými proudy jsou Jouleovo ztráty vznikající uzavíráním indukovaného proudu v magnetickém jádře. Pro zmenšení lze použít materiál s nižší elektrickou vodivostí a rozdělení magnetického obvodu na skládané plechy.

1.1. Magnetizační křivka a hysterezní smyčka

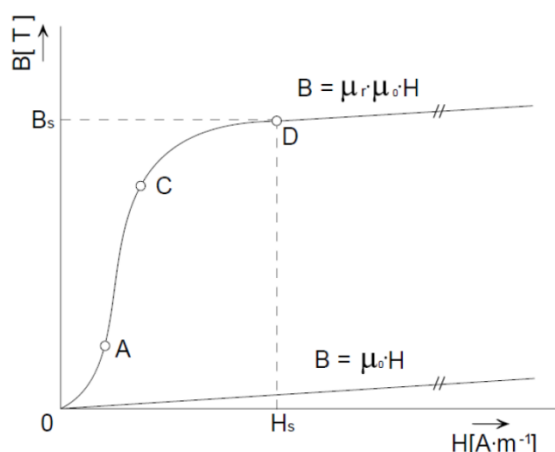
Magnetizační křivka je grafické vyjádření závislosti magnetizace látky na vnějším magnetickém poli. V tzv. nemagnetickém stavu jsou magnetické domény rozloženy tak, aby bylo výsledné magnetické působení nulové.

Do tohoto stavu lze feromagnetikum dostat zvýšením teploty nad Curieovu teplotu. Domény se tak natočí do nepravidelných směrů a vlastní magnetické pole zanikne. Druhou možností je vystavit materiál vnějšímu magnetickému poli definovaných vlastností, které vychýlí domény.

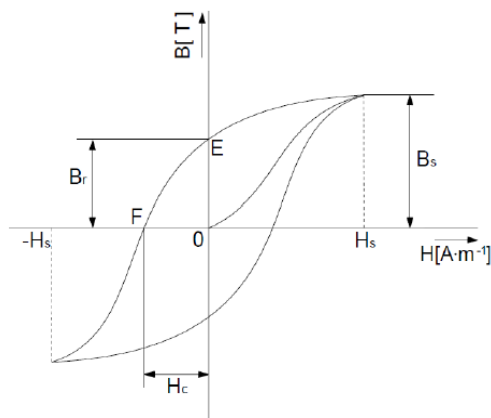
Na Obr. 1.1 je znázorněna křivka prvotní magnetizace. Jedná se o přechod z nemagnetické části charakteristiky až do oblasti nasycení. Od počátku charakteristiky do bodu A nastává vratný magnetický děj. Tyto změny se za bodem A stávají nevratnými. V blízkosti bodu C se začínají stáčet domény a vektor spontánní magnetizace má totožný směr se směrem pole. Za bodem C už se zvyšuje pouze absolutní hodnota vektoru magnetizace. Jedná se o tzv. paraprocess. Za bodem D se nachází oblast nasycení.

Při snižování intenzity budícího pole magnetizace nesleduje křivku prvotní magnetizace. Při nulové intenzitě pole zůstane v materiálu remanentní magnetizace. Ta má za následek vznik hysterezní smyčky. Pro odmagnetování materiálu by bylo potřeba záporné orientace budícího pole o intenzitě H_C .

Hysterezní smyčka, zobrazená na Obr. 1.2, je jeden cyklus magnetování vyneseny do $B = f(H)$ diagramu. Intenzita pole tohoto cyklu probíhá pomalu a plynule od $+H_s$ do $-H_s$.



Obrázek 1.1: Křivka prvotní magnetizace [1]



Obrázek 1.2: Hysterezní smyčka [1]

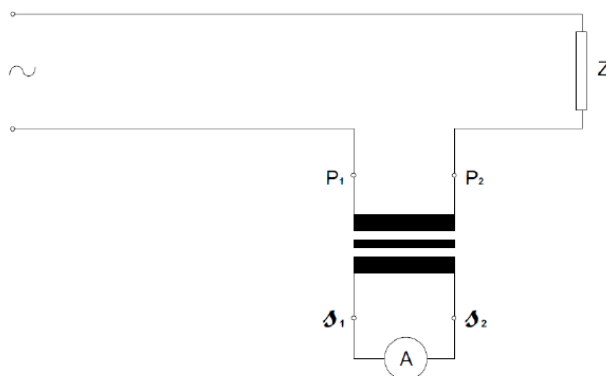
1.2. Princip činnosti přístrojového transformátoru proudu

Transformátory pracují díky elektromagnetické indukci. Průchod časově proměnného proudu Primárním vinutím vyvolá magnetický tok Φ . Ten je jádrem spřažen se sekundárním vinutím. Do sekundárního vinutí se tak naindukuje napětí.

Přístrojový transformátor proudu je do obvodu připojen podle Obr. 1.3. Primárním vinutím je jeden závit zapojený v sérii s měřeným obvodem. Na sekundární straně transformátoru jsou zátěží měřicí nebo jistící přístroje. Tento druh transformátoru musí mít sekundární stranu spojenou do krátka. Pokud by došlo k rozpojení sekundárního obvodu, nastal by havarijní stav. Následovalo by nasycení magnetického obvodu primárním proudem. Do sekundárního obvodu by se naindukovalo napětí:

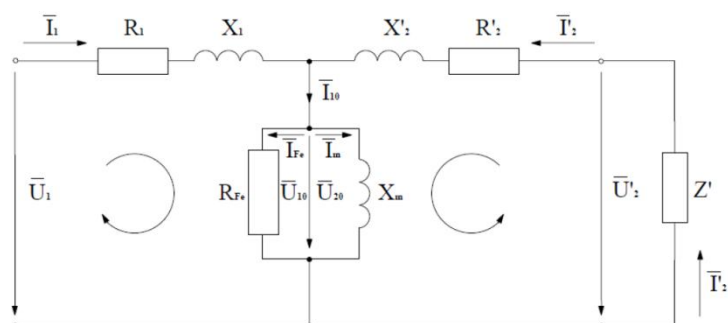
$$U_{20} = N_2 \frac{d\phi}{dt} [V] \quad (1.1)$$

Toto napětí dosahuje maximální hodnoty při průchodu magnetického toku nulou. Vzhledem k velkému počtu sekundárních závitů by velikost sekundárního napětí byla v řádu desítek kilovoltů, což je pro transformátor i obsluhu nebezpečné. Pro zabránění tomuto stavu se používají zkratovací soupravy a další technická opatření.



Obrázek 1.3: Připojení PTP k měřenému zařízení [1]

Činnost transformátoru proudu s lineární charakteristikou lze za předpokladu harmonického napájení ukázat na náhradním schématu Obr. 1.4. Pokud zanedbáme ztráty, tak se poměr primárního proudu I_1 a sekundárního proudu I_2 rovná poměru sekundárních závitů N_2 a primárního vinutí N_1 .



Obrázek 1.4: Náhradní schéma přístrojového transformátoru [1]

1.3. Chyby přístrojového transformátoru proudu

1.3.1. Trojúhelníková chyba:

Pro velmi malý fázový posuv lze fázory proudů I_1 a I_2 uvažovat jako rovnoběžné. Promítnutím fázoru budícího proudu I_{20} na vektor I_1 získáme složku chyby proudu ΔI proudu I_2 . Ta je ve fázi s vektorem proudu I_1 a rovná se velikosti rozdílu velikostí proudů I_1 a I_2 . Složka ΔI_q proudu I_2 určuje chybu úhlu. Budící proud I_{20} dělený I_1 se potom rovná celkové chybě. Tyto chyby se vynášejí do trojúhelníku. Přepónu tohoto trojúhelníku představuje celková chyba.

1.3.2. Celková chyba:

Celková chyba se uvažuje v případech, kdy se v obvodu vyskytují vyšší harmonické. Místo součtu vektorů chyby proudu a úhlu se celková chyba posuzuje porovnáním s ideálním transformátorem. Výsledná chyba je maximální možnou chybou proudu a úhlu.

1.3.3. Závislosti chyb na jednotlivých veličinách

1.3.3.1. Závislost na proudu:

Třída přesnosti měřících transformátorů musí být dodržena při stanovené konstantní zátěži v rozsahu $0,05 - 1,2 I_2$. Změnou proudu se bude měnit indukované napětí U_{20} a magnetická indukce B . Z magnetizační charakteristiky $B = f(H)$ se dá odvodit nelineární budící charakteristika $I_{20} = f(U_{20})$, ukazující závislost celkové chyby na indukovaném napětí.

1.3.3.2. Závislost na břemeni:

S velikostí břemene roste celková chyba nelineárně, protože budící charakteristika $I_{20} = f(U_{20})$ je také nelineární.

1.3.3.3. Závislost na sekundárním účinníku:

Při změně úhlu β mezi sekundárním napětím U_2 a sekundárním proudem I_2 , se mění i velikost chyb proudu a úhlu.

1.3.3.4. Závislost na kmitočtu:

Pokud se mění napájecí kmitočet f tak se s ním i nepřímo úměrně mění i velikost magnetické indukce B . K snížení velikosti chyby dochází při snížení indukce v transformátoru.

1.4. Normativní požadavky [2], [3]

Přístrojovými transformátory se zabývá norma ČSN EN 61869-část první. Přístrojový transformátor je určený k přenosu informačního signálu do měřících přístrojů, elektroměrů a ochranných nebo ovládacích zařízení nebo podobných přístrojů. Jmenovitá hodnota sekundárního proudu je u přístrojového transformátoru proudu **5 A** nebo **1 A**. Ve většině aplikací se používá **5 A**. U transformátorů zvláště vysokého napětí se z důvodu zvýšení hospodárnosti průřezu vodičů používá hodnota **1 A**. Pro některé aplikace se uvádí i hodnota **2 A**. Normalizované hodnoty jmenovitých primárních proudů jsou v řadě:

$$10 - 12,5 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 75 \text{ A}$$

a jejich dekadické násobky či zlomky. U přístrojového transformátoru proudu je na rozdíl od silového transformátoru vstupní proud nezávislý na výstupní zátěži. Primární proud budí magnetické pole, které je omezováno polem od výstupní cívky. Pokud by došlo k rozpojení sekundárního obvodu, začal by magnetickým obvodem protékat plný tok od primárního vinutí. Na sekundárním vinutí by se tak naindukovalo napětí, které by mohlo ohrozit obsluhu i samotný transformátor. Primární svorky jsou označeny **K**, **L** a sekundární svorky **k**, **l**.

1.4.1. Jmenovitá zátěž S_N

Jedná se o hodnotu výkonu, kterou transformátor přenáší na sekundární stranu. Při jmenovitém proudu I_{SN} a jmenovité zátěži Z_N je jmenovitá zátěž:

$$S_N = I_{SN}^2 \cdot Z_N \quad (1.2)$$

Normalizované hodnoty jmenovitého výkonu do **30 VA** jsou:

$$2,5 - 5 - 10 - 15 - 30 \text{ VA}$$

Výkony nad 30 VA se volí podle potřeby.

Jmenovité břemeno se většinou volí jako čistě odporová zátěž přesných parametrů. Skutečná hodnota břemene je impedancí při daném účinníku.

1.4.2. Chyba proudu ε

Protože se za všech okolností jmenovitý převod nerovná skutečnému, vzniká chyba, o kterou se liší převedený sekundární proud od primárního proudu. Tato chyba je dána vzorcem:

$$\varepsilon = \frac{k_N \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100 \quad (1.3)$$

Kde: k_N jmenovitý převod
 I_1primární proud
 I_2sekundární proud

1.4.3. Chyba úhlu $\Delta\varphi$

Při průchodu transformátorem dochází k fázovému posuvu mezi primárním a sekundárním proudem. Tím vzniká chyba vyjádřená jako rozdíl fáze. U ideálního transformátoru je vzájemný fázový posuv a tím i chyba nulová. Nejčastěji je chyba vyjádřena v úhlových minutách nebo centiradiánech.

1.4.4. Třída přesnosti

Jedná se o největší dovolenou chybu proudu při jmenovitém proudu vyjádřenou v procentech. Pro měřicí transformátory je menší než 5. Jistící pak mají třídu přesnosti 5 a více.

1.4.5. Celková chyba

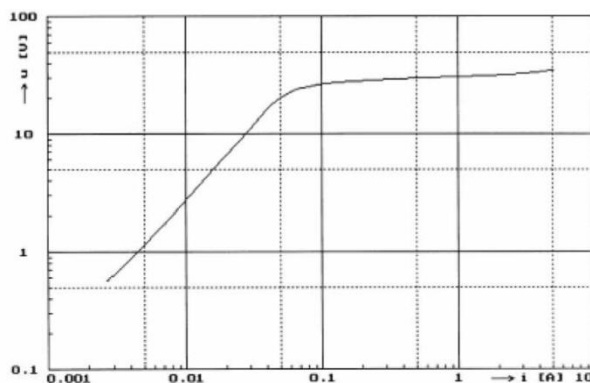
Jde o chybu uváděnou v procentech efektivní hodnoty primárního proudu. Za ustálených stavů se počítají efektivní hodnoty rozdílu sekundárního proudu vynásobeného převodem a primárního proudu.

$$\varepsilon_c = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (k_N \cdot i_2 - i_1)^2 dt} \quad (1.4)$$

Kde: k_N jmenovitý převod
 I_1efektivní hodnota primárního proudu
 i_1okamžitá hodnota primárního proudu
 i_2okamžitá hodnota sekundárního proudu
 Tdoba trvání cyklu

1.4.6. Budící charakteristika

Na Obr. 1.5 je znázorněna budící charakteristika transformátoru. Na sekundární stranu je přivedeno napětí a měříme hodnotu proudu. Primární a ostatní vinutí nejsou připojena. Z naměřených hodnot sestrojíme charakteristiku.



Obrázek 1.5: Budící charakteristika přístrojového transformátoru [1]

1.5. Oteplení přístrojového transformátoru

Oteplení vinutí je úměrné kvadrátu proudu. Tento proud je nezávislý na břemeni nebo jmenovité zátěži. V provozní oblasti mají přístrojové transformátory malou proudovou hustotu. Nedochází tak k výraznému oteplení. U transformátorů s nižší zkratovou odolností je oteplení vyšší. Oteplení primárního vinutí se kontroluje pouze, když je primární vinutí izolováno silnou vrstvou izolantu. V tomto materiálu bude také docházet k vlastním dielektrickým ztrátám. Tím vznikne v izolantu velký teplotní spád. Při nadproudech smí být výsledné oteplení pouze krátkodobé.

Největší složkou ztrát ve vinutí jsou Joulovy ztráty. Velikost těchto ztrát odpovídá vzorci:

$$\Delta P = c_V \cdot m_V \cdot \Delta \vartheta = R \cdot I^2 \cdot k_{dv} \quad (2.1)$$

Kde:

- c_Vměrná tepelná kapacita vodiče
- m_V hmotnost vodiče
- $\Delta \vartheta$oteplení vodiče
- Rodpor vodiče
- Iproud ve vodiči
- k_{dv}součinitel přídatných ztrát

Oteplení magnetického obvodu je závislé jak na proudu, tak i na břemeni. Díky feromagnetickým ztrátám bude oteplení přímo úměrné velikosti břemene. Se zvyšováním hodnoty břemene poroste i indukované napětí a také celková indukce v materiálu. Maximálních hodnot oteplení potom dosahuje ve stavu na prázdno.

2. Přehled přístrojových transformátorů proudu nízkého napětí [1]

2.1. Přístrojové transformátory proudu

1. Podle primárního vinutí
 - podpěrné transformátory
 - průchodkové transformátory
 - průchozí transformátory

2. Podle umístění a tvaru primárních vývodů
 - jednozávitové
 - závitové
 - smyčkové
 - tyčové
 - násuvné
 - prstencové

3. Podle jiných hledisek
 - jednojádrové
 - vícejádrové
 - s rozebíratelným magnetickým obvodem
 - s několika sekundárními výstupy
 - kaskádové
 - sčítací

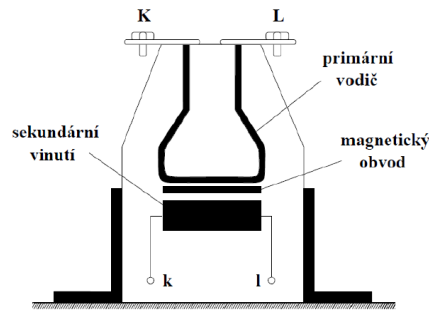
2.2. Základní konstrukční typy přístrojových transformátorů proudu

2.2.1. Jednozávitové transformátory proudu

Primární vodič prochází magnetickým obvodem.

- ***Podpěrný transformátor proudu:***

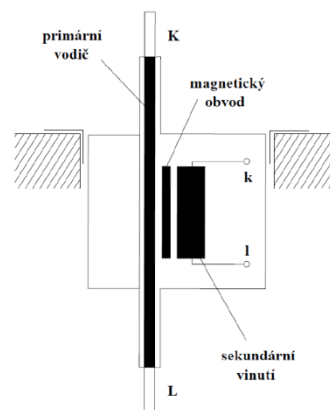
Proudový rozsah je 400 A až 3200 A. Vývody primárního vinutí jsou na vrchní straně tělesa. Uchycení je ve spodní části zařízení.



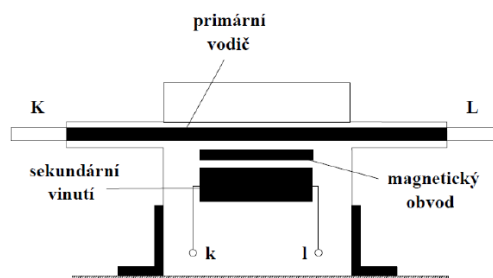
Obrázek 2.1: Nákres podpěrného transformátoru [1]

- **Tyčový transformátor proudu:**

Proudový rozsah je 100 A až 2500 A. Primárním vodičem je tyč nebo pás. Dva hlavní typy jsou průchodkový (Obr. 2.2) a průchozí (Obr. 2.3).



Obrázek 2.2: Nákres tyčového transformátoru – průchodkový [1]



Obrázek 2.3: Nákres tyčového transformátoru – průchozí [1]

- **Násuvný transformátor proudu:**

Maximální hodnota měřeného proudu je 6000 A. Tento transformátor je tvořen pouze čtvercovým magnetickým obvodem a sekundárním vnutím. Přípojnice je poté nasunuta do izolované dutiny transformátoru.

- **Prstencový transformátor proudu:**

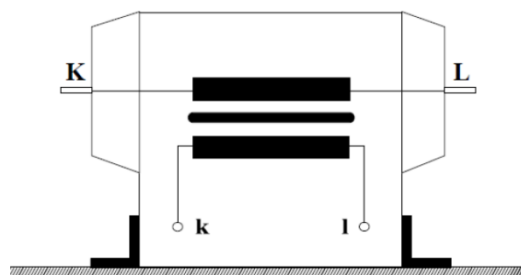
Konstrukce transformátoru je podobná jako u násuvného transformátoru. Je zde pouze využito příznivých vlastností toroidního jádra. Sekundární vinutí je rovnoměrně rozloženo na jádře.

2.2.2. Závité transformátory proudu

Používají se některá provedení uvedená výše, rozdílem je, že primární vinutí je tvořeno více závitů.

- **Podpěrný transformátor proudu:**

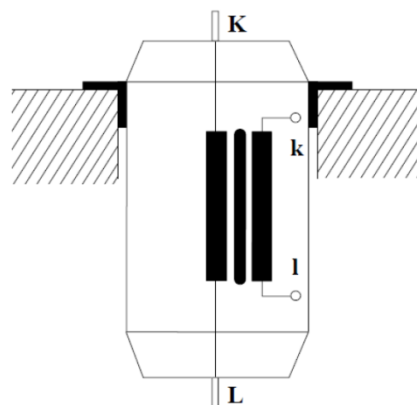
- **Průchozí transformátor proudu:**



Obrázek 2.4: Nákres průchozího transformátoru [1]

- **Průchodkový transformátor proudu:**

Jedná se o transformátor, který je použit zároveň jako průchodka. Používají se pro měření proudů do 5000A.



Obrázek 2.5: Nákres průchodkového transformátoru [1]

2.3. Jistící transformátory proudu

Jistící transformátory se používají pro přenos informačního signálu do ochranných a ovládacích zařízení. Největší přesnost tohoto druhu transformátorů je vyžadována při hodnotách poruchových proudů. Konkrétně v bodě jmenovitého primárního nadproudu.

Místo nadproudového čísla se u jistících transformátorů používá nadproudový činitel.

Jmenovité hodnoty nadproudových činitelů jsou:

$$5 - 10 - 15 - 20 - 30$$

Třída přesnosti je doplněna o písmeno **P** (protection). Třídami přesnosti jsou normalizované třídy **5P** a **10P**. Kvůli největší přesnosti se často používá třída 5P. Při zátěži do 5 VA se pro určení chyby proudu a chyby úhlu přípustný účinník rovná jedné. Při určení celkové chyby je účinník v rozmezí 0,8 – 1. Dovolené chyby jistících transformátorů jsou naznačeny v tabulce tab 2.1.

Tabulka 2.1: Tabulka dovolených chyb proudu a úhlu pro jistící transformátory proudu

Třída přesnosti	± Chyba proudu v % při jmenovitém primárním proudu	± chyba proudu při jmenovitém primárním proudu		Celková chyba v % při jmenovitém primárním nadproudu
		minuty	centiradiány	
5P	1	60	1,8	5
10P	3	–	–	10

2.4. Měřicí transformátory proudu

Měřicí transformátory slouží k přenosu informačního signálu k měřicím přístrojům. Největší přesnost je vyžadována v oblasti jmenovitých proudů. Pro ochranu přístrojů a obsluhu před nadproudy je požadováno rychlé přesycení jádra.

Nadproudové číslo je násobkem primárního proudu, při kterém je celková chyba při jmenovitém sekundárním proudu větší než 10%. Celková chyba během nadproudů nesmí při připojení přístrojů k transformátoru přesáhnout 10 %. Velikost zátěže potom určuje skutečné nadproudové číslo.

Normalizované třídy přesnosti jsou:

$$0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 3 - 5$$

Mezní dovolené chyby pro třídy přesnosti 0,1 – 1 pro 25 % – 100 % jmenovitého sekundárního břemene jsou v tab. 2.2. Pro třídy přesnosti 3 a 5 nejsou určeny chyby úhlu. V tab. 2.3 jsou mezní chyby proudu.

Pro speciální měřicí přístroje se používá označení třídy přesnosti S. Konkrétně se jedná o třídy 0,2S a 0,5S. Tato provedení transformátorů mají rozšířený proudový rozsah.

Tabulka 2.2: Tabulka dovolených chyb proudu a úhlu pro PTP (TP 0,1 – 1)

Třída přesnosti	I_N [%]	± Chyba proudu v % při jmenovitém primárním proudu				± Chyba úhlu v % při jmenovitém primárním proudu							
		5	20	100	120	minuty				centiradiány			
						5	20	100	120	5	20	100	120
0,1		0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,1
0,2		0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5		1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1		3	1,5	1	1	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

Tabulka 2.3: Tabulka dovolených chyb proudu a úhlu pro PTP (TP 3 – 5)

Třída přesnosti	I_N [%]	± Chyba proudu v % při jmenovitém primárním proudu	
		50	120
3		3	3
5		5	5

Při měření nadproudového čísla jsou rozpojeny primární svorky. Sekundární strana se napájí harmonickým napětím, které má stejnou efektivní hodnotu jako krajní elektromagnetické napětí. Toto napětí je součinem nadproudového čísla, jmenovitého sekundárního proudu a velikosti sekundárního břemene vektorově sečteného s impedancí sekundárního vinutí přepočteného na teplotu 75°C. Jmenovitá chyba musí být menší nebo rovna součinu budícího proudu v procentech a nadproudového čísla.

2.5. Shrnutí principu návrhu

Koncepční návrhy přístrojových transformátorů vychází z dlouholetých zkušeností. Prvním krokem je výpočet počtu závitů primárního a sekundárního vinutí a průřezu primárního vodiče. To je spolu s určením pracovního bodu resp. magnetické indukce podkladem k návrhu rozměrů magnetického obvodu. Po určení rozměrů přístrojového transformátoru se provádí kontrola nadproudového čísla a dále chyb transformátoru v celém požadovaném rozsahu. Pokud není návrh vyhovující, je třeba upravit výpočet a změnit parametry transformátoru například pomocí závitové korekce.

3. Návrh přístrojového transformátoru

Návrh transformátoru uvedený v této práci je obsažen v metodice VUT [4].

Tabulka 3.1: Tabulka zadaných parametrů pro návrh PTP

Jmenovitý primární proud I_{pr}	200	[A]
Jmenovitý sekundární proud I_{sr}	5	[A]
Jmenovitý výkon P_r	5	[VA]
Třída přesnosti	1	[%]
Nadproudové číslo	5	[-]
Přetížitelnost	120	[%]
Provozní napětí U_r	750	[V]
Izolační napětí U_m	4	[kV]
Jmenovité krátkodobý proud I_{th}	12	[kA]

3.1. Výpočet počtu závitů

Pro násuvný typ transformátorů se počet primárních závitů N_p rovná jedné.

$$N_s = \frac{N_p \cdot I_{pr}}{I_{sr}} [-; A] \quad (3.1)$$

$$N_s = \frac{1 \cdot 200}{5} = 40$$

N_s počet sekundárních závitů
 N_p počet primárních závitů
 I_{pr} jmenovitý primární proud
 I_{sr} jmenovitý sekundární proud

3.2. Výpočet průřezu primárního vodiče

$$S_1' = \frac{60 \cdot I_{pr}}{\sigma_{th}} [mm^2; A, A \cdot mm^{-2}] \quad (3.2)$$

$$S_1' = \frac{60 \cdot 200}{180} = 66,67 mm^2$$

S_1' předběžný průřez primárního vodiče
 σ_{th} proudová hustota primárního vinutí při jmenovitém krátkodobém proudu
 $\sigma_{th} = 180 A \cdot mm^{-2}$ – pro měď

$$S_{1N} = N_p \cdot S_1' [mm^2; -] \quad (3.3)$$

$$S_{1N} = 1 \cdot 66,67 = 66,67 mm^2$$

S_{1N} aktivní průřez primárního vinutí

$$S_{Cu} = \frac{S_{1N}}{\chi} [mm^2; -] \quad (3.4)$$

$$S_{Cu} = \frac{66,67}{0,3} = 222,2mm^2$$

S_{Cu} průřez na provlečení primárních vodičů

χ výpočetní koeficient

$\chi = 0,3$ – zjištěno experimentálně

$$D_{1i}' = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{Cu}}{\pi}} [mm; mm^2] \quad (3.5)$$

$$D_{1i}' = \sqrt{\frac{4 \cdot 222,2}{\pi}} = 16,8mm$$

D_{1i}' vypočtený průměr

Pro další výpočty se D_{1i}' zaokrouhlí nahoru na celé číslo D_{1i} . V souladu se zadáním byla hodnota u navrhovaného PTP nízkého napětí navýšena na 22 mm. Důvodem je prakticky využívaná možnost měření i nižších hodnot proudu při vícenásobném provlečení primárního vodiče (více primárních závitů).

3.3. Výpočet parametrů sekundárního vinutí

$$D_{2i}' = D_{1i} + 2 \cdot t_i [mm] \quad (3.6)$$

$$D_{2i}' = 22 + 2 \cdot 2 = 26mm$$

D_{2i}' nejmenší možný průměr magnetického obvodu

t_i tloušťka izolace (po konzultaci s vedoucím práce zvolena tloušťka izolace

2 mm)

$$n_s = \frac{N_s}{\pi \cdot D_{2i}' \cdot \xi_1} \cdot d_{2i} [-; mm] \quad (3.7)$$

$$n_s = \frac{40}{\pi \cdot 26 \cdot 0,9} \cdot 1,6 = 0,87 \approx 1$$

n_s počet vrstev sekundárního vinutí

ξ_1 činitel plnění při skládání vodičů vedle sebe

$$t_s = n_s \cdot d_{2i} \cdot \xi_s [mm; -] \quad (3.8)$$

$$t_s = 1 \cdot 1,6 \cdot 1,2 = 1,92mm$$

t_s výška sekundárního vinutí

ξ_s činitel nárůstu výšky vinutí

3.4. Výpočet rozměrů magnetického obvodu

$$D_{3i}' = D_{2i}' + 2 \cdot t_s [mm] \quad (3.9)$$

$$D_{3i}' = 26 + 2 \cdot 1,92 = 29,84mm$$

D_{3i}' předběžný vnitřní průměr pouzdra

$$D_i' = D_{3i}' + 2 \cdot s [mm] \quad (3.10)$$

$$D_i' = 29,84 + 2 \cdot 2 = 33,84mm$$

D_i' vnitřní průměr jádra
 $s = 2$ mm

Vypočítaný průměr D_i' se zaokrouhlí na celé vyšší mm tj $D_i = 34$ mm.

$$D_{3i} = D_i - 2 \cdot s [mm] \quad (3.11)$$

$$D_{3i} = 34 - 2 \cdot 2 = 30mm$$

D_{3i} vnitřní průměr pouzdra

$$D_{2i} = D_{3i} - 2 \cdot t_2 [mm] \quad (3.12)$$

$$D_{2i} = 30 - 2 \cdot 1,92 = 26,16mm$$

D_{2i} vnitřní průměr magnetického obvodu

3.5. Návrh vlastního jádra

$$B_n = \frac{B_m}{0,9 \cdot n} [T; -] \quad (3.13)$$

$$B_n = \frac{1,9}{0,9 \cdot 5} = 0,42T$$

B_n jmenovitá magnetická indukce
 $B_m = 1,9$ T – zvoleno
 n nadproudové číslo

$$S' = \frac{1,3 \cdot P_r}{4,44 \cdot f \cdot B_n \cdot N_s \cdot \xi \cdot I_{Sr}} [m^2; VA, Hz, T, -, A] \quad (3.14)$$

$$S' = \frac{1,3 \cdot 5}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,42 \cdot 40 \cdot 0,95 \cdot 5} = 366mm^2$$

S' předběžný průřez jádra
 P_r jmenovitý výkon
 f napájecí frekvence
 ξ činitel plnění magnetického obvodu
 $\xi = 0,95$ – zvoleno

$$S' = h \cdot b' [m^2; m] \quad (3.15)$$

$$S' = 20 \cdot 18,3 = 366mm^2$$

h..... výška jádra (voleno jako násobek 5)
b'..... předběžná šířka jádra

$$S = h \cdot b \geq S' [m^2; m] \quad (3.16)$$

$$S = 20 \cdot 20 = 400mm^2 \geq 366mm^2$$

S..... průřez jádra
b..... šířka jádra (zaokrouhlena na sudé číslo)

$$D_e = D_i + 2 \cdot b [mm] \quad (3.17)$$

$$D_e = 34 + 2 \cdot 20 = 74mm$$

D_e..... vnější průměr jádra

$$D = D_i + b [mm] \quad (3.18)$$

$$D = 34 + 20 = 54mm$$

D..... střední průměr jádra

$$H = h + 2 \cdot r [mm] \quad (3.19)$$

$$H = 20 + 2 \cdot 2 = 24mm$$

H..... výška zapouzdřeného jádra
r = 2 – zvoleno

$$B = b + 2 \cdot s [mm] \quad (3.20)$$

$$B = 20 + 2 \cdot 2 = 24mm$$

B..... šířka zapouzdřeného jádra

3.6. Kontrola nadproudového čísla

$$l_s = 2 \cdot (B + H) + \pi \cdot t_s [mm] \quad (3.21)$$

$$l_s = 2 \cdot (24 + 24) + \pi \cdot 1,92 = 102mm$$

l_s..... střední délka závitu

$$S_s = \frac{\pi \cdot d_s^2}{4} [m^2; m] \quad (3.22)$$

$$S_s = \frac{\pi \cdot 1,6^2}{4} = 2,01 mm^2$$

S_s průřez sekundárního vinutí
 d_s průměr vodiče pro sekundární vinutí
 $d_s = 1,6$ mm

$$R_{ct} = \frac{N_s \cdot l_s \cdot \rho}{S_s} [\Omega; -, m, \Omega \cdot m, m^2] \quad (3.23)$$

$$R_{ct} = \frac{40 \cdot 102 \cdot 10^{-3} \cdot 0,017 \cdot 10^{-6}}{2,01 \cdot 10^{-6}} = 34,5 m\Omega$$

R_{ct} odpor sekundárního vinutí
 ρ rezistivita materiálu sekundárního vinutí
 $\rho = 0,017 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ – Pro měď

$$P_{ct} = R_{ct} \cdot I_{sr}^2 [W; \Omega, A] \quad (3.24)$$

$$P_{ct} = 34,5 \cdot 10^{-3} \cdot 5^2 = 0,86 W$$

P_{ct} vnitřní zátěž při jmenovitém proudu

$$Z_b = \frac{P_r}{I_{sr}^2} [\Omega; VA, A] \quad (3.25)$$

$$Z_b = \frac{5}{5^2} = 0,2 \Omega$$

Z_b jmenovité břemeno
 P_r jmenovitý výkon

$$R_b = Z_b \cdot \cos(\varphi) [\Omega; -] \quad (3.26)$$

$$R_b = 0,2 \cdot 0,8 = 0,16 \Omega$$

R_b činná složka jmenovitého břemene
 $\cos(\varphi)$... účinník jmenovité zátěže

$$X_b = Z_b \cdot \sin(\varphi) [\Omega; -] \quad (3.27)$$

$$X_b = 0,2 \cdot 0,6 = 0,12 \Omega$$

X_b jalová složka jmenovitého břemene
 $\sin(\varphi)$... sinus úhlu dopočítaný z účinníku

$$P_b = P_r \cdot \cos(\varphi) [W; VA-] \quad (3.28)$$

$$P_b = 5 \cdot 0,8 = 4 W$$

P_b činná složka jmenovité zátěže

$$Q_b = P_r \cdot \sin(\varphi) [VA; VA, -] \quad (3.29)$$

$$Q_b = 5 \cdot 0,6 = 3VA$$

Q_b jalová složka jmenovité zátěže

$$P_s = \sqrt{(P_b + P_i)^2 + Q_b^2} [VA; W, VA] \quad (3.30)$$

$$P_s = \sqrt{(4 + 0,86)^2 + 3^2} = 5,71W$$

P_s celková hodnota zátěže při jmenovitém proudu

$$B_{SK} = \frac{P_s}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot I_{Sr}} [T; VA, Hz, m^2, -, A] \quad (3.31)$$

$$B_{SK} = \frac{5,71}{4,44 \cdot 50 \cdot 400 \cdot 10^{-6} \cdot 0,95 \cdot 40 \cdot 5} = 0,34T$$

B_{SK} hodnota jmenovité magnetické indukce při jmenovité zátěži a jmenovitém proudu

f napájecí frekvence

S průřez jádra

ξ činitel plnění magnetického obvodu

$\xi = 0,95$ – zvoleno

$$n_{SK} = \frac{B_m}{0,9 \cdot B_{SK}} [-; T] \quad (3.32)$$

$$n_{SK} = \frac{1,9}{0,9 \cdot 0,34} = 6,21$$

n_{SK} zpětně vypočítané nadproudové číslo

B_m jmenovitá magnetická indukce

$B_m = 1,9 T$ – zvoleno

3.7. Výpočet chyby

Tabulka 3.2: Tabulka vypočtených chyb pro proud 1% – 120%

I_{sr}	[%]	1	5	10	20	50	100	120
I_{sr}	[A]	0,05	0,25	0,5	1	2,5	5	6
B_{sk}	[T]	3,39E-03	1,69E-02	3,39E-02	6,77E-02	1,69E-01	3,39E-01	4,06E-01
p_{Fe}	[W/kg]	1,10E-05	2,40E-04	9,30E-04	3,20E-03	2,00E-02	8,00E-02	1,10E-01
a_g	[A/m]	0,1190	0,5200	1,0076	1,733	4,334	8,667	9,932
a_0	[A/m]	0,44	1,2	2	3,1	5,5	9,2	11
I_{s0}	[A]	1,45E-03	3,96E-03	6,60E-03	1,02E-02	1,81E-02	3,03E-02	3,63E-02
γ	[°]	15,715	25,682	30,252	34	51,995	70,411	64,537
β_c	[°]	31,67	31,67	31,67	31,67	31,67	31,67	31,67
α	[°]	42,61	32,64	28,08	24,33	6,33	-12,08	-6,21
ε	[%]	-2,136	-1,333	-1,164	-0,932	-0,721	-0,594	-0,601
$\Delta\varphi$	[min]	67,6	29,38	21,36	14,49	2,75	-4,37	-2,25

3.7.1. Příklad výpočtu pro 1% jmenovitého proudu

$$B_{SK} = \frac{\sqrt{[(R_b + R_{ct}) \cdot (0,01 \cdot I_{sr})^2]^2 + [X_b \cdot (0,01 \cdot I_{sr})^2]^2}}{222 \cdot S \cdot \xi \cdot N_2 \cdot 0,01 \cdot I_{sr}} [T; \Omega, A, m^2, -] \quad (3.33)$$

$$B_{SK} = \frac{\sqrt{[(0,16 + 0,0372) \cdot 0,05^2]^2 + [0,12 \cdot 0,05^2]^2}}{222 \cdot 400 \cdot 10^{-6} \cdot 0,95 \cdot 40 \cdot 0,05} = 3,42 \cdot 10^{-3} T$$

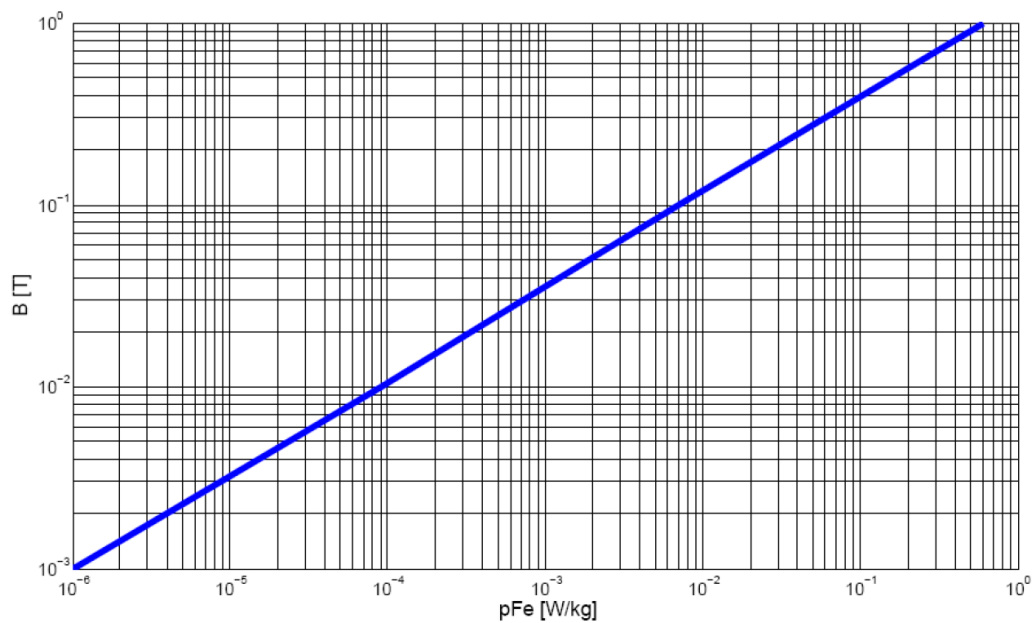
B_{SK} skutečná hodnota magnetické indukce

I_{sr} procentuální část jmenovitého proudu

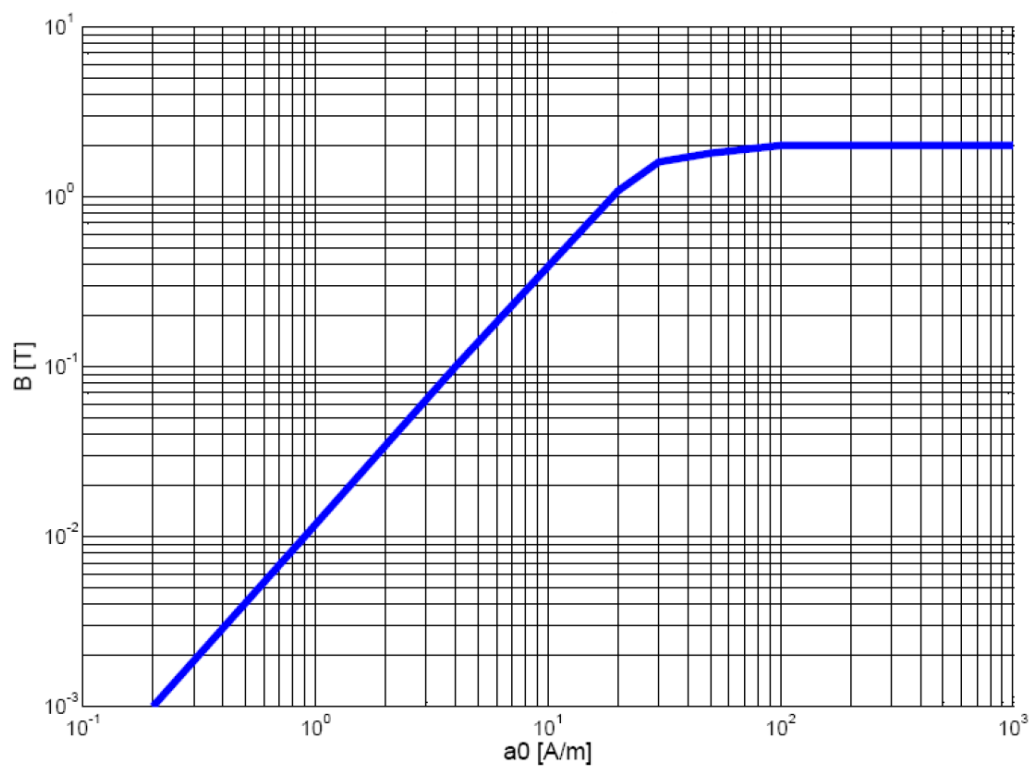
S průřez jádra

ξ činitel plnění magnetického obvodu (zvoleno 0,95)

Dalším krokem je odečtení hodnoty měrných ztrát p_{Fe} a měrný jalový budící proud a_0 z příslušných grafů Obr. 3.1, Obr. 3.2.



Obrázek 3.1: Graf závislosti Magnetické indukce na měrných ztrátách [1]



Obrázek 3.2: Graf závislosti magnetické indukce na měrném jalovém budícím proudu [1]

$$a_g = \frac{p_{Fe} \cdot \gamma_{Fe}}{4,44 \cdot f \cdot B_{SK}} [A \cdot m^{-1}; W \cdot kg^{-1}, kg \cdot m^{-3}, Hz, T] \quad (3.34)$$

$$a_g = \frac{1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 8145}{4,44 \cdot 50 \cdot 3,42 \cdot 10^{-3}} = 0,118 A \cdot m^{-1}$$

a_g měrný činný budící proud
 p_{Fe} měrné ztráty ve feromagnetiku
 γ_{Fe} měrná hmotnost feromagnetického materiálu (8145 kg·m⁻³ katalogová hodnota)

$$l_m = \pi \cdot D [m] \quad (3.35)$$

$$l_m = \pi \cdot 0,042 = 0,132 m$$

l_m střední délka magnetického obvodu
 D střední průměr jádra

$$I_{s0} = a_0 \cdot l_m \frac{1}{N_2} [A; A \cdot m^{-1}, m, -] \quad (3.36)$$

$$I_{s0} = 0,44 \cdot 0,132 \frac{1}{40} = 1,45 \cdot 10^{-3} A$$

I_{s0} celková chyba transformátoru

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{a_g}{a_0} \right) [^\circ; A \cdot m^{-1}] \quad (3.37)$$

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{0,118}{0,44} \right) = 15,56^\circ$$

γ úhel γ

$$\beta_c = \arctan \left(\frac{X}{R+R_2} \right) [^\circ; \Omega] \quad (3.38)$$

$$\beta_c = \arctan \left(\frac{0,12}{0,16+0,0372} \right) = 31,32^\circ$$

β_c úhel β_c

$$\alpha = 90 - (\beta_c + \gamma) [^\circ] \quad (3.39)$$

$$\alpha = 90 - (31,32 + 15,56) = 43,12^\circ$$

α úhel α

$$\varepsilon = -\frac{I_{s0}}{I_{sr}} \cdot \cos(\alpha) \cdot 100[\%; A,^\circ] \quad (3.40)$$

$$\varepsilon = -\frac{1,45 \cdot 10^{-3}}{0,05} \cdot \cos(43,12) \cdot 100 = -2,12\%$$

ε chyba proudu v procentech

$$\Delta\varphi = 3440 \frac{I_{s0}}{I_{sr}} \cdot \sin(\alpha)[min; A,^\circ] \quad (3.41)$$

$$\Delta\varphi = 3440 \frac{1,45 \cdot 10^{-3}}{0,05} \cdot \sin(43,12) = 68,3min$$

$\Delta\varphi$ chyba úhlu v úhlových minutách

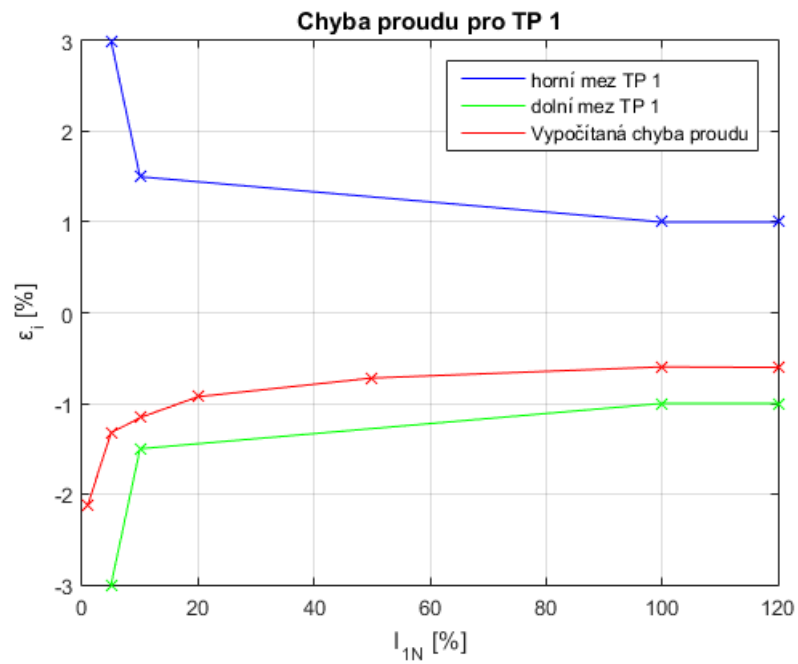
3.8. Vyhodnocení návrhu PTP

Pro vyhodnocení návrhu přístrojového transformátoru se používá tabulka 3.3. Pro třídu přesnosti 1 jsou v ní uvedeny maximální dovolené chyby proudu ε_i a chyby úhlu δ_i . Tyto meze jsou pak zobrazeny v grafech na Obr 3.3 a Obr 3.4.

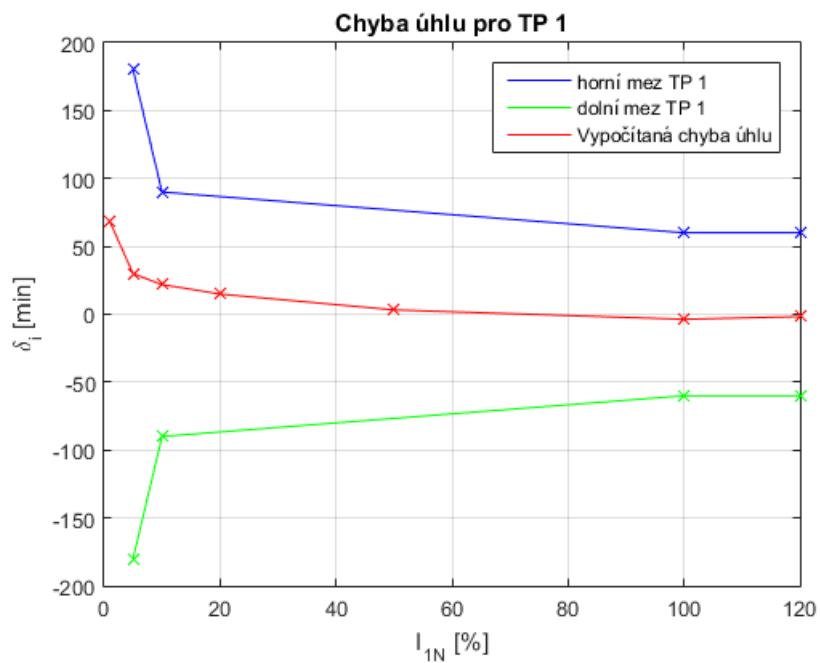
Tabulka 3.3: Tabulka dovolených chyb přístrojových transformátorů proudu [3]

Třída přesnosti TP	± chyba proudu (%) (při hodnotách jmen. prim. proudu v %)						± chyba úhlu (min) (při hodnotách jmen. prim. proudu v %)					
	1	5	20	50	100	120	1	5	20	50	100	120
0,1		0,4	0,2		0,1	0,1		15	8		5	5
0,2		0,75	0,35		0,2	0,2		30	15		10	10
0,5		1,5	0,75		0,5	0,5		90	45		30	30
1		3	1,5		1	1		180	90		60	60
3				3		3						
5				5		5						
0,2S	0,75	0,35	0,2		0,2	0,2	30	15	10		10	10
0,5S	1,5	0,75	0,5		0,5	0,5	90	45	30		30	30

Grafické znázornění:



Obrázek 3.3: Graf chyby proudu pro jednotlivé hodnoty primárního proudu

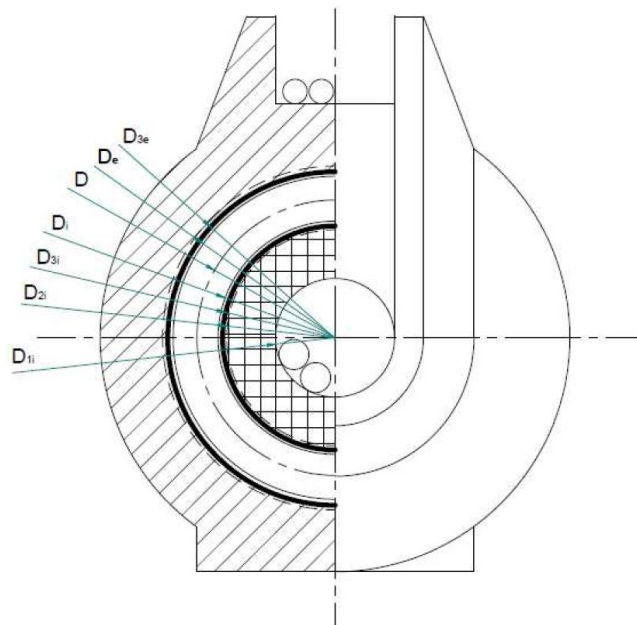


Obrázek 3.4: Graf chyby úhlu pro jednotlivé hodnoty primárního proudu

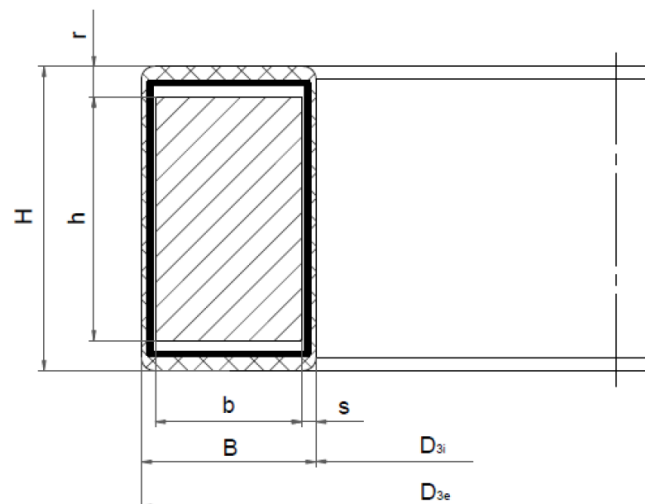
Výsledné hodnoty:

Tabulka 3.4: Tabulka základních parametrů pro návrh transformátoru

Počet sekundárních závitů N_s	40	[-]
Průměr vodiče d_{2i}	1,6	[mm]
Vnitřní průměr jádra D_i	36	[mm]
Výška jádra h	20	[mm]
Šířka jádra b	20	[mm]
Vnější průměr jádra D_e	76	[mm]
Hodnota magnetické indukce při jm. proudu a jm. zátěži	0,34	[T]
Kontrola proudového čísla	6,21	[-]



Obrázek 3.5: Řez přístrojovým transformátorem [1]



Obrázek 3.6: Řez magnetickým obvodem transformátoru [1]

Závěr

Cílem této práce bylo sestavit zkrácený přehled o přístrojových transformátorech a návrh vlastního přístrojového transformátoru proudu podle zadaných parametrů.

Přístrojové transformátory jsou používány pro ochranu lidí i měřících přístrojů před účinky velkých napětí a proudů. Používají se také pro měření zvláště vysokých hodnot napětí a proudů, které by byly jen těžko měřitelné. Tyto hodnoty jsou na základě transformačního poměru převedeny na normované hodnoty. Podle účelu se přístrojové transformátory rozdělují na jistící a měřící.

Pro návrh přístrojového transformátoru proudu byla použita metodika vyvinutá VUT [4]. Podle té byly nejprve spočítány mechanické rozměry magnetického obvodu. Následně byly dopočítány hodnoty elektrických parametrů transformátoru a nakonec hodnoty magnetických veličin a kontrola nadproudového čísla. Pro ověření platnosti návrhu byly dopočítány chyby proudu a úhlu pro hodnoty 1% až 120% primárního proudu. Tyto hodnoty byly porovnány s hodnotami pro zadanou třídu přesnosti transformátoru, které jsou uvedené v normě ČSN EN 61869-2. Výsledky výpočtu chyb proudu a úhlu pro navržený transformátor se pohybovaly v mezích maximálních dovolených chyb stanovených pro zadanou třídu přesnosti 1. Nadproudové číslo tohoto transformátoru udává, že se jedná o měřící přístrojový transformátor proudu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BEJČEK, Bc. Petr. Návrh přístrojového transformátoru nn. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. SEDLÁČEK Jan, Ph.D.
- [2] ČSN EN 61869-1. Přístrojové transformátory - Část 1: Všeobecné požadavky. 2010. Brno: ORGREZ, 2010
- [3] ČSN EN 61869-2. Přístrojové transformátory - Část 2: Dodatečné požadavky na transformátory proudu. 2009. Brno: ORGREZ, 2013.
- [4] Král, J., Vaněk, J.: Elektromagnetické přístroje, VUT, Brno, 1984

Příloha

Příloha obsahuje MS Excel kalkulačku pro výpočet chyb.