



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NÍZKOVÝKONOVÝ PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR PROUDU

LOW POWER CURRENT TRANSFORMERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ladislav Zolich

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Dostál

BRNO 2018



Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Ladislav Zolich

ID: 154914

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Nízkovýkonový přístrojový transformátor proudu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s teorií přístrojového transformátoru proudu (CT).
2. Diskutujte rozdíl klasického CT a nízkovýkonového CT (LPCT). Porovnejte výhody a nevýhody LPCT s ostatními nízkovýkonovými způsoby měření proudu, zejména používaných v průmyslových aplikacích (Rogowského cívky, Low power bočníky).
3. Vypracujte návrh nízkovýkonového CT (LPCT).
4. Vypočítejte magnetické a dielektrické pole v typické aplikaci LPCT.
5. Realizujte laboratorní měření na navrženém LPCT a ověřte výpočet předpokládaných chyb transformátoru.
6. Získané poznatky vyhodnoťte a analyzujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985
- [2] Havelka, O. a kol.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I, VUT v Brně, 1985
- [3] Dědek, L., Dědková, J.: Elektromagnetismus, VUTIUM 2000

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Dostál

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Diplomová práce se soustřeďuje na problematiku přístrojových transformátorů proudů, proudových senzorů a nízkovýkonových přístrojových transformátorů proudů. Jsou porovnávány výhody a nevýhody jednotlivých přístrojů. Dále je navrhován nízkovýkonový přístrojový transformátor proudu, který následně vyroben a změřen. Dosažené výsledky jsou pak porovnány s teoretickými hodnotami.

Klíčová slova

Transformátor, proud, chyba, přístrojový, nízkovýkonový, vinutí, LPCT, třída přesnosti

Abstract

Master's thesis is focused on current instrument transformers, current sensors and low power current transformers. Discussion is made on advantages and disadvantages of each measuring principle. Low power current transformers is then designed and manufactured. Manufactured LPCT is then measured for accuracy class. Results are then compared.

Keywords

Transformer, current, error, instrument, low, power, winding, LPCT, accuracy class

Bibliografická citace:

ZOLICH, L. *Nízkovýkonový přístrojový transformátor proudu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 85 s.
Vedoucí diplomové Ing. Lukáš Dostál.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Nízkovýkonový přístrojový transformátor proudu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **21. května 2018**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Lukášovi Dostálovi za pedagogickou pomoc. Děkuji firmě ABB s.r.o. za poskytnutí tématu diplomové práce, za poskytnuté materiály a prostory. Děkuji Ing. Jiřímu Valentovi, Ph.D a Ing. Tomášovi Křížovi za pomoc při simulacích. Také bych chtěl poděkovat celému TC týmu z ABB v Brně za jejich praktické znalosti, které mi pomohly při práci.

A v neposlední řadě bych chtěl hlavně poděkovat Ing. Miroslavu Hrabčíkovi, Ph.D za jeho trpělivost, poskytnuté znalosti a motivaci. Bez něho by tato diplomová práce nebyla nikdy dopsána.

V Brně dne **21. května 2018**

.....

podpis autora(-ky)

Obsah

1	Úvod	1
2	Přístrojové transformátory proudu	2
2.1	Funkce přístrojového transformátoru proudu	2
2.2	Chyba přístrojového transformátoru proudu a třídy přesností	5
2.2.1	Závislost chyby na proudu a její výpočet	8
2.2.2	Závislost chyby na zátěži	9
2.3	Nadproudová oblast	10
2.4	Zkratová odolnost	11
2.5	Rozpojené sekundární svorky	12
2.6	Druhy přístrojových transformátorů proudu	12
2.6.1	Podpěrné PTP	12
2.6.2	Průchodkové PTP	14
2.6.3	Průchodkové tyčové PTP	14
2.6.4	Přípojnicové násuvné PTP	15
3	Nízkovýkonový přístrojový transformátor proudu	16
3.1	Princip funkce LPCT	16
3.2	Porovnání s přístrojovými transformátory proudu	18
3.3	Porovnání s Rogowského cívkami	19
3.4	Shrnutí rozdílů	21
3.5	Typická aplikace	22
4	Návrh nízkovýkonového přístrojového transformátoru proudu	24
4.1	Vstupní veličiny	24
4.2	Výstupní veličiny	25
4.3	Shrnutí základních parametrů	26
4.4	Návrh vodiče sekundárního vinutí	29
4.5	Materiál jádra LPCT	29
4.6	Rozměry	31
4.7	Magnetické parametry	34
4.8	Výpočet chyby LPCT	36
4.9	Návrh krytu LPCT	40
4.10	Simulace v typické aplikaci LPCT	40
4.10.1	Výpočet dielektrického pole	41
4.10.2	Výpočet magnetického pole	43
5	Výroba LPCT	45
5.1	Jádro LPCT	45
5.2	Sekundární vinutí	46
5.3	Odporový bočník R_{sh}	50

5.4	Vývod LPCT.....	51
5.5	Stínění LPCT.....	52
6	Měření třídy přesnosti LPCT	54
7	Závěr	59
	Literatura	61
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	62
	Přílohy	65
	Příloha 1.....	65
	Příloha 2.....	66
	Příloha 3.....	67
	Příloha 4.....	68
	Příloha 5.....	69
	Příloha 6.....	70
	Příloha 7.....	72
	Příloha 8.....	74

Seznam obrázků

Obr. 1 Náhradní schéma přístrojové transformátoru proudu. [6]	3
Obr. 2 Fázorový diagram přístrojového transformátoru proudu. [5]	5
Obr. 3 Komplexní diagram chyb PTP. [5][6].....	7
Obr. 4 Magnetizační a budící charakteristika. [5].....	9
Obr. 5 Závislost chyb na rozsahu jmenovitého proudu. [5][6].....	9
Obr. 6 Nadproudová charakteristika. [5]	10
Obr. 7 Podpěrné transformátory proudu. [7]	12
Obr. 8 Příklad podpěrného PTP. [6].....	13
Obr. 9 Průchodkový PTP. [7]	14
Obr. 10 Průchodkový tyčový PTP. [7]	14
Obr. 11 Přípojnicový násuvný PTP. [7].....	15
Obr. 12 Náhradní schéma LPCT. [8].....	17
Obr. 13 Porovnání LPCT s běžnými přístrojovými transformátory. [10].....	19
Obr. 14 Náhradní schéma Rogowského cívky. [8][9].....	19
Obr. 15 LPCT (vlevo) a proudový senzor KECA 250 B1. [13] [15].....	22
Obr. 16 Umístění proudových senzorů KECA 80 C104/C165 v rozváděči UGD ZS1. [11] [14].....	23
Obr. 17 Umístění proudových senzorů KECA 250 B1 v rozváděči UGD 550. [12][13]	23
Obr. 18 UG 550 s přístrojovými transformátory proudu. [16].....	23
Obr. 19 Magnetizační charakteristika pro amorfní kov a železo SU.	30
Obr. 20 Detail magnetizační charakteristiky při nižších hodnot.	31
Obr. 21 Rozměry jádra LPCT.	32
Obr. 22 Amorfní jádro s plastovým pouzdrem.	33
Obr. 23 Závislost celkové chyby proudu a jednotlivých TP na primárním proudu.	38
Obr. 24 Závislost fázové chyby a jednotlivých TP na primárním proudu.	38
Obr. 25 Závislost celkové chyby proudu pro LPCT s SU jádrem a jednotlivých TP na násobku primárního proudu.	39
Obr. 26 Závislost fázové chyby pro LPCT s SU jádrem a jednotlivých TP na násobku primárního proudu.....	39
Obr. 27 Plastové pouzdro pro LPCT.....	40
Obr. 28 Detail výstupku krytu LPCT.	40
Obr. 29 Model LPCT v Ansys Maxwell.....	41
Obr. 30 Nastavení elektrostatické simulace.	42
Obr. 31 Intenzita elektrického pole.....	42
Obr. 32 Solution type pro magnetickou simulaci.....	43
Obr. 33 Nastavení proudu přípojnicí.....	44

Obr. 34 Intenzita magnetického pole.	44
Obr. 35 Amorfni jádro s plastovým pouzdem a namotanou textilní páskou.	45
Obr. 36 SU jádro.	46
Obr. 37 Princip kompenzačního vinutí. [8]	47
Obr. 38 Schéma kompenzačního vinutí.	48
Obr. 39 Smysl navíjení kompenzačního vinutí.	48
Obr. 40 Navinuté amorfni jádro.	49
Obr. 41 Navinuté SU jádro.	49
Obr. 42 Odporový bočník LPCT.	50
Obr. 43 Připájený odporový bočník LPCT s amorfni jádrem.	51
Obr. 44 Připájený vývod k LPCT.	52
Obr. 45 Detail dracounu a stínění LPCT.	52
Obr. 46 Motání polovodivé pásky na LPCT.	53
Obr. 47 Hotové LPCT.	53
Obr. 48 Schéma zapojení měření TP LPCT.	54
Obr. 49 Měřicí pracoviště.	54
Obr. 50 Primární vodič a LPCT.	55
Obr. 51 Závislost naměřené chyby pro LPCT s amorfem v rozsahu 0,1-1,2I _n	58
Obr. 52 Závislost naměřené chyby pro LPCT s SU v rozsahu 0,1-1,2I _n	58
Obr. 53 P6 Závislost celkové chyby proudu pro LPCT s amorfni jádrem na primárním proudu v celém rozsahu.	70
Obr. 54 P6 Závislost celkové chyby proudu pro LPCT s SU jádrem na primárním proudu v celém rozsahu.	71
Obr. 55 P7 Závislost naměřené chyby proudu LPCT s amorfem před a po offsetu na primárním proudu v celém rozsahu.	72
Obr. 56 P7 Závislost naměřené chyby proudu LPCT s SU před a po offsetu na primárním proudu v celém rozsahu.	73
Obr. 57 P8 Celkové rozměry LPCT s krytem.	74

Seznam tabulek

Tabulka 1 Dovolené chyby a třídy přesností měřících PTP. [2].....	6
Tabulka 2 Dovolené chyby a třídy přesností měřících PTP pro 0,2S a 0,5S. Chyby platí při 25–100 % jmenovitého břemene. [2].....	6
Tabulka 3 Dovolené chyby a třídy přesnosti jistících PTP. [5][6].....	7
Tabulka 4 Zásadní rozdíly mezi PTP, LPCT a proudovými senzory. [8].....	21
Tabulka 5 Jmenovité vstupní a výstupní parametry LPCT.	27
Tabulka 6 Výstupní parametry pro zkratové proudy na primární straně.....	27
Tabulka 7 Základní parametry v celém měřícím rozsahu LPCT.....	28
Tabulka 8 Naměřené hodnoty celkové chyby proudu a fázové chyby. $I_{1n}=100$ A, $U_{sn}=0,025$ V, $f=50$ Hz, $Z=0,1$ M Ω	56
Tabulka 9 Naměřené hodnoty a hodnoty po funkci offset.....	57
Tabulka 10 P1 Základní a magnetické parametry v celém rozsahu pro LPCT s amorfním jádrem.	65
Tabulka 11 P2 Základní a magnetické parametry v celém rozsahu pro LPCT s SU jádrem.....	66
Tabulka 12 P3 Tabulka závislosti celkové chyby proudu a fázové chyby na primárním proudu pro jednotlivé materiály.....	67
Tabulka 13 P4 Tabulka všech hodnot pro LPCT s amorfním jádrem.	68
Tabulka 14 P5 Tabulka všech hodnot pro LPCT s SU jádrem.....	69

1 ÚVOD

Transformátor je elektrický netočivý stroj pracující na principu elektromagnetické indukce. Přeměňuje přivedené napětí a proud na požadované veličiny při zachování stejného výkonu, pokud se zanedbají ztráty transformátoru. Transformátory mají jednoduchou konstrukci, jsou robustní a nenáročné na obsluhu. [5]

V praxi existuje mnoho druhů transformátorů podle účelu. Existují výkonové transformátory, které se používají v energetice pro rozvod elektrické energie. Dále to jsou transformátory pro měřicí a jistící účely, pro sdělovací techniku, pro oteplovací zkoušky atd. [5]

V průmyslových aplikacích se vyskytují velice vysoké hodnoty proudů a napětí, které nejsou vhodné pro napájení proudových či napěťových cívek měřících a jistících přístrojů. Proto existují přístrojové transformátory proudu a napětí, které přeměňují tyto vysoké hodnoty na přijatelné hodnoty pro měřicí, jistící přístroje a regulační přístroje. Pro přístrojové transformátory proudu bývají výstupní hodnoty zpravidla 1 A nebo 5 A. Přístrojové transformátory proudu a napětí pracují na stejném principu jako běžné transformátory, ale kladou se na ně speciální požadavky. [5]

V posledních letech začal nástup digitálních ochranných a digitálních měřících přístrojů s mikroprocesorovou technikou. Moderní technologie změnila požadavky na přístrojové transformátory proudu a napětí. Zatímco staré ochranné prvky požadovaly od přístrojových transformátorů analogový výstup s velkým výkonem, moderní digitální ochrany požadují na svém vstupu nízkovýkonové hodnoty. Proto nastal velký rozmach senzorů a nízkovýkonových přístrojových transformátorů. [10]

Napěťové senzory pracují na principu odporového nebo kapacitního děliče. Proudové senzory pracují na principu Rogowského cívky. Oba tyto senzory mají nízkonapěťový výstup, který se hodí do digitálních měřících a jistících přístrojů. Technologie těchto senzorů není složitá, avšak stále podléhají výzkumu pro jejich zlepšení. [10]

2 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU

Transformátor proudu je normou definován jako takový transformátor, ve kterém je sekundární proud za normálních podmínek provozu přímo úměrný proudu primárnímu a liší se od něj ve fázi pod úhlem, který je přibližně nulový pro odpovídající směr připojení. Jedná se o transformátor proudu, protože do primárního vinutí není vnučováno napětí, nýbrž měřený proud. [2][4]

Jelikož v praxi neexistuje ideální transformátor, vzniká v přístrojových transformátorech proudu chyba, která je dána fázorovým rozdílem mezi primárním a sekundárním proudem. Fázorová chyba je představována složkou primárního proudu, která je nutná k magnetizaci jádra transformátoru. Tato chyba je jedním ze základních parametrů, která rozděluje PTP do různých tříd přesností, kde každá třída přesnosti určuje použití transformátoru (např. laboratorní měření, měření spotřeby elektrické energie, orientační měření). [5][6]

2.1 Funkce přístrojového transformátoru proudu

Zatímco výkonové transformátory a transformátory napětí se do obvodu zapojují paralelně, přístrojové transformátory proudu se zapojují sériově, stejně jako ampérmetry. Primární vinutí je tvořeno měřeným vodičem (např. přípojnice, kabel) a bývá většinou jednozávitové. Sekundární vinutí je navinuté na magneticky vodivém jádře, které je běžně toroidního tvaru. [5][6]

Převod obecného transformátoru je uváděn dle následující rovnice:

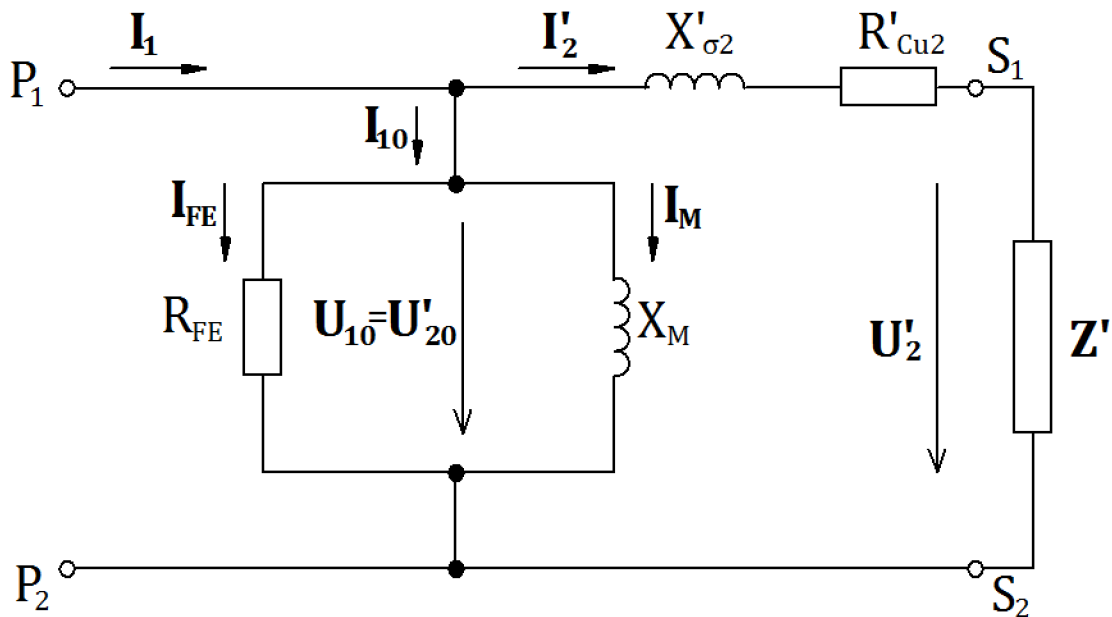
$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} [-; -, -, A, A] \quad (2.1-1)$$

kde $k [-]$ je převod transformátoru, $N_1 [-]$ je počet primárních závitů, $N_2 [-]$ je počet sekundárních závitů, $I_2 [A]$ je sekundární proud a $I_1 [A]$ je primární proud. Z čehož vyplývá, že poměr počtu závitů na primární a sekundární straně transformátoru určuje poměr primárního a sekundárního proudu. Podle normy [1] pro přístrojové transformátory je převod definován jako poměr primární veličiny k sekundární. Tato definice platí pro převod vyjadřován jak poměrem počtu závitů, tak i pro převod vyjadřován poměrem napětí a poměrem proudu. Při návrhu PTP není převod proudu zapisován jako poměr sekundárního proudu k primárnímu, ale naopak. Stejně je převod zapisován i na štítku PTP. Při porovnávání převodu závitů a převodu proudu musí být dle normy [2] převod závitů invertován, aby rovnice (2.1-1 měla řešení:

$$k = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} [-; -, -, A, A] \quad (2.1-2)$$

Tento zápis je velice výhodný pro práci s přístrojovými transformátory proudu, jelikož oba dva zlomky jsou větší než jedna a je lépe pochopena základní funkce. [1][2].

Na Obr. 1 je náhradní schéma PTP, které znázorňuje jeho funkci. Je-li předpokládáno, že všechny prvky schématu jsou lineární, a tudíž všechny napětí a proudy jsou harmonické, tak lze veličiny psát jako komplexní fázory a sestavit tak fázorový diagram. Veškeré sekundární prvky a veličiny jsou přepočítány na počet závitů primárního vinutí pomocí převodu. Ve schématu je pro jednoduchost vynechán odpor primárního vinutí, rozptylová reaktance sekundárního vinutí a vstupní napětí. Tyto prvky se nijak nepodílí na vznik fázorové chyby a zjednoduší se tak tvorba fázorového diagramu. Naopak pro přístrojový transformátor napětí jsou tyto prvky velice důležité, jelikož chyba přístrojového transformátoru napětí je dána úbytky napětí v primárním a sekundárním vinutí. Ve schématu je také zátěž. Jedná se tedy o zatížený transformátor a je předpokládáno, že se jedná o zátěž induktivní. Značení svorek P_1 , P_2 , S_1 a S_2 je dle současné normy IEC [2]. Ve staré literatuře (např. [5] se dá setkat s již nepoužívaným značením, a to velkými písmeny K-L pro primární stranu transformátoru a malými písmeny k-l pro stranu sekundární. [5] [6]



Obr. 1 Náhradní schéma přístrojové transformátoru proudu. [6]

Pro sekundární napětí platí rovnice:

$$U'_2 = Z' \cdot I'_2 \text{ [V; } \Omega, \text{ A]} \quad (2.1-3)$$

kde U'_2 [V] je fázor sekundárního napětí, Z' [Ω] je fázor impedance zátěže (břemene), I'_2 [A] je fázor sekundárního proudu. Apostrofy značí veličiny přepočtené na

primární počet závitů. Vzorce pro přepočítání veličin na primární počet závitů lze nalézt v literatuře [5]. [5][6]

V sekundárním vinutí vzniká úbytek napětí. Důvodem je vlastní činný odpor vinutí R_{Cu2} a jalová rozptylová reaktance $X_{\sigma2}$. Fázorový součet tohoto úbytku napětí a sekundárního napětí je indukované napětí U'_{20} :

$$U'_{20} = (R_{Cu2} + jX_{\sigma2}) \cdot I'_2 + U'_2 \text{ [V; } \Omega, \Omega, A, V] \quad (2.1-4)$$

Proud naprázdno (budící proud) transformátoru I_{10} je složen ze dvou složek. Vlivem střídavého magnetování vznikají v jádře transformátoru ztráty, konkrétně ztráty vířivé a ztráty hysterezní. Tyto ztráty reprezentuje ve schématu činný odpor R_{FE} . Proud procházející tímto odporem je činná složka proudu naprázdno I_{FE} . Druhou složkou proudu naprázdno je jalový proud I_M nazývaný proudem magnetizačním („tokotvorným“) procházející magnetizační reaktancí X_M . Rovnice proudu naprázdno je tedy:

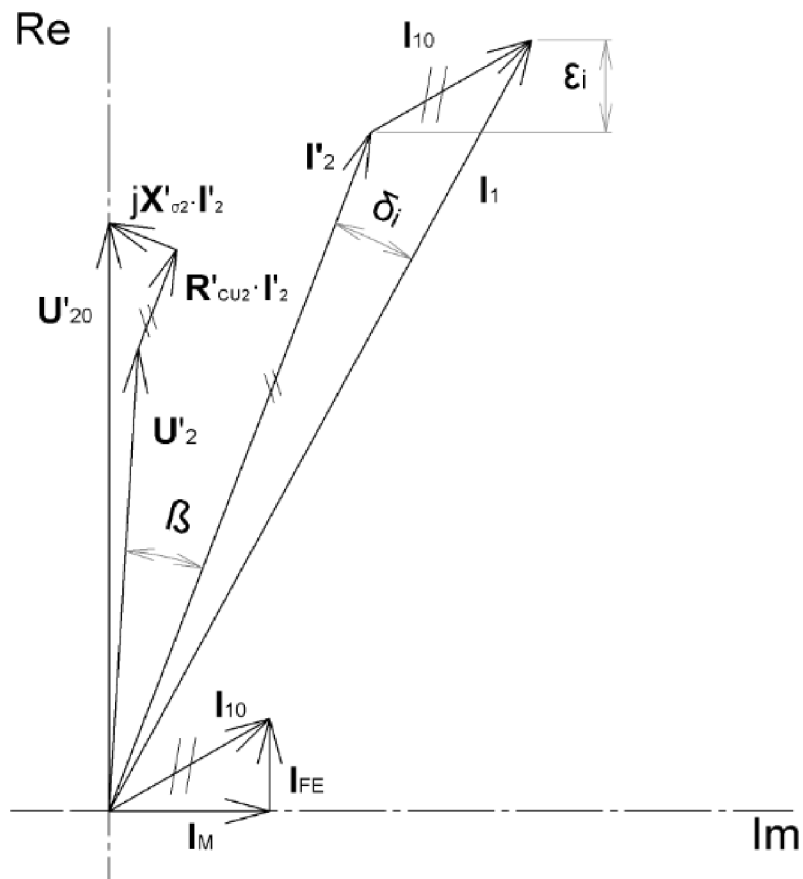
$$I_{10} = I_{FE} + I_M \text{ [A; A, A] [4][5][6] \quad (2.1-5)}$$

Rovnici sekundárního proudu I_2 lze vyjádřit pomocí primárního proudu a proudu naprázdno:

$$I'_2 = I_1 - I_{10} \text{ [A; A, A] \quad (2.1-6)}$$

Rovnice (2.1-6) má pro funkci transformátoru velký význam, jelikož je jedním z důkazů, že převod PTP je zatížen neodstranitelnou chybou, která vzniká proudem I_{10} . Od převedeného sekundárního proudu je odečten proud naprázdno, který je nutný pro magnetizaci jádra. [4][5][6]

Vznik chyby lze velice dobře pochopit z fázorového diagramu Na Obr. 2 je sestrojený fázorový diagram. Imaginární složky jsou vynášeny na vodorovnou osu a složky reálné jsou vynášeny na osu vertikální. Jelikož je uvažována indukční zátěž, tak účinník $\cos\beta$ se nerovná jedné a sekundární napětí U'_2 předbíhá sekundární proud I'_2 o úhel β . Čistě jalový magnetizační proud I_M je vynášen na imaginární osu. Činný proud I_{FE} je pak kolmý na magnetizační proud a jejich fázorový součet je roven proudu naprázdno I_{10} . Přičtením proudu I_{10} k sekundárnímu proudu I'_2 je získán primární proud I_1 . Indukované napětí U'_{20} je součet sekundárního napětí U'_2 a úbytků v sekundárním vinutí, kde činná složka tohoto úbytku $R'_{Cu2} \cdot I'_2$ je rovnoběžná se sekundárním proudem I'_2 a jalová složka $jX'_{\sigma2} \cdot I'_2$ kolmá. Indukované napětí U'_{20} předbíhá magnetizační proud I_M o 90° .



Obr. 2 Fázorový diagram přístrojového transformátoru proudu. [5]

Z Obr. 2 je patrný rozdíl ve fázi a velikosti mezi sekundárním proudem a proudem primárním. Tento rozdíl je způsoben fázorem proudu naprázdno I_{10} a představuje tak celkovou chybu transformátoru. Chybu lze rozložit na proudovou a chybu úhlu. Proudová chyba ε_i [%] je rozdíl ve velikosti fázorů I'_2 a I_1 . Chyba úhlu δ_i [', minuty] vyjadřuje fázový posun mezi proudy I'_2 a I_1 . Jednotky chyby nejsou stupně, ale minuty, jelikož tato chyba dosahuje hodnot do 120'. [5]

2.2 Chyba přístrojového transformátoru proudu a třídy přesnosti

Třídy přesností a jejich příslušné dovolené chyby jsou v Tabulka 1. Lze si všimnout, že dovolené chyby se liší v závislosti na hodnotě primárního proudu a v závislosti na připojené jmenovité zátěži. Chyba proudu totiž není konstantní, ale je závislá na několika veličinách, jako je hodnota primárního proudu, hodnota jmenovité zátěže, frekvence a účinníku. Důvod těchto závislostí je vysvětlen v následujících kapitolách. [5]

V úvodu bylo vysvětleno, že PTP se používají pro měřicí a jistící systémy. Jsou kladeny rozdílné požadavky na chyby a tříd přesností pro měřicí PTP a jistící PTP. V Tabulka 1 jsou hodnoty pro měřicí PTP. Tabulka 3 ukazuje třídy přesností a dovolené chyby pro jistící PTP. Chyby jistících PTP nesmějí překročit hodnoty v Tabulka 3. Tento požadavek platí pro jmenovitou zátěž a jmenovitou frekvenci v rozsahu 50-100 % jmenovitého proudu I_{IN} . V Tabulka 3 je uvedena i chyba při jmenovitém nadproudu. Jistící PTP musí totiž dokázat přenést informace i v oblastech nadproudů a zkratech, aby ochrany byly schopny zapůsobit. Bližší popis bude uveden v dalších kapitolách. Třídy přesností jistících PTP jsou uváděny s písmenem „P“, z anglického slova protection (ochrana). [2] [5][6]

Dle třídy přesnosti je určeno, v jaké oblasti se měřicí transformátor používá [2][5][6]:

- 0,1 – přesná laboratorní měření
- 0,2 – laboratorní měření
- 0,2S - rozšířený násobek jmenovitého proudu, laboratorní měření
- 0,5 - měření spotřeby elektrické energie
- 0,5S - rozšířený násobek jmenovitého proudu, měření spotřeby elektrické energie
- 1 - podružná měření
- 3 - orientační měření

Tabulka 1 Dovolené chyby a třídy přesností měřících PTP. [2]

TP	Dovolené chyby ε_i [%]				Dovolené chyby δ_i [minut]			
	Primární proud v $\%I_n$				Primární proud v $\%I_n$			
	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,40	0,20	0,10	0,10	15,00	8,00	5,00	5,00
0,2	0,75	0,35	0,20	0,20	30,00	15,00	10,00	10,00
0,5	1,50	0,75	0,50	0,50	90,00	45,00	30,00	30,00
1	3,00	1,50	1,00	1,00	180,00	90,00	60,00	60,00

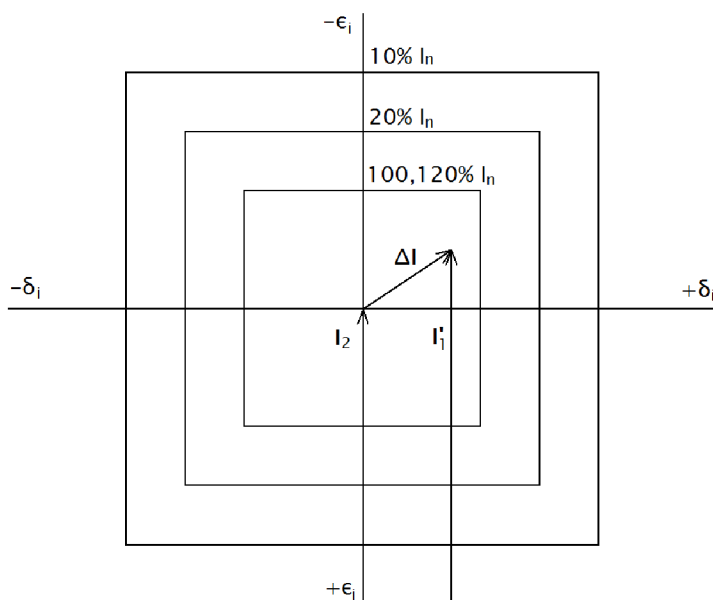
Tabulka 2 Dovolené chyby a třídy přesností měřících PTP pro 0,2S a 0,5S. Chyby platí při 25-100 % jmenovitého břemene. [2]

TP	Dovolené chyby ε_i [%]					Dovolené chyby δ_i [minut]				
	Primární proud v $\%I_n$					Primární proud v $\%I_n$				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30

Tabulka 3 Dovolené chyby a třídy přesnosti jistících PTP. [5][6]

Třída přesnosti	Chyba proudu při jmenovitém primárním proudu ε_i [%]	Chyba úhlu při jmenovitém primárním proudu δ_i [min]	Celková chyba při jmenovitém nadproudu [%]
5P	1	60	5
10P	3	-	10

Pro popis a kontrolu chyb se používá komplexního diagramu, který vidět na OBR. V těchto diagramech jsou uvažovány za výchozí sekundární veličiny. Veškeré veličiny jsou přepočteny na počet závitů sekundárního vinutí. Pro tvorbu komplexních diagramů je uvažován počátek souřadnicového systému koncový bod fázoru I_2 . Celková chyba je značena jako ΔI místo I_{10} . Hodnota chyby úhlu dosahuje řádově minut, proto je možné fázory I_2 a I'_1 kreslit jako rovnoběžné. Jak již bylo zmíněno výše, chyby nejsou konstantní pro celý rozsah jmenovitého proudu. Proto jsou v komplexních diagramech určeny hranice pro příslušný rozsah proudu. Principem je, že koncový bod fázoru přepočteného proudu I'_1 se musí pohybovat uvnitř pole chyb pro určitou hodnotu jmenovitého proudu (10-120 % I_{1n}). Jestli by koncový bod fázoru přesahoval přes dovolené pole chyb, tak transformátor dané třídy přesnosti nevyhovuje. [5][6]



Obr. 3 Komplexní diagram chyb PTP. [5][6]

2.2.1 Závislost chyby na proudu a její výpočet

Při této závislosti se uvažuje konstantní zátěž. Proud I_{20} (jak již bylo zmíněno výše, při popisu chyby se uvažují za výchozí sekundární veličiny), který je příčinou chyby transformátoru, má stejnou fyzikální podstatu jako indukované napětí U_{20} . Indukované napětí lze vyjádřit i pomocí magnetického toku:

$$U_{20} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot \Phi \cdot N_2 = 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot N_2 \text{ [V; Hz, Wb, -]} \quad (2.2-1)$$

kde U_{20} = indukované napětí [V], f = frekvence [Hz], Φ = magnetický tok [Wb] a N_2 = počet závitů sekundárního vinutí [-]. [5][6]

Magnetický tok je vypočten dle rovnice:

$$\Phi = B \cdot S_{Fe} \text{ [Wb; T, m}^2\text{]} \quad (2.2-2)$$

B = magnetická indukce [T], S_{Fe} = průřez magnetického obvodu (jádra) transformátoru [m²]

Proud I_{20} a indukované napětí U_{20} tedy úzce souvisí s magnetickou indukcí. Tvrzení je dokázáno rovnicemi (2.1-4 a (2.2-1. Změní-li se proud, změní se i napětí U_{20} , a tedy i magnetická indukce. [5][6]

Pro magnetické napětí platí rovnice:

$$N_2 \cdot I_{20} = H_0 \cdot l_m \text{ [-, A, A} \cdot \text{m}^{-1}\text{, m]} \quad (2.2-3)$$

kde H_0 [A·m⁻¹] je hodnota jednotkového magnetického napětí a l_m [m] je délka střední siločáry magnetického obvodu. Hodnotu H_0 lze odečíst z magnetizační charakteristiky použitého materiálu. Délku střední siločáry lze vypočítat z geometrických rozměrů jádra transformátoru. Rovnice budícího proudu je tedy:

$$I_{20} = \frac{H_0 \cdot l_m}{N_2} \text{ [A; A} \cdot \text{m}^{-1}\text{, m, -]} \quad (2.2-4)$$

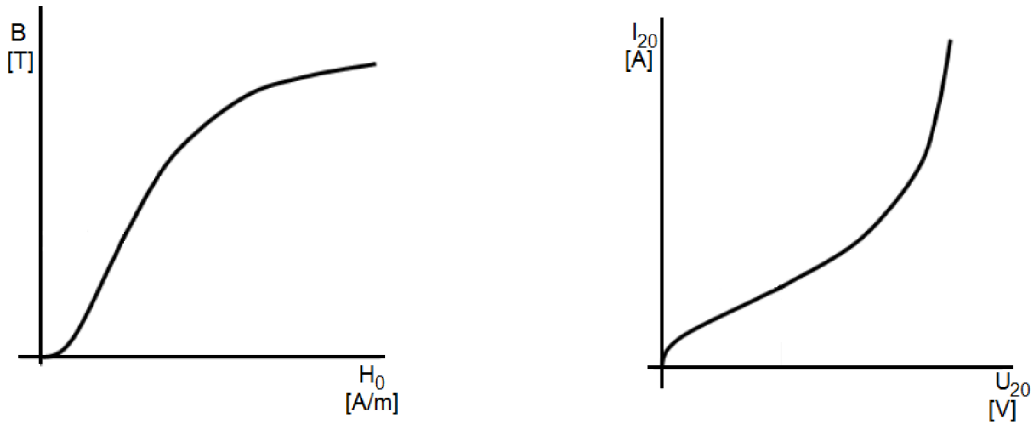
Ze závislosti magnetické indukce na intenzitě magnetického pole $B=f(H)$ lze sestavit budící charakteristiku $I_{20}=f(U_{20})$. Charakteristiky jsou na Obr. 4. Budící charakteristika je závislost celkové chyby na indukovaném napětí. Tuto závislost lze získat buď výpočtem z magnetizační charakteristiky použitého materiálu, nebo změřit jako závislost budícího proudu na přiloženém napětí. Z těchto závislostí je tedy možné odečíst hodnotu budícího proudu a vypočítat tak proudovou chybu transformátoru dle následující rovnice. [5][6]

$$\varepsilon_i = \frac{I_{20}}{I_{2n}} \cdot 100 \text{ [%; A, A]} \quad (2.2-5)$$

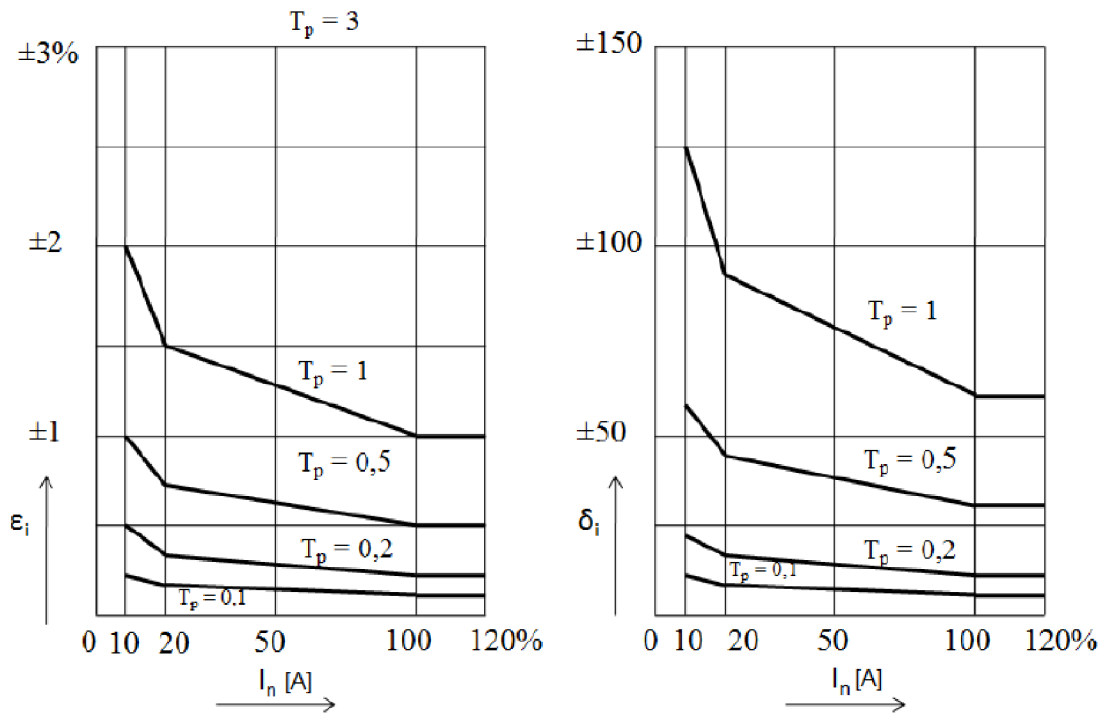
Z charakteristik na Obr. 4 je patrné, že závislosti jsou nelineární a největší chyby transformátor dosahuje v oblasti nasycení magnetického obvodu. Naopak nejmenší chyba je v lineární oblasti magnetizační charakteristiky, tedy v bodě, kde je maximální hodnota permeability materiálu. Jmenovitý stav transformátoru by se tedy měl pohybovat v blízkosti tohoto bodu, avšak je nutné brát zřetel na všechny

podmínky dané třídy přesnosti, a hlavně na nadproudy, které mohou způsobit nasycení magnetického materiálu a tím ohrozit stav transformátoru. [5]

Součástí dokumentace PTP jsou i charakteristiky na Obr. 5. Jedná se o závislosti chyb na rozsahu jmenovitého proudu pro dané třídy přesnosti.



Obr. 4 Magnetizační a budící charakteristika. [5]



Obr. 5 Závislost chyb na rozsahu jmenovitého proudu. [5][6]

2.2.2 Závislost chyby na zátěži

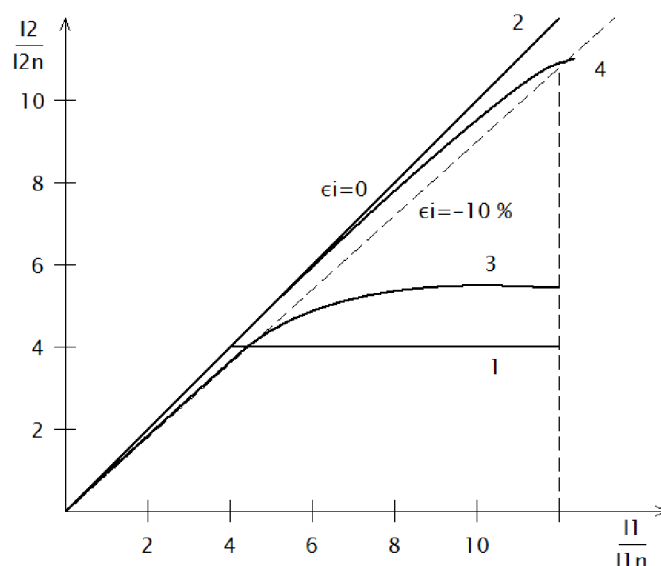
Při rozboru této závislosti se považuje konstantní sekundární proud I_2 , který je dán převodem transformátoru. Jestliže je na sekundárních svorkách transformátoru měněna zátěž (velikost nebo fáze), tak se mění i sekundárního napětí. Tato závislost plyne z rovnice (2.1-3. Na změnu sekundárního napětí U_2 pak reaguje indukované

napětí U_{20} , jak vyplývá z rovnice (2.1-4). Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, s indukovaným napětím úzce souvisí magnetická indukce (je přímo úměrná tomuto napětí) podle rovnice (2.2-1). Magnetické indukci odpovídá magnetické napětí a dle rovnice (2.2-3) i budící proud I_{20} (I_{10}), což je celková chyba transformátoru. Zvyšuje-li se zátěž, tak roste i celková chyba, avšak ne lineárně, jak vyplývá z Obr. 4. [5]

2.3 Nadproudová oblast

V nadproudové oblasti pracuje transformátor při přetížení a zkratech. Přístrojový transformátor proudu musí být schopen mechanicky odolat těmto stavům a nesmí způsobit svým provozem nebezpečí obsluze. [5]

Chování PTP v nadproudové oblasti popisuje nadproudová charakteristika. Je to závislost sekundárního proudu na primárním proudu. Charakteristika je na Obr. 6. [5]



Obr. 6 Nadproudová charakteristika. [5]

Význam jednotlivých přímek na Obr. 6:

- 1 - ideální měřící PTP ($FS < 5$)
- 2 - ideální jistící PTP ($ALF \rightarrow \infty$)
- 3 - skutečný měřící PTP ($FS < 5$)
- 4 - skutečný jistící PTP ($ALF > 10$)

Z charakteristiky lze vidět, že se kladou jiné požadavky na měřící PTP a jiné na jistící PTP. Funkci měřících PTP v oblasti nadproudů určuje nadproudové číslo FS (z angl. „security factor“). FS je násobek jmenovitého primárního proudu, při kterém proudová chyba dosahuje hodnoty až 10 %. Charakteristika ideálního měřícího transformátoru proudu je na jako přímka 1. Do určitého násobku primárního proudu má ideální převod. Při vyšším násobku primárního proudu již sekundární proud nepřenáší, tedy při zvyšujícím se primárním proudu zůstává sekundární

proud na konstantní hodnotě. Tím by se zamezilo zničení připojených měřících přístrojů a byly by tedy chráněny před účinky nadproudů. Skutečný měřící transformátor se chová podle přímky 3. Lze vidět, že skutečný měřící transformátor je zatížen celkovou chybou a od určitého násobku nepřestává dodávat sekundární proud do zátěže. [5]

U jistících transformátorů je nadproudové číslo značeno ALF (z angl. „accuracy limit factor“) a má stejný význam jako u měřících transformátorů. Ideální jistící transformátor by se měl pohybovat po přímce 2 s chybou $\varepsilon_i=0$ %. Měl by být schopen přenášet proud až do nejvyšších hodnot primárního proudu, aby jistící přístroje připojená na sekundární straně transformátoru mohly zapůsobit a reagovat na zkratové proudy. [5]

V praxi samozřejmě neexistuje ideální transformátor a nejde tak docílit ideálních charakteristik. Pro měřící transformátory by mělo být FS co nejmenší. Naopak u jistících by mělo být ALF co největší. [5]

2.4 Zkratová odolnost

Zkratová odolnost je definována jako schopnost transformátoru ustát škodlivé účinky zkratových proudů, jako jsou tepelné, elektrické a dynamické účinky. [5]

Norma [2] definuje celkem tři zkratové proudy:

- Jmenovitý krátkodobý tepelný proud I_{th} – je to maximální hodnota primárního proudu, kterou je transformátor při zkratovaných sekundárních svorkách schopen odolat po určitou krátkou dobu (1 s), aniž by byl nějak poškozen
- Jmenovitý nepřetržitý tepelný proud I_{cth} – hodnota proudu, která může téct primárním vinutím po celou dobu, aniž by byla překročena dovolená teplota při připojené zátěži.
- Jmenovitý dynamický proud I_{dyn} – maximální špičková hodnota primárního proudu při zkratovaných sekundárních svorkách, kterou je transformátor schopen odolat, aniž by byl elektricky či mechanicky poškozen vlivem elektromagnetických sil.

Zkratová odolnost se dělí na vnější a vnitřní. Vnější zkratová odolnost je schopnost odolat zkratovým účinkům v okolí transformátoru (dynamické síly na primární přívody transformátoru, či na jeho izolátory). Vnitřní zkratová odolnost je schopnost transformátoru odolat těm zkratovým účinkům, které vznikají v něm samotném. Jedná se o vlivy na vinutí transformátoru, magnetický obvod, izolace atd. Vnitřní zkratová odolnost ovlivňuje návrh transformátoru, kde se účinky zkratových proudů nesmí zanedbat, např. vodiče vinutí musí být na zkratové proudy dimenzovány a jejich izolace nesmí být zničena. [5]

2.5 Rozpojené sekundární svorky

Jestliže k přístrojovému transformátoru proudu není připojena zátěž, musí se sekundární svorky zkratovat. Jestliže by nebyly zkratovány, vznikl by tak havarijní stav. Transformátor by tak pracoval v režimu naprázdno. Primární proud by se spotřebovával pouze na magnetizaci jádra a došlo by tak k nasycení magnetického obvodu. Indukované napětí by dosahovalo hodnot řádově až kV, což je pro obsluhu velice nebezpečné. [5]

Proto je nutné, aby při nepřipojené zátěži byly sekundární svorky PTP zkratovány.

2.6 Druhy přístrojových transformátorů proudu

Existuje mnoho typů PTP podle jejich použití. PTP nemusejí být pouze jednozávitové, tedy nemusí mít pouze jeden primární závit. Primární vodič může procházet jádrem transformátoru vícekrát. Kolikrát je primární vodič jádrem provlečen, tolikrát má transformátor primárních závitů. Transformátory proudu mohou obsahovat více jader. Jedno jádro má vlastnosti vhodné pro měření a druhé jádro slouží pro jištění.

2.6.1 Podpěrné PTP

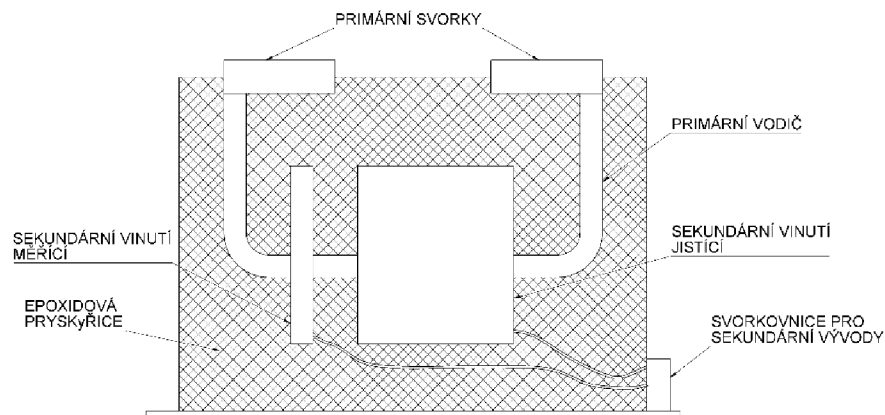
Tyto transformátory proudu slouží i jako podpěra pro primární vodič. Mohou být namontovány v jakékoliv poloze. Pro zvětšení povrchové vzdálenosti mohou být na transformátoru žebra, které tuto vzdálenost zvětší. [7]



Obr. 7 Podpěrné transformátory proudu. [7]

Na Obr. 7 jsou podpěrné transformátory firmy ABB. Jedná se o typ TPU (vlevo) a TPE (vpravo). Největší napětí, které tyto transformátory snesou, je 40,5 kV. Primární proud je v rozmezí 10—200 A a sekundární proud je 1 A nebo 5 A. Jmenovitý krátkodobý tepelný proud do 100 kA/ 1 s. TPU obsahují celkem až šest

sekundárních vinutí. Není tedy pravidlem, že jeden transformátor musí mít pouze jedno sekundární vinutí. [7]



Obr. 8 Příklad podpěrného PTP. [6]

Na Obr. 8 je příklad provedení podpěrného PTP. Vodič, který je měřen, je připojen pomocí spojovacího materiálu (např. šroub a podložka) na primární svorky. K primárním svorkám je svařen primární vodič, který prochází dvěma jádry (jistícím a měřícím), na kterých je navinuto sekundární vinutí. Jádra transformátorů musejí být bandážována. Je to z důvodu zvýšení mechanické pevnosti. Většinou je na povrch jader nanášena malá vrstva neoprenu a vrstva lepenky. Neopren jádro chrání při zalévání transformátoru do epoxidové pryskyřice. Ta totiž při tuhnutí tlačí na jádro a na vinutí. Neopren tento tlak zmenší a ochrání tak jádro před tlakem epoxidu a sekundárního vinutí. Lepenka slouží pro elektrickou izolaci.

Vývody sekundárních vinutí jsou vedeny na svorkovnici transformátoru. To vše je zalito (např. vakuovým litím) do epoxidové pryskyřice kvůli izolačním vlastnostem a mechanické pevnosti. Na dolní straně transformátoru je základová deska, která je k transformátoru připevněna zálitkovými maticemi. Základová deska slouží pro upevnění transformátoru k určitému povrchu, např. stěně rozváděče. Na základové desce je namontována výše zmíněná svorkovnice.

Podpěrné transformátory proudu mohou obsahovat i kapacitní děliče, které slouží pro indikaci napětí.

2.6.2 Průchodkové PTP

Jsou to transformátory proudu, které nemají vlastní primární vodič. Mají takovou izolaci, že mohou být použity jako průchodky. Na obrázku níže je transformátor proudu od ABB typu BBO. Obsahuje až tři sekundární vinutí. Primární proud je v rozsahu 600—5000 A, sekundární proud 1 A nebo 5 A a jmenovitý krátkodobý tepelný proud až 80 kA/ 1 s. Lze si všimnout, že je rovněž zalit v epoxidové pryskyřici. Epoxidová pryskyřice je nejpoužívanější formou izolace pro přístrojové transformátory. Chrání transformátor před vnějšími mechanickými i elektromagnetickými vlivy. [7]



Obr. 9 Průchodkový PTP. [7]

2.6.3 Průchodkové tyčové PTP

Jsou to průchodkové transformátory, které mají vestavěný primární vodič. Tento vodič je ve tvaru tyče či pásu. Většinou se jedná o měděnou přípojnicí. Na Obr. 10 je tyčový transformátor proudu od firmy ABB typu TTR. Primární proud je v rozsahu 100—2500 A, sekundární proud je 1 A nebo 5 A a jmenovitý krátkodobý tepelný proud do 100 kA/ 1 s.



Obr. 10 Průchodkový tyčový PTP. [7]

2.6.4 Přípojnicové násuvné PTP

Násuvné PTP nemají vestavěný primární vodič. Mohou být nasunuty na vodič či přípojnici. Na Obr. 11 je transformátor proudu rovněž od firmy ABB typu KOKS. Tyto transformátory mají rozsah primárního proudu 500-4000 A, sekundární proud je rovněž jako u ostatních transformátorů proudu 1 A nebo 5 A a jmenovitý krátkodobý tepelný proud do 90 kA/ 1 s. Obsahují až šest sekundárních vinutí.



Obr. 11 Přípojnicový násuvný PTP. [7]

3 NÍZKOVÝKONOVÝ PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR PROUDU

Nízkovýkonové přístrojové transformátory proudu (LPCT— z angl. Low Power Current Transformer) jsou řazeny do kategorie elektronických transformátorů proudu. Elektronické transformátory proudu popisuje norma [3] a definuje je jako takové transformátory, jejichž výstup ze sekundárního převodníku je přímo úměrný proudu primárnímu a liší se od něj fází pod známým úhlem pro odpovídající směr připojení. Je nutno podotknout, že norma [3] se netýká pouze LPCT, ale že do elektronických transformátorů proudu spadají i Rogowského cívky. Rozdíl mezi LPCT a Rogowského cívkou je ten, že LPCT obsahují železné jádro a pracují tak na principu klasického transformátoru, zatímco Rogowského cívky mají jádro z nevodivého materiálu. Rogowského cívky jsou ve své podstatě vzduchové cívky.

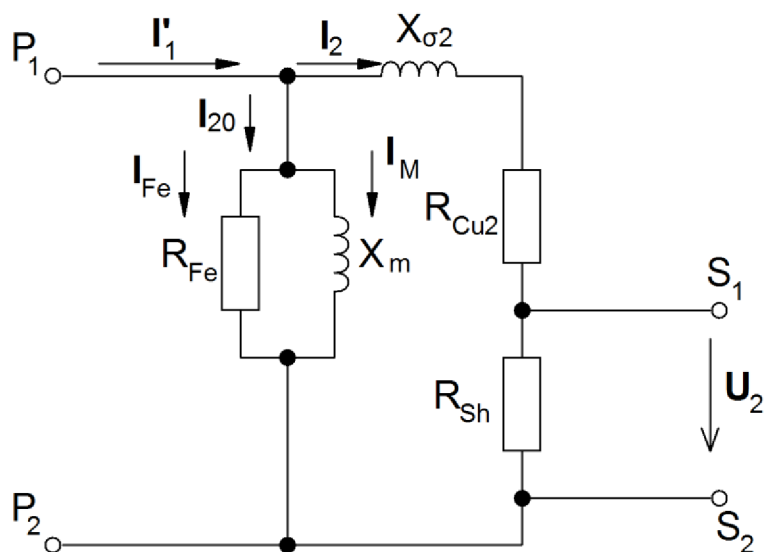
V definici pro elektronické transformátory proudu je použito slovo „sekundární převodník“. Sekundárním převodníkem se myslí prvek, který přemění přenášený signál na hodnotu úměrnou primárnímu proudu pro měřicí, jistící nebo řídicí přístroje. Elektronické transformátory proudu mohou mít výstupy buď analogové nebo digitální. Jestliže se jedná o analogové elektronické transformátory, tak sekundární převodník přímo napájí systémy připojené na sekundární svorky. [3]

3.1 Princip funkce LPCT

LPCT je v základu obyčejný přístrojový transformátor proudu. Obsahuje primární vodič, magnetický obvod ve formě vodivého jádra a sekundární vinutí. Hlavním rozdílem LPCT a PTP je ten, že LPCT má na sekundární straně trvale připojen odporový bočník, který převádí klasický proudový výstup na napětový. Tento bočník je nedílnou součástí nízkovýkonového transformátoru proudu a při návrhu LPCT je esenciálním prvkem. [8]

Jak již název napovídá, na výstupu LPCT je velice malý výkon. Pohybuje se v řádech μW . Výstupem tedy nejsou vysoká napětí, ale napětí pohybující se v řádech stovek mV až jednotek voltů. Aby to bylo možné, tak na sekundární straně musí být hodnota sekundárního proudu malá a velikost odporového bočníku rovněž malá. To je docíleno velkým počtem sekundárních závitů a malou velikostí magnetického jádra. [8]

Náhradní schéma LPCT je na Obr. 12.



Obr. 12 Náhradní schéma LPCT. [8]

Lze vidět, že náhradní schéma LPCT je vcelku shodné s náhradním schématem PTP na Obr. 1. Význam veličin je rovněž stejný. Na sekundární straně je přidán odpor R_{sh} (sh— z angl. shunt= bočník), což je výše zmíněný důležitý bočník LPCT.

Na Obr. 12 jsou rovněž fázorové veličiny. Je tedy předpokládáno, že veškeré veličiny mají harmonické průběhy a všechny prvky schématu jsou lineární. Při popisu je vycházeno ze sekundární strany, tedy všechny veličiny jsou přepočtené na počet závitů sekundárního vinutí.

Sekundární proud I_2 prochází odporem R_{sh} a vytváří na něm napětí U_2 dle Ohmova zákona:

$$U_2 = R_{sh} \cdot I_2 \text{ [V; } \Omega, \text{ A]} \quad (0-1)$$

Sekundární proud I_2 je dán převodem transformátoru:

$$U_2 = R_{sh} \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot I_1 \text{ [V; } \Omega, -, - \text{ A]} \quad (0-2)$$

Převod LPCT:

$$k = \frac{1}{R_{sh}} \cdot \frac{N_2}{N_1} \text{ [}\Omega^{-1}; -, - \text{]} \quad (0-3)$$

Sekundární napětí po dosazení převodu LPCT:

$$U_2 = \frac{1}{k} \cdot I_1 \text{ [V; } \Omega, -, - \text{ A]} [8] \quad (0-4)$$

LPCT stejně jako PTP jsou zatíženy neodstranitelnou chybou, které způsobuje magnetické jádro. LPCT tedy obsahuje proudovou chybu a chybu úhlu.

3.2 Porovnání s přístrojovými transformátory proudu

Jak již bylo zmíněno výše, hlavním rozdílem mezi PTP a LPCT je výstup na sekundárních svorkách. PTP má klasický výstup ve formě sekundárního proudu a LPCT mají výstup napěťový, který je způsoben průtokem sekundárního proudu odporovým bočníkem R_{sh} . U PTP je hodnota sekundárního proudu 1 A nebo 5 A. U LPCT se sekundární proud pohybuje od jednotek miliampér až do stovek ampér. Sekundární napětí dosahuje hodnot do 5 V, které je optimální pro moderní ochrany s mikroprocesory. [8] [10]

Magnetické jádra LPCT mají velice malý průřez a tím i malou hodnotu jmenovité magnetické indukce. Pracovní bod na magnetizační charakteristice se pohybuje níže než u PTP. Z toho vyplývají dva důležité poznatky. Prvním je, že s hodnotou magnetické indukce a průřezu souvisí budící proud transformátoru, který způsobuje celkovou chybu transformátoru. Celková chyba LPCT je v porovnání s celkovou chybou PTP velice malá. Není totiž nutné velké hodnoty budícího proudu na magnetizaci jádra. Druhý poznatek je ten, že LPCT má velkou rezervu do nasycení magnetického jádra. Hodnoty FS a ALF jsou tedy v podstatě větší a LPCT může měřit do větších rozsahů než PTP. [8]

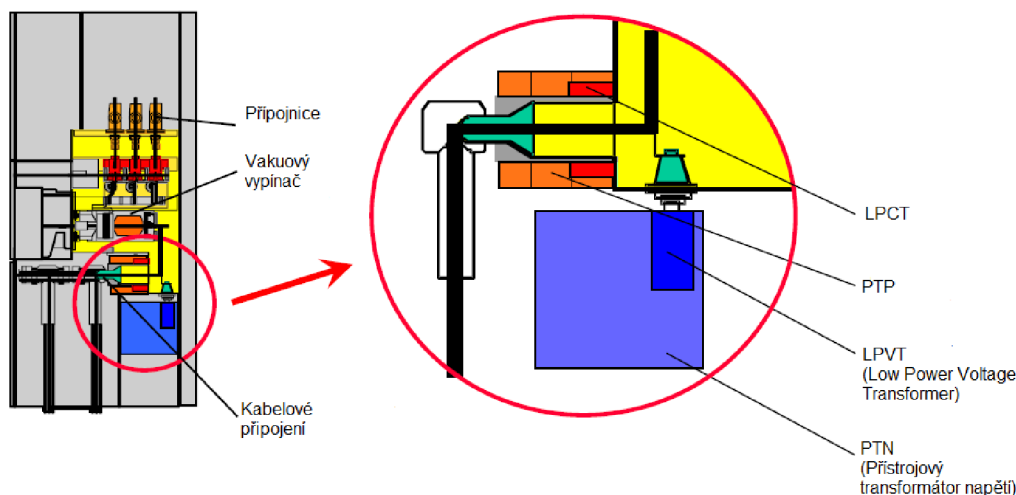
U PTP je daná třída přesnosti transformátoru garantovaná do rozsahu $0,1 \cdot I_n$ až $1,2 \cdot I_n$. U LPCT je tento rozsah rozšířen až do dané hodnoty jmenovitého nepřetržitého tepelného proudu I_{cth} či do dané hodnoty jmenovitého krátkodobého tepelného proudu I_{th} . U proudů I_{th} se problém netýká chyb a tříd přesností, nýbrž životnosti jednotlivých součástí LPCT. Třída přesnosti, a tedy celková chyba je v celém rozsahu ve své podstatě lineární. [8]

Z předchozího výkladu vyplývá další výhoda LPCT oproti PTP. Jestliže LPCT mohou pracovat a garantovat třídu přesnosti až do hodnot zkratových proudů, mohou LPCT obsahovat pouze jedno jádro pro měřicí a zároveň jistící účely. Tím se redukuje hmotnost a velikost LPCT. [8]

Hodnota sekundárního proudu je dána převodem, a to jak u PTP, tak i u LPCT. Aby LPCT mohlo mít malou hodnotu sekundárního proudu, je potřeba velký počet závitů sekundárního vinutí. Počet závitů sekundárního vinutí u LPCT dosahuje hodnot stovek až několika tisíců závitů. Avšak to neznamená, že drasticky vzroste spotřeba materiálu na vodiče vinutí či celková velikost LPCT. Průměr vodiče sekundárního vinutí u LPCT bývá velice malý, pohybující v řádech setin milimetrů, jelikož sekundárním vinutím protékají malé proudy. Toto vinutí musí být dimenzováno, aby sneslo hodnoty daných zkratových proudů na primární straně transformátoru. [8]

Na Obr. 13 je porovnání LPCT s běžnými PTP v typické aplikaci v rozváděči. Lze vidět, že LPCT jsou velikostně mnohem menší. To přispívá k minimalizaci rozváděče. LPCT se totiž díky svým malým rozměrům nemusí zalévat do epoxidové

pryskyřice, ale místo toho mohou být vloženy do plastových pouzder. Taková pouzdra musí být náležitě odstíněna od ostatních elektromagnetických polí v rozváděči. Kvůli nízkým výstupním hodnotám je LPCT velice náchylné na vnější rušení. Výstupní kabely z LPCT musí být stíněné. Většinou jsou ve formě kroucené dvojlinky. [8] [10]

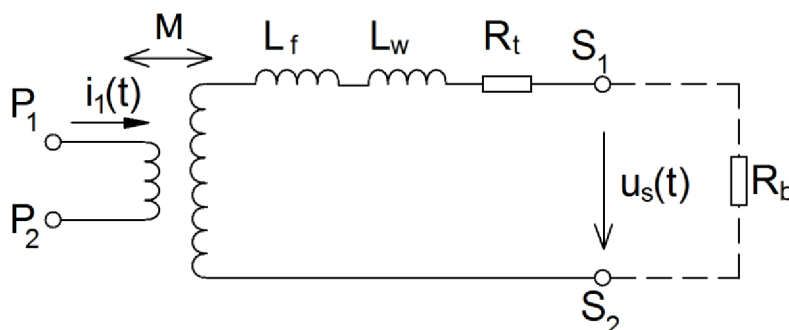


Obr. 13 Porovnání LPCT s běžnými přístrojovými transformátory. [10]

Největší výhodou LPCT oproti PTP je možnost rozpojených sekundárních svorek. LPCT nemusejí být zkratovány, pokud jsou mimo provoz. To zajišťuje odporový bočník R_{sh} . Nevzniká tak nebezpečí obsluhy ani možnost saturace jádra. [8]

3.3 Porovnání s Rogowského cívkami

Náhradní schéma Rogowského cívkami je na Obr. 14.



Obr. 14 Náhradní schéma Rogowského cívkami. [8][9]

Význam jednotlivých veličin na Obr. 14 [8]:

L_f = rozptylová indukčnost sekundárního vinutí [H]

L_w = indukčnost sekundárního vinutí [H]

R_t = odpor sekundárního vinutí [Ω]

R_b = sekundární zátěž [Ω]

M = vzájemná indukčnost [H]

Rogowského cívka je toroidní vzduchová cívka, jelikož nemá magneticky vodivé jádro. Sekundární vinutí je navinuto na nevodivém materiálu. Rogowského cívka musí pracovat v režimu naprázdno. Proto zátěž musí být nekonečně velká. Jestliže Rogowského cívka pracuje v režimu naprázdno, tak pro sekundární napětí $u_2(t)$ platí rovnice:

$$u_2(t) = M \cdot \frac{di_1(t)}{dt} [V; H, A] \quad (0-1)$$

Sekundární napětí je tedy rovno derivaci měřeného sekundárního proudu $i_1(t)$. Aby byla získána informace o měřeném proudu, tak sekundární napětí je nutno integrovat. Fázový posun mezi primárním proudem a sekundárním napětím je 90° . [4][8][9]

Výstupní napětí u LPCT není nutno integrovat, aby se získala informace o hodnotě primárního proudu. Sekundární napětí LPCT je totiž přímo úměrné primárnímu proudu. Rogowského cívky tedy musí obsahovat buď vlastní integrátor, nebo musí být obsažen v připojeném obvodu. Toto je nevýhoda oproti LPCT. [8]

LPCT jsou založena na již známé technologii transformátorů proudu. Novým prvkem je odporový bočník, ale znalosti a technologie rezistorů jsou dnes již velice známé a vyvinuté. Rogowského cívky musí mít přesnou topologii sekundárního vinutí, aby měření nebylo ovlivněno polohou Rogowského cívky. Sekundární napětí Rogowského cívky závisí na vzájemné indukčnosti M , která musí být konstantní a nijak ovlivňována vnějším prostředím, aby byla zachována přesnost měření. Proto musí být materiály použité pro Rogowského cívku stabilní ve velkém rozsahu teplot. Nevodivé jádro se nesmí nijak deformovat vlivem tepla, jelikož by způsobilo deformaci sekundárního vinutí, které je navinuto podle přísných topologických pravidel. Stejně tak sekundární vinutí musí být dimenzováno na pracovní teploty, aby nebylo nijak deformováno. [4][8]

Nevodivé jádro Rogowského cívky má i velkou výhodu. Jelikož je jádro Rogowského cívky magneticky nevodivé, nemůže nikdy dojít k saturaci jádra. Rogowského cívka zajišťuje linearitu závislosti sekundárního napětí na primárním proudu v obrovském rozsahu. Rozsah je omezen zkratovými proudy, které by tepelně a mechanicky narušily či deformovaly části Rogowského cívky.

3.4 Shrnutí rozdílů

Na základně předchozích poznatků je možno shrnout rozdíly mezi běžnými přístrojovými transformátory proudu, LPCT a proudovými senzory (Rogowského cívka). V Tabulka 4 jsou vypsány základní rozdíly, výhody a nevýhody uvedených technologií měření proudu.

Tabulka 4 Zásadní rozdíly mezi PTP, LPCT a proudovými senzory. [8]

Technologie	Rozpojené sekundární svorky	Víceúčelovost pro měření a jištění	Rozsah břemene	Fázový posun
PTP 1 A / 5 A	Nebezpečné	Vyžaduje samostatná jádra pro přesnější měření a jištění	V rámci rozsahu daného výrobcem	Cca 5' až 50' (minut)
Proudový senzor	Bezpečné	Přijatelné pro určitý rozsah měření (chyba při malých proudech)	Kalibrováno na určité břemeno	Zavádí posun -90°
LPCT	Bezpečné	Cca 50 A až 25 kA pro měření i jištění bez saturace jádra	Udává se nejmenší hodnota odporu zátěže	<10' (minut)

Jak je vysvětleno v kapitole 2.5, PTP nemůže pracovat ve stavu naprázdno, jelikož by se na sekundárních svorkách vyskytlo nebezpečné napětí. Toto neplatí u proudových senzorů ani u LPCT. Proudové senzory postrádají magnetická jádra, tudíž nemůže dojít k jejich saturaci a výskytu nebezpečného napětí. LPCT mají sekundární obvod neustále spojený odporovým bočником. Jestliže by došlo ke zničení tohoto bočníku tepelnými či mechanickými vlivy, došlo by tak k rozpojení sekundárního obvodu a LPCT by pracovalo v režimu naprázdno a došlo by k havarijnímu stavu. Není tedy zaručena stoprocentní bezpečnost. [8]

U PTP s nižší třídou přesnosti se používají zvláště magnetická jádra pro měření a jištění. Kladou se totiž jiné požadavky na měřící PTP a jistící PTP jak je to popsáno v kapitole 2.3. Proudové senzory mohou pracovat zároveň jako měřící i jistící díky jejich spolupráci s digitálními ochranami a zaručenou linearitou. LPCT pracují hluboko pod kolenem magnetické charakteristiky a zvládají tak proudy řádů kiloampér, aniž by došlo k saturaci magnetického jádra. [8]

Výrobce u PTP garantuje třídy přesnosti v rozsahu 25-100 % nebo 50-100 % jmenovité zátěže. Proudové senzory jsou kalibrovány digitálními ochranami na určité břemeno. Výrobce proudové senzory dodává již s kabely, které se přímo

zapojují do digitálních ochran. Není tedy nutné počítat zvlášť odpory vývodních kabelů. U LPCT výrobce udává pouze minimální hodnotu břemene, např. $R_b \geq 20 \text{ k}\Omega$. [8] [10]

3.5 Typická aplikace

LPCT se stejně jako PTP a proudové senzory nejčastěji používají uvnitř rozváděče vysokého napětí. LPCT pracují na stejném principu jako obyčejné přístrojové transformátory proudu, avšak svými výstupními hodnotami a rozměry připomínají spíše proudové senzory. Na Obr. 15 je vlevo LPCT od firmy Busyvee a vpravo proudový senzor KECA 250 B1 od firmy ABB. LPCT a proudové senzory bývají nejčastěji toroidního tvaru.

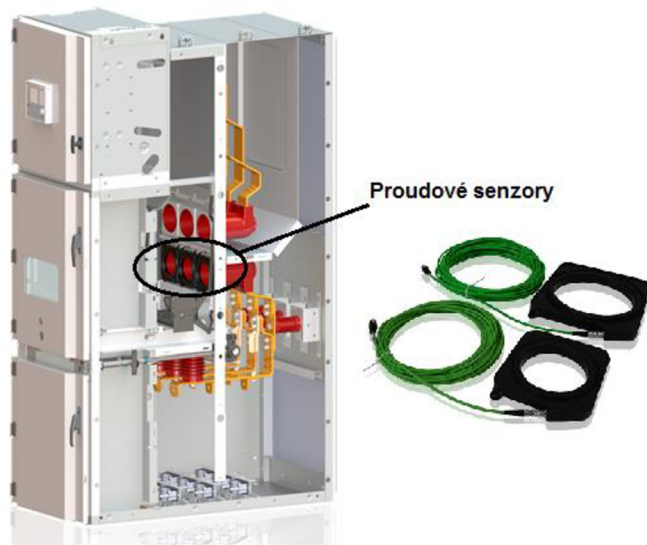


Obr. 15 LPCT (vlevo) a proudový senzor KECA 250 B1. [13] [15]

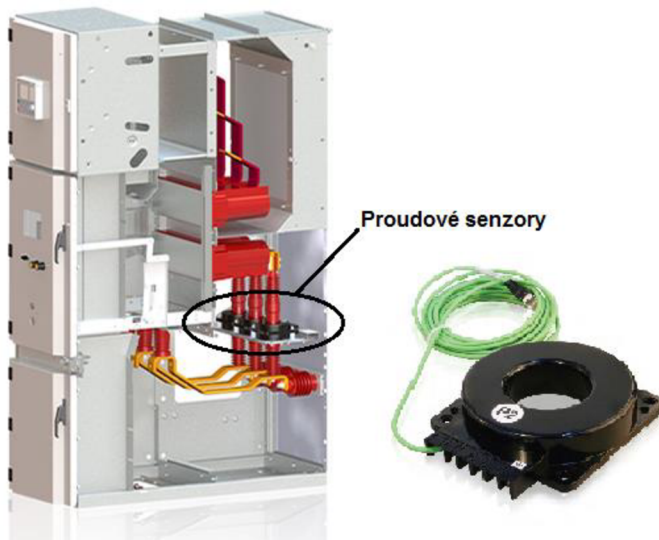
Proudové senzory a LPCT jsou menších rozměrů a lze je použít v místech, kde obyčejné přístrojové transformátory proudu nelze umístit. Příklady umístění proudových senzorů a LPCT lze vidět na Obr. 16 a Obr. 17. Na obrázcích jsou pouze proudové senzory, avšak na stejných místech lze používat i LPCT.

Na Obr. 16 jsou proudové senzory na průchodkách v prostoru vypínače rozváděče UniGear Digital ZS1. Běžný přístrojový transformátor proudu popsany v kapitole 2.6 by do tohoto prostoru nebylo možné umístit kvůli jeho rozměrům.

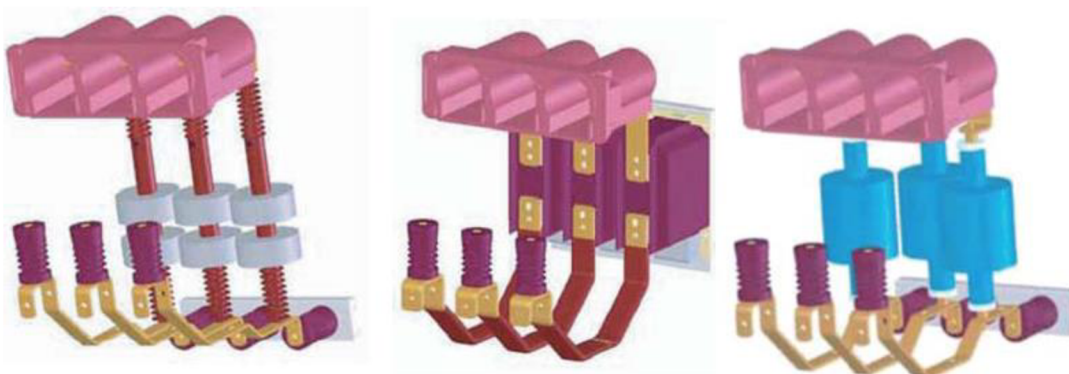
Na Obr. 17 je rozváděč UniGear Digital 550. Proudové senzory jsou zde umístěny v přípojnicovém prostoru. Na Obr. 18 je pak přípojnicový prostor rozváděče UniGear 550 s přístrojovými transformátory proudu (zleva toroidní, podpěrný a průchodový). Použitím proudových senzorů došlo ke zmenšení a zjednodušení přípojnicového prostoru.



Obr. 16 Umístění proudových senzorů KECA 80 C104/C165 v rozváděči UGD ZS1. [11] [14]



Obr. 17 Umístění proudových senzorů KECA 250 B1 v rozváděči UGD 550. [12][13]



Obr. 18 UG 550 s přístrojovými transformátory proudu. [16]

4 NÁVRH NÍZKOVÝKONOVÉHO PŘÍSTOJOVÉHO TRANSFORMÁTORU PROUDU

Před numerickým návrhem transformátoru je potřeba stanovit několik předpokladů, a to jakého má transformátor být typu, v jakém prostředí bude pracovat, jakých hodnot bude dosahovat a jak by měl být řešen z pohledu designu.

Navrhovaný LPCT stejně jako většina přístrojových transformátorů proudů by měl pracovat uvnitř rozváděče, konkrétně vzduchem izolovaného rozváděče vysokého napětí. Umístění přístrojového transformátoru v rozváděči záleží na jeho použití. Přístrojové transformátory se dle použití dělí na podpěrné, průchodkové či přípojnicové, viz. kapitola 2.6. Podpěrné LPCT se nepoužívají a nejsou ani vyráběny (je namysli samostatný LPCT, podpěrné nízkovýkonové přístrojové transformátory se dělají pouze kombinované, kde je zároveň proudový a napěťový transformátor). Jednou z výhod LPCT jsou malé celkové rozměry. Při podpěrném LPCT by muselo být pouzdro transformátoru velké a z pevného materiálu, aby mohlo snést váhu přípojnice a odolat silovému namáhání při zkratech. U takového řešení by byla velká spotřeba materiálu, což by bylo neekonomické. Průchodkový LPCT by byl technologicky náročný a rovněž by byla velká spotřeba materiálu na pouzdro transformátoru.

U LPCT se tedy nevyplatí, aby měl druhou pomocnou funkci. Navrhovaný LPCT bude průvlekový. Oknem LPCT povede měděná přípojnice rozváděče.

Navrhovaný LPCT by měl být schopen pracovat v přípojnicovém prostoru a v prostoru vypínače rozváděče, konkrétní umístění je popsáno v kapitole 0.

Navrhovat se budou celkem dva LPCT, každý s jiným materiálem jádra, ale stejnými základními parametry. Tyto dva LPCT se pak porovnají a vyhodnotí se, jaký materiál je lepší pro použití.

4.1 Vstupní veličiny

Jak již bylo popsáno předchozí kapitole, LPCT bude umístěn v rozváděči vysokého napětí a oknem LPCT povede měděná přípojnice. Proud tekoucí přípojnicí se liší dle typu rozváděče. Hodnoty bývají v rozsahu stovek až tisíců ampér. Jmenovitý primární proud navrhovaného LPCT byl zvolen $I_{1n} = 100 \text{ A}$.

Měděná přípojnice v rozváděči prochází oknem transformátoru pouze jednou. Z toho vyplývá, že počet závitů primárního vinutí LPCT je $N_1 = 1$. Větší počet primárních závitů se vyskytuje pouze u podpěrných PTP. U těchto PTP je měděná přípojnice přivedena na primární svorky, ze kterých je vyveden primární vodič, který může být vícekrát provlečen přes jádro transformátoru.

LPCT nepracuje pouze při jmenovitém primárním proudu, ale v určitém rozsahu primárního proudu. Tento rozsah je dán zkratovými proudy, na které je LPCT navržen. LPCT musí zachovat linearitu v celém rozsahu. Při návrhu jsou uvažovány dvě hodnoty zkratového proudu, a to jmenovitý nepřetržitý tepelný proud I_{cth} a jmenovitý krátkodobý tepelný proud I_{th} .

Proud I_{cth} musí LPCT snést po celou dobu namáhání [2]. Sekundární vinutí je navrhováno na sekundární proud, který po převodu odpovídá proudu I_{cth} . Během působení tohoto proudu nesmí být překročena dovolená teplota vodiče sekundárního vinutí. Jmenovitý nepřetržitý tepelný proud tedy souvisí hlavně s tepelným namáháním LPCT.

Proud I_{th} musí LPCT snést po dobu 1 s [2]. Jedná se o maximální hodnotu proudu, do které je LPCT schopno měřit. Vodič sekundárního vinutí není na tento proud dimenzován, protože za 1 s se nestihne zahřát na takovou teplotu, aby vinutí poškodilo. Při působení I_{th} nesmí být překročeno koleno magnetizační charakteristiky jádra LPCT, jelikož LPCT v celém rozsahu primárního proudu musí zachovat linearitu výstupních hodnot. Jmenovitý krátkodobý tepelný proud tedy souvisí hlavně s magnetizací jádra LPCT.

Jmenovitý nepřetržitý tepelný proud byl zvolen $I_{cth} = 1600 \text{ A}$. Jmenovitý krátkodobý tepelný proud byl zvolen $I_{th} = 16 \text{ kA}$.

LPCT by měl měřit i hodnoty pod jmenovitým primárním proudem. Měřicí rozsah LPCT je tedy od 0 A až 16 kA.

4.2 Výstupní veličiny

Nejhlavnější výstupní veličinou LPCT je jmenovité sekundární napětí U_{sn} , které vzniká průchodem jmenovitého sekundárního proudu I_{2n} odporovým bočником R_{sh} . Odpor R_{sh} je pevně daný a s hodnotou primárního proudu se nemění. Výstupní veličiny musejí být navrženy tak, aby LPCT dodávalo nízký výkon.

Jmenovitý sekundární proud I_{2n} je dán počtem závitů sekundárního vinutí N_2 . Proud I_{2n} se musí volit tak, aby byl počet závitů N_2 ekonomický a proveditelný. S větším počtem závitů roste technologická náročnost navíjení, spotřeba materiálu a celková velikost LPCT. Sekundární proud má taky vliv na ztráty odporového bočníku. Ztrátový výkon na odporovém bočníku roste s druhou mocninou sekundárního proudu.

Hodnota odporu R_{sh} se v praxi pohybuje v rozmezí 1 Ω až 50 Ω [8]. Při volbě velikosti R_{sh} se musí dbát na ztrátový výkon, který se na odporu objeví průchodem sekundárního proudu, obzvláště při zkratových proudech na primární straně. Ztrátový výkon na R_{sh} by měl být v řádech jednotek wattů.

U veličin U_{sn} , I_{2n} a R_{sh} se tedy musí najít kompromis, aby LPCT dodávalo nízký výkon, resp. malé sekundární napětí, nemělo příliš velký počet závitů sekundárního vinutí a ztrátový výkon na odporovém bočníku byl pro rezistor snesitelný.

Při zvoleném jmenovitém sekundárním proudu $I_{2n} = 5 \text{ mA}$ je pak počet závitů sekundárního vinutí:

$$N_2 = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \cdot N_1 = \frac{100}{0,005} \cdot 1 = 20000 [-; \text{A}, \text{A}, -] \quad (4.2-1)$$

Hodnota odporového bočníku byla zvolena $R_{sh} = 5 \text{ } \Omega$. Ze znalosti R_{sh} a

$$U_{sn} = R_{sh} \cdot I_{2n} = 5 \cdot 0,005 = 25 \cdot 10^{-3} \text{ V} = 25 \text{ mV} [\text{V}; \text{ } \Omega, \text{A}] \quad (4.2-2)$$

jmenovitého sekundárního proudu I_{2n} lze vypočítat jmenovité sekundární napětí dle Ohmova zákona:

Jmenovitý výkon S_n LPCT:

$$S_n = U_{2n} \cdot I_{2n} = 0,025 \cdot 0,005 = 125 \cdot 10^{-6} \text{ VA} = 125 \text{ } \mu\text{VA} [\text{VA}; \text{V}, \text{A}] \quad (4.2-3)$$

Ztrátový výkon P_{ztr} na odporovém bočníku R_{sh} při průchodu jmenovitého sekundárního proudu:

$$P_{ztr} = R_{sh} \cdot I_{2n}^2 = 5 \cdot 0,005^2 = 125 \cdot 10^{-6} \text{ W} = 125 \text{ } \mu\text{W} [\text{W}; \text{ } \Omega, \text{A}] \quad (4.2-4)$$

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, veškeré parametry se dimenzují na zvolené zkratové proudy. Sekundární proud při proudu I_{cth} na primární straně:

$$I_{2cth} = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_{cth} = \frac{1}{20000} \cdot 1600 = 0,080 \text{ A} [\text{A}; -, -, \text{A}] \quad (4.2-5)$$

Sekundární napětí při proudu I_{cth} na primární straně:

$$U_{2cth} = R_{sh} \cdot I_{2cth} = 5 \cdot 0,080 = 0,400 \text{ V} [\text{V}; \text{ } \Omega, \text{A}] \quad (4.2-6)$$

Ztrátový výkon na odporovém bočníku při proudu I_{cth} na primární straně:

$$P_{ztr} = R_{sh} \cdot I_{2cth}^2 = 5 \cdot 0,080^2 = 32 \cdot 10^{-3} \text{ W} = 32 \text{ mW} [\text{W}; \text{ } \Omega, \text{A}] \quad (4.2-7)$$

Sekundární proud při proudu I_{th} na primární straně:

$$I_{2th} = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_{th} = \frac{1}{20000} \cdot 16000 = 0,800 \text{ A} [\text{A}; -, -, \text{A}] \quad (4.2-8)$$

Sekundární napětí při proudu I_{th} na primární straně:

$$U_{2th} = R_{sh} \cdot I_{2th} = 5 \cdot 0,800 = 4 \text{ V} [\text{V}; \text{ } \Omega, \text{A}] \quad (4.2-9)$$

Ztrátový výkon na odporovém bočníku při proudu I_{th} na primární straně:

$$P_{ztr} = R_{sh} \cdot I_{2th}^2 = 5 \cdot 0,800^2 = 3,200 \text{ W} [\text{W}; \text{ } \Omega, \text{A}] \quad (4.2-10)$$

4.3 Shrnutí základních parametrů

Jmenovité parametry jsou v Tabulka 5. LPCT pracuje na frekvenci $f = 50 \text{ Hz}$. Je uvažována čistě reálná zátěž s účínkem $\cos\varphi = 1$. Hodnotu břemene není nutno specifikovat, jelikož LPCT má na výstupu stálou hodnotu zátěže, a to hodnotu odporového bočníku $R_{sh} = 5 \text{ } \Omega$.

Tabulka 6 obsahuje výstupní veličiny pro jmenovitý primární proud a pro hodnoty zkratových proudů na primární straně LPCT.

V Tabulka 7 jsou pak hodnoty pro celý pracovní rozsah LPCT. Tučně jsou zvýrazněny nejdůležitější parametry.

Tabulka 5 Jmenovité vstupní a výstupní parametry LPCT.

I_{1n}	[A]	100
I_{2n}	[A]	0,005
N_1	[-]	1
N_2	[-]	20000
R_{sh}	[Ω]	5
P_{ztr}	[W]	$125 \cdot 10^{-6}$
U_{sn}	[V]	0,025
S_n	[VA]	$125 \cdot 10^{-6}$
f	[Hz]	50
$\cos\varphi$	[-]	1

Tabulka 6 Výstupní parametry pro zkratové proudy na primární straně.

I_1	I_2	U_s	P_{ztr}
[A]	[A]	[V]	[W]
100	0,005	0,025	$0,125 \cdot 10^{-3}$
1600	0,080	0,400	0,032
16000	0,800	4,000	3,200

Zvolením hodnoty jmenovitého sekundárního proudu 5 mA byl rovnicí (4.2-1) vypočítán počet závitů sekundárního vinutí. Hodnota 20000 závitů je pro běžný PTP nepředstavitelné číslo. Pro LPCT je to běžná hodnota. Sekundárním vinutím protéká velmi malý proud, proto je možné zvolit vodič malého průřezu a průměru. Čím větší je průměr vodiče, tím větší snese proud, ale zároveň roste celková velikost sekundárního vinutí. Vinutí tedy musí mít velký počet závitů, aby byl na výstupu LPCT malý proud, ale zároveň musí být malé velikosti, aby nenarostla celková velikost LPCT.

Ztrátový výkon na zvoleném odporovém bočníku 5 Ω a při jmenovitém sekundárním proudu 5 mA je 125 μ W. Jedná se o velice malou hodnotu, která nezvýší teplotu rezistoru na nebezpečnou hodnotu. Důležitější hodnota ztrátového výkonu na R_{sh} je při prouděch I_{2cth} a I_{2th} .

Při proudu $I_{2cth} = 0,08$ A je ztrátový výkon na odporovém bočníku $P_{ztr} = 32$ mW. Tuto hodnotu musí rezistor snést po celou dobu namáhání, aniž by se zničil. Nejvyšší hodnota ztrátového výkonu je při proudu $I_{th} = 0,8$ A, a to $P_{ztr} = 3,2$ W. Rezistory musí tuto hodnotu teplotně snést a jejich hodnota nesmí vlivem teploty

kolísat.

Dle Tabulka 7 je sekundární napětí v rozsahu od 0,25 mV do 4 V. Při primárním proudu nižším než 10 A nastává problém, kde je obtížné pro připojené měřící přístroje měřit tak malá napětí. LPCT

Tabulka 7 Základní parametry v celém měřícím rozsahu LPCT.

I_1/I_{1N}	I_1	I_2	U_{n2}	P_{ztr}
[-]	[A]	[A]	[V]	[W]
0,01	1	0,00005	0,00025	12,500E-9
0,02	2	0,0001	0,0005	50,00E-9
0,05	5	0,00025	0,00125	312,500E-9
0,1	10	0,0005	0,0025	1,250E-6
0,2	20	0,001	0,005	5,00E-6
0,3	30	0,0015	0,0075	11,250E-6
0,4	40	0,002	0,010	20,00E-6
0,5	50	0,0025	0,0125	31,250E-6
0,6	60	0,003	0,015	45,00E-6
0,7	70	0,0035	0,0175	61,250E-6
0,8	80	0,004	0,020	80,00E-6
0,9	90	0,0045	0,0225	101,250E-6
1	100	0,005	0,025	125,00E-6
1,2	120	0,006	0,030	180,00E-6
2	200	0,010	0,050	500,00E-6
4	400	0,020	0,100	2,00E-3
6	600	0,030	0,150	4,500E-3
8	800	0,040	0,200	8,00E-3
10	1000	0,050	0,250	12,500E-3
12	1200	0,060	0,300	18,00E-3
14	1400	0,070	0,350	24,500E-3
16	1600	0,080	0,400	32,00E-3
18	1800	0,090	0,450	40,500E-3
20	2000	0,100	0,500	50,00E-3
40	4000	0,200	1,000	200,00E-3
60	6000	0,300	1,500	450,00E-3
80	8000	0,400	2,000	800,00E-3
100	10000	0,500	2,500	1,250E+0
120	12000	0,600	3,000	1,800E+0
140	14000	0,700	3,500	2,450E+0
160	16000	0,800	4,000	3,200E+0

4.4 Návrh vodiče sekundárního vinutí

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, vodič sekundárního vinutí se musí dimenzovat na hodnotu jmenovitého nepřetržitého tepelného proudu na sekundární straně. Musí být tedy dimenzován na teploty a proudovou hustotu vyvolané tímto proudem.

Uvažuje se, že LPCT pracuje uvnitř rozváděče se zvolenou teplotou okolí $T_{zadane} = 50\text{ °C}$. Teplota okolí daná normou je $T_{norma} = 40\text{ °C}$.

Pro velký počet závitů sekundárního vinutí se používají lakované měděné dráty. Lak slouží jako izolace vodiče a bývá většinou z polyuretanu. Takovéto vodiče jsou dle normy IEC 60085 řazeny do izolační třídy E. Norma [1] udává teplotní nárůst pro třídu E $T_E = 75\text{ °C}$.

Maximální teplota daná izolační třídou T_{max} je pak:

$$T_{max} = T_{norma} + T_E = 40 + 75 = 115\text{ °C} \text{ [°C; °C, °C]} \quad (4.4-1)$$

Nyní lze vypočítat koeficient zohledňující zvýšenou teplotu okolí K_T :

$$K_T = \left(\frac{T_{max} - T_{zadane}}{T_{max} - T_{norma}} \right)^{\frac{1}{1,8}} = \left(\frac{115 - 50}{115 - 40} \right)^{\frac{1}{1,8}} = 0,924 \text{ [-; °C, °C, °C, °C]} \quad (4.4-2)$$

Dle normy je proudová hustota pro měděný vodič při zkratovém proudu $J_{norma} = 180\text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$. Tato hodnota platí při teplotě 40 °C . Proudová hustota přepočítaná na zadanou teplotu je:

$$\begin{aligned} J_{zadane} &= K_T \cdot J_{norma} = 0,924 \cdot 180 \\ &= 166,244\text{ A} \cdot \text{mm}^{-2} \text{ [A} \cdot \text{mm}^{-2}; -, \text{A} \cdot \text{mm}^{-2}] \end{aligned} \quad (4.4-3)$$

Nejmenší možný průřez vodiče S_{Cu} , který lze použít:

$$S_{Cu} = \frac{I_{2cth}}{J_{zadane}} = \frac{0,080}{166,244} = 0,480 \cdot 10^{-3}\text{ mm}^2 \text{ [mm}^2; \text{A, A} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (4.4-4)$$

Průměr vodiče z vypočteného průřezu:

$$d_{Cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{Cu}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,480 \cdot 10^{-3}}{\pi}} = 0,025\text{ mm} \text{ [mm; mm}^2] \quad (4.4-5)$$

Dle výpočtu je minimální potřebný průměr vodiče velice malý. Navíjení takového drátu by bylo technologicky velmi náročné. Z řady jmenovitých průměrů je proto vybrán měděný drát o průměru $d = 0,28\text{ mm}$ a průřezu $S_{Cu} = 0,061\text{ mm}^2$. S izolací má tento drát maximální průměr $d_{Cu_{max}} = 0,310\text{ mm}$.

4.5 Materiál jádra LPCT

Navrhovány budou dva jádra různého materiálu, aby bylo možno porovnat, který materiál má lepší vlastnosti pro použití v LPCT a u kterého LPCT dosáhne nejmenší chyby. Jádra budou mít stejný průřez i rozměry, ale budou mít jiné magnetické vlastnosti.

První volbou je jádro z amorfního kovu neboli z kovového skla. Jedná se o novou technologii, která je stále podrobena intenzivnímu výzkumu. Jsou to velmi prudce ochlazované taveniny, které nestihnou zkrystalizovat [4]. Jejich výhodou je lineární průběh magnetizační charakteristiky při velmi malých hodnotách intenzity magnetického pole, tj. při začátku magnetizace.

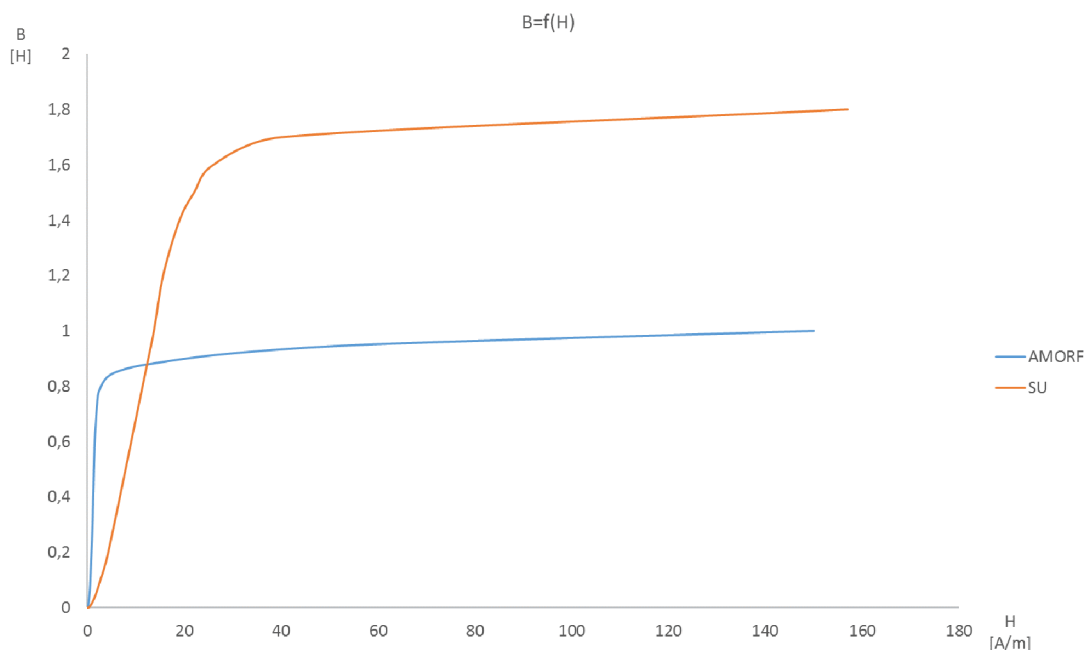
Druhé jádro je ze železa označovaného SU. Jedná se o nejběžnější materiál jader používaných v PTP. Oproti amorfním kovům nemají lineární průběh při malých hodnotách magnetické indukce a intenzity magnetického pole. Mají však vyšší bod nasycení.

Na Obr. 19 je magnetizační charakteristika pro tyto dva materiály. Lze vidět, že materiál SU má větší maximální magnetickou indukci, při níž dojde k nasycení jádra. Železo tedy může pracovat při větším rozsahu primárního proudu.

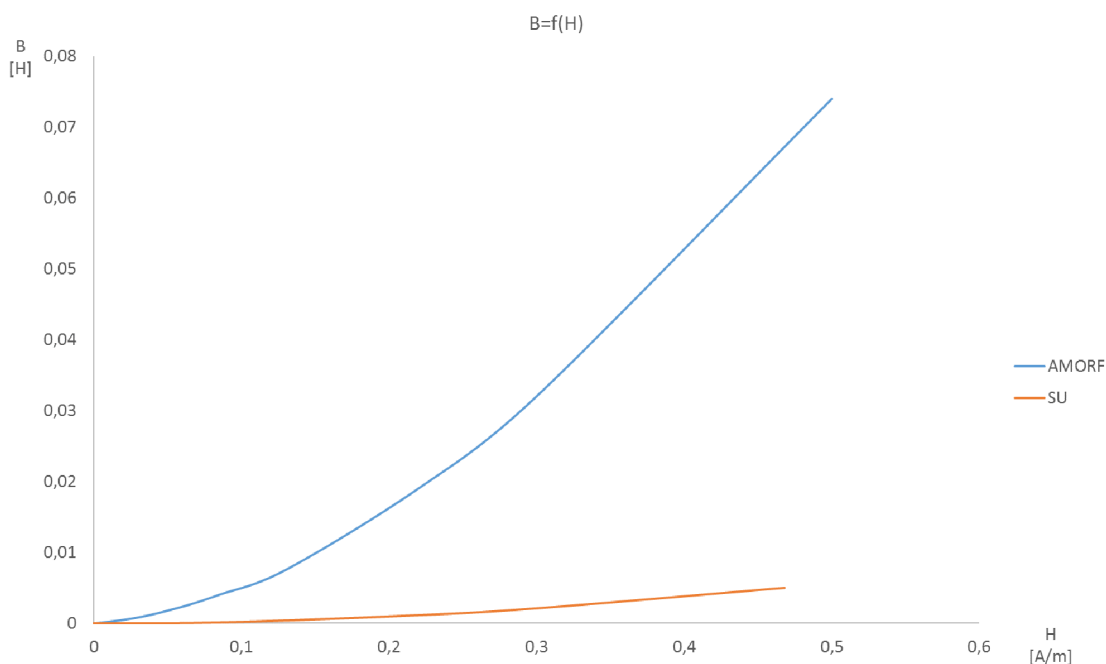
Výrobce udává hodnotu maximální magnetické indukce pro amorfní kov $B_{max}=0,785$ T při maximální intenzitě magnetického pole $H_{max}=2,4$ A/m. Pro materiál SU to jsou hodnoty $B_{max}=1,5$ T při $H_{max}=22$ A/m.

Na Obr. 20 je detail magnetizační charakteristiky v začátku magnetizace. Amorfní kov má lineárnější průběh než SU a magnetická indukce již nabývá nějakých značných hodnot, zatímco SU se ještě nezačíná magnetovat.

Amorfní kovy tedy zaručují linearitu měření i při malých proudech, menších než jmenovitý proud. SU zaručuje vysoký rozsah proudů, které je LPCT schopno měřit, za cenu linearitu při proudech menších než jmenovitý proud.



Obr. 19 Magnetizační charakteristika pro amorfní kov a železo SU.



Obr. 20 Detail magnetizační charakteristiky při nižších hodnot.

4.6 Rozměry

Prvním krokem je volba vnitřního průměru okna, kterým povede primární vodič. Vzhledem k umístění popsaného v kapitole 0, je volený vnitřní průměr LPCT $D_1 = 170$ mm.

Běžné PTP jsou zalévány do epoxidové pryskyřice, která slouží jako ochrana před mechanickým poškozením a jako izolační materiál transformátoru. Navrhovaný LPCT nebude zaléván do epoxidové pryskyřice, jelikož by se musela navrhovat a vyrábět speciální lící forma. Pro potřeby LPCT postačí plastové pouzdro, které lze jednoduše vytisknout na 3D tiskárně. Tloušťka stěny plastového pouzdra je volena $t_p = 3$ mm.

Vnitřní průměr sekundárního vinutí:

$$D_{Cu} = D_1 + 2 \cdot t_p = 160 + 2 \cdot 3 = 176 \text{ mm} \doteq 180 \text{ mm [mm; mm, mm]} \quad (4.6-1)$$

Rovnicí (4.6-1) byl vypočten průměr poslední vrstvy vinutí. Výsledek 176 mm byl zaokrouhlen na 180 mm z důvodu případného bandážování vinutí.

Nyní lze vypočítat počet závitů jedné vrstvy sekundárního vinutí:

$$N_{1vrst} = \frac{\pi \cdot D_{Cu}}{d_{Cu\max}} = \frac{\pi \cdot 180}{0,310} = 1824,150 \doteq 1825 [-; \text{mm, mm}] \quad (4.6-2)$$

Celkový počet vrstev vinutí:

$$n = \frac{N_2}{N_{1vrst}} \cdot k_{scu} = \frac{20000}{1825} \cdot 0,906 = 9,939 \doteq 10 [-; -, -, -] \quad (4.6-3)$$

kde k_{scu} = činitel skládání vinutí. Výsledek byl opět zaokrouhlen na celé číslo. Při výpočtu počtu vrstev vinutí se musí započítávat tolerance 20 % kvůli technologii navíjení:

$$n_c = n \cdot 0,2 + n = 10 \cdot 0,2 + 10 = 12 [-; -, -] \quad (4.6-4)$$

Celková tloušťka sekundárního vinutí:

$$t_{cu} = n_c \cdot d_{cu} = 12 \cdot 0,310 = 3,72 \text{ mm} \doteq 4 \text{ mm [mm; -, mm]} \quad (4.6-5)$$

Jedná se o teoreticky vypočtenou hodnotu a ideální případ. V reálném případě se může hodnota lišit. Tloušťka vinutí závisí na technologii navíjení

Nyní lze vypočítat minimální možný vnitřní průměr jádra LPCT:

$$d_{1min} = d_{cu} + 2 \cdot t_{cu} = 180 + 2 \cdot 4 = 188 \text{ mm [mm; mm, mm]} \quad (4.6-6)$$

Jádra transformátorů jsou chráněna proti vnějším mechanickým vlivům bandážováním nebo se vkládají do pouzder. Sekundární vinutí se tedy nenavíjí přímo na holé jádro. Vnitřní průměr jádra je proto volen až na hodnotu $d_1=200$ mm.

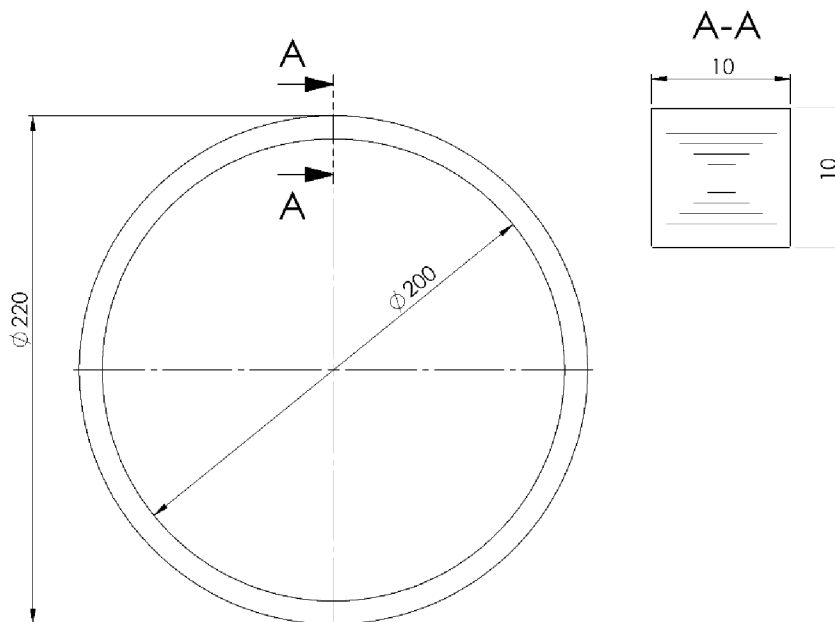
Jelikož LPCT má velmi malý výkon, lze použít jádra s malými průřezy. Je voleno čtvercové jádro o straně $a=10$ mm. Průřez jádra je tedy:

$$S_j = a^2 = 10^2 = 100 \text{ mm}^2 [\text{mm}^2; \text{mm}] \quad (4.6-7)$$

Vnější průměr jádra d_2 je vypočten:

$$d_2 = d_1 + 2 \cdot a = 200 + 2 \cdot 10 = 220 \text{ mm [mm; mm, mm]} \quad (4.6-8)$$

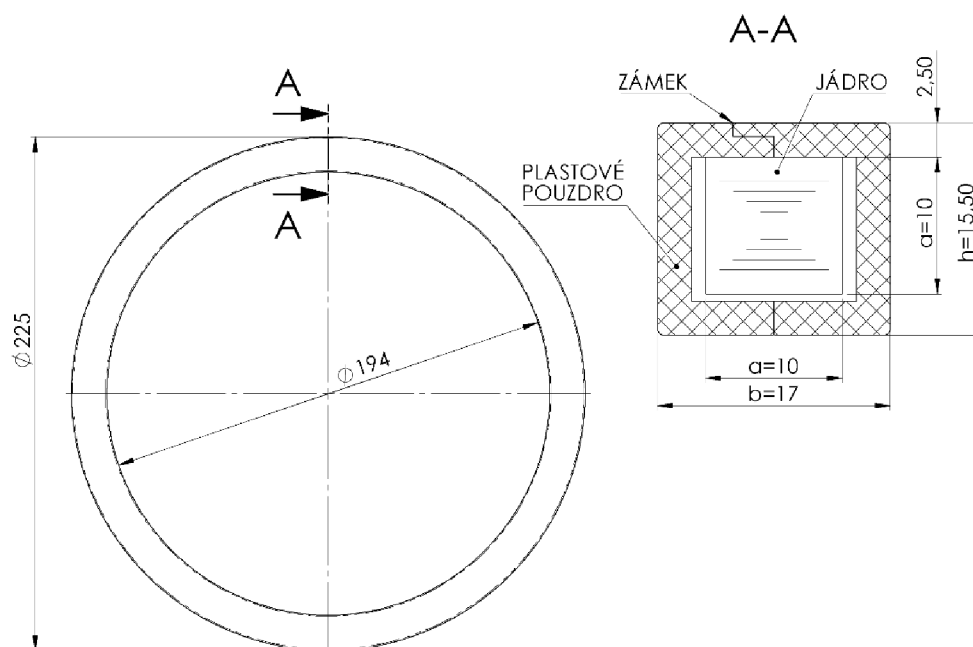
Rozměry jádra jsou na Obr. 21. Rozměry jsou stejné jak pro železné jádro, tak pro jádro z amorfního kovu.



Obr. 21 Rozměry jádra LPCT.

Amorfnní kovy jsou velice křehké materiály a na dotek se rozpadají. Proto jsou od výrobce dodávány v plastových pouzdech. Při rozměrech jádra 200x220x10 výrobce udává rozměr s plastovým boxem 194x225x17. Celkové rozměry jádra s plastovým boxem jsou na Obr. 22. Lze si všimnout zámku, který je tvořen dvěma výstupky v plastovém pouzdře. Tento zámek slouží jako ochrana při případném zalévání transformátoru. Epoxidová pryskyřice se při tuhnutí smršťuje a tlačí na zalévané prvky, které může mechanicky poškodit. Zámek brání proti vniknutí lící hmoty dovnitř plastového pouzdra. Na plastové pouzdro je navinutá textilní páska, která tlačí plastové pouzdro směrem k sobě a zamezuje tak jeho oddělení.

SU jádra se dodávají holé, bez bandáží. Ale před navíjením sekundárního vinutí se jádra musejí bandážovat. Nejčastěji se používá lepenka či transformátorový papír. Tloušťka bandáží pro SU bývá větší než 2 mm.



Obr. 22 Amorfnní jádro s plastovým pouzdem.

4.7 Magnetické parametry

Celková délka vinutí bude vypočtena pro rozměry amorfního jádra s plastovým boxem. Tato celková délka se pak použije i pro výpočty s SU jádrem. Jádro SU je sice menší, ale rozdíl je zanedbatelný.

Délka jednoho závitu sekundárního vinutí:

$$\begin{aligned} l_{1zavit} &= 2 \cdot ((b + 2 \cdot d_{Cu\max}) + (h + 2 \cdot d_{Cu\max})) \\ &= 2 \cdot ((17 + 2 \cdot 0,310) + (15,5 + 2 \cdot 0,310)) \cdot 10^{-3} \quad (4.7-1) \\ &= 0,0675 \text{ m [m; mm, mm, mm]} \end{aligned}$$

K výpočtu délky jedné vrstvy sekundárního vinutí je potřeba vypočítat činitel izolace vinutí:

$$k_{i,Cu} = \frac{d_{Cu}^2}{d_{Cu\max}^2} = \frac{0,28^2}{0,31^2} = 0,8158 \text{ [- , mm, mm]} \quad (4.7-2)$$

Délka jedné vrstvy sekundárního vinutí se:

$$\begin{aligned} l_{1vrst} &= l_{1zavit} \cdot N_{1vrst} \cdot k_{s,Cu} \cdot k_{i,Cu} = 0,0675 \cdot 1825 \cdot 0,9069 \cdot 0,8158 \\ &= 91,1150 \text{ m [m; m, -, -, -]} \quad (4.7-3) \end{aligned}$$

Celková délka sekundárního vinutí:

$$l_{cel} = l_{1vrst} \cdot n_c = 91,1150 \cdot 12 = 1093,38 \text{ m [m; m, -]} \quad (4.7-4)$$

Z celkové délky vinutí lze nyní vypočítat odpor vinutí při 20 °C:

$$\begin{aligned} R_{20} &= \rho_{20} \cdot \frac{l_{cel}}{S_{Cu}} = 1,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1093,38}{0,061 \cdot 10^{-6}} \\ &= 316,071 \Omega \text{ [\Omega; \Omega \cdot m, m, m^2]} \quad (4.7-5) \end{aligned}$$

kde ρ_{20} =měrný elektrický odpor mědi při 20 °C [$\Omega \cdot m$].

Rozdíl teplot:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta &= (273,15 + t_2) - (t_2 + 273,15) = (273,15 + 75) - (20 + 273,15) \\ &= 55 \text{ K [K; °C, °C]} \quad (4.7-6) \end{aligned}$$

kde t_1 = teplota 20 °C a t_2 = teplota 75 °C

Při výpočtech se dle normy musí uvažovat odpor vinutí při 75 °C:

$$\begin{aligned} R_{75} &= R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = 316,071 \cdot (1 + 0,0043 \cdot 55) \\ &= 390,820 \Omega \text{ [\Omega; \Omega, K^{-1}, K]} \quad (4.7-7) \end{aligned}$$

Ze znalosti odporu vinutí lze vypočítat indukované napětí, které je potřebné pro výpočet magnetické indukce. Z Obr. 12 plyne, že celkový odpor LPCT je sériové spojení odporu vinutí a odporového bočníku. Indukované napětí uvnitř LPCT při jmenovitém proudu:

$$U_0 = (R_{75} + R_{sh}) \cdot I_{2n} = (390,82 + 5) \cdot 0,005 = 1,979 \text{ V [V; \Omega, \Omega, A]} \quad (4.7-8)$$

Jmenovitá magnetická indukce:

$$\begin{aligned} B_n &= \frac{\sqrt{2} \cdot U_0}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_2 \cdot S_j} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1,979}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 20000 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} \\ &= 4,45 \cdot 10^{-3} \text{ T [T; V, Hz, -, m^2]} \quad (4.7-9) \end{aligned}$$

Hodnota intenzity magnetického pole odpovídající k vypočtené jmenovité magnetické indukci je odečtena z hodnot poskytnutých výrobcem. Jmenovitá intenzita magnetického pole pro jádro z amorfního kovu je $H_n = 91,4 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$. Pro jádro SU je $H_n = 435,6 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}$.

Je nutné ověřit, zdali je jmenovitá magnetická indukce správně zvolena. Při maximálním proudu, tedy I_{th} , nesmí magnetická indukce dosáhnout své maximální hodnoty, kdy dochází k nasycení materiálu a začíná koleno magnetizační charakteristiky. LPCT musí pracovat celý svůj rozsah pod kolenem magnetizační charakteristiky materiálu, aby zachoval linearitu hodnot.

Indukované napětí při maximální sekundárním proudu:

$$U_0 = (R_{75} + R_{sh}) \cdot I_{2th} = (390,820 + 5) \cdot 0,800 = 316,658 \text{ V [V; } \Omega, \Omega, \text{A]} \quad (4.7-10)$$

Magnetická indukce při maximálním sekundárním proudu:

$$B = \frac{\sqrt{2} \cdot U_0}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_2 \cdot S_j} = \frac{\sqrt{2} \cdot 316,658}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 20000 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 0,713 \text{ T [T; V, Hz, -, m}^2\text{]} \quad (4.7-11)$$

Odpovídající intenzita magnetického pole po amorfni jádro: $H = 1,875 \text{ A/m}$.

Odpovídající intenzita magnetického pole pro SU jádro: $H = 10,462 \text{ A/m}$.

Maximální magnetický indukce, při níž začne docházet k nasycování materiálu je dle výrobce:

- Pro amorfni jádro $B_{max} = 0,785 \text{ T}$
- Pro SU jádro $B_{max} = 1,5 \text{ T}$

Amorfni jádro je těsně pod svou maximální magnetickou indukci. LPCT s takovým jádrem by nemělo přesáhnout maximální hodnotu proudu 16 kA. Při vyšším proudu by došlo k nasycení magnetického obvodu a sekundární proud by zůstával konstantní na své maximální hodnotě, i když by na primární straně pořád stoupala hodnota primárního proudu. Toto je nebezpečný stav. Připojené měřicí přístroje by neměly informaci o stavu primárního proudu.

Jádro SU má svou maximální magnetickou indukci dvakrát větší, než je magnetická indukce při maximálním sekundárním proudu. LPCT s SU jádrem je schopno měřit vyšší proudy, než je zadaný maximální rozsah, tedy nad 16 kA. SU sice může měřit vyšší proudy, ale jak bylo popsáno v kapitole 4.5, je to za cenu linearitu při nižších prouděch než jmenovitý.

Hodnoty indukovaného napětí, magnetické indukce a intenzity magnetického pole jsou v příloze v Tabulka 10 a Tabulka 11. V tabulkách je také parametr φ_0 . Jedná se o fázový posun vypočtený z komplexní magnetizační charakteristiky. Tento úhel zavádí fázovou chybu transformátoru a je dodáván výrobcem společně s B-H parametry.

4.8 Výpočet chyby LPCT

Výpočet chyby se bude počítat pomocí sekundárního proudu. Pro jednoduchost nebude ve vzorcích použito převáděné napětí.

Střední délka siločáry magnetického obvodu:

$$l_{fe} = (d_1 + a) \cdot \pi = (200 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-3}) \cdot \pi = 0,6597 \text{ m [m; m, m]} \quad (4.8-1)$$

Magnetizační („tokotvorný“) proud pro amorfní jádro při jmenovitém sekundárním proudu:

$$\begin{aligned} I_{\mu} &= \frac{H \cdot l_{fe}}{N_2} = \frac{0,09141 \cdot 0,6597}{20000} = 3,015 \cdot 10^{-6} \text{ A} \\ &= 3,015 \text{ } \mu\text{A [A; A} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m, -]} \end{aligned} \quad (4.8-2)$$

Magnetizační proud pro SU jádro při jmenovitém sekundárním proudu:

$$\begin{aligned} I_{\mu} &= \frac{H \cdot l_{fe}}{N_2} = \frac{0,44098 \cdot 0,6597}{20000} = 14,5 \cdot 10^{-6} \text{ A} \\ &= 14,5 \text{ } \mu\text{A [A; A} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m, -]} \end{aligned} \quad (4.8-3)$$

Magnetizační proudy se pohybují v řádech μA . Je to proud, který způsobuje chybu všech PTP.

Skutečný primární jmenovitý proud pro amorfní jádro:

$$\begin{aligned} I_{prim} &= \sqrt{(I_2 + I_{\mu} \cdot \cos \varphi_0)^2 + (I_{\mu} \cdot \sin(\varphi_0))^2} \cdot \frac{N_2}{N_1} \\ &= \sqrt{\left(0,005 + 3,015 \cdot 10^{-6} \cdot \cos\left(71,68 \cdot \frac{\pi}{180}\right)\right)^2 + \left(3,015 \cdot 10^{-6} \cdot \sin\left(71,68 \cdot \frac{\pi}{180}\right)\right)^2} \cdot \frac{20000}{1} \\ &= 100,01898 \text{ A [A; A, A, } ^{\circ}, -, -] \end{aligned} \quad (4.8-4)$$

Skutečný primární proud pro SU jádro:

$$\begin{aligned} I_{prim} &= \sqrt{(I_2 + I_{\mu} \cdot \cos \varphi_0)^2 + (I_{\mu} \cdot \sin(\varphi_0))^2} \cdot \frac{N_2}{N_1} \\ &= \sqrt{\left(0,005 + 14,5 \cdot 10^{-6} \cdot \cos\left(72,28 \cdot \frac{\pi}{180}\right)\right)^2 + \left(14,5 \cdot 10^{-6} \cdot \sin\left(72,28 \cdot \frac{\pi}{180}\right)\right)^2} \cdot \frac{20000}{1} \\ &= 100,08892 \text{ A [A; A, A, } ^{\circ}, -, -] \end{aligned} \quad (4.8-5)$$

Hodnoty φ_0 byly odečteny z Tabulka 10 a Tabulka 11 pro příslušný primární proud a materiál.

Nyní lze vypočítat celkovou chybu LPCT vyjádřenou v procentech. Pro LPCT s amorfním jádrem je celková chyba při jmenovitém proudu:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \frac{I_1 - I_{prim}}{I_{prim}} \cdot 100 = \varepsilon_i = \frac{100 - 100,01898}{100,01898} \cdot 100 \\ &= -0,01897 \text{ } \% [\%; A, A] \end{aligned} \quad (4.8-6)$$

Pro LPCT s SU jádrem je celková chyba při jmenovitém proudu:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \frac{I_1 - I_{prim}}{I_{prim}} \cdot 100 = \varepsilon_i = \frac{100 - 100,08892}{100,08892} \cdot 100 \\ &= -0,08884 \text{ } \% [\%; A, A] \end{aligned} \quad (4.8-7)$$

Fázová chyba proudu LPCT s amorfním jádrem při jmenovitém proudu:

$$\begin{aligned}\delta_i &= \sin^{-1} \left[\frac{I_\mu \cdot \sin \left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \frac{N_2}{N_1}}{I_{prim}} \right] \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 60 = \delta_i \\ &= \sin^{-1} \left[\frac{3,015 \cdot 10^{-6} \cdot \sin \left(71,68 \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \frac{20000}{1}}{100,01898} \right] \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4.8-8) \\ &\cdot 60 = 1,96778' [; A, ^\circ, -, -, A]\end{aligned}$$

Fázová chyba proudu LPCT s SU jádrem při jmenovitém proudu:

$$\begin{aligned}\delta_i &= \sin^{-1} \left[\frac{I_\mu \cdot \sin \left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \frac{N_2}{N_1}}{I_{prim}} \right] \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 60 = \delta_i \\ &= \sin^{-1} \left[\frac{14,5 \cdot 10^{-6} \cdot \sin \left(71,68 \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \frac{20000}{1}}{100,08892} \right] \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 60 \quad (4.8-9) \\ &= 9,51864' [; A, ^\circ, -, -, A]\end{aligned}$$

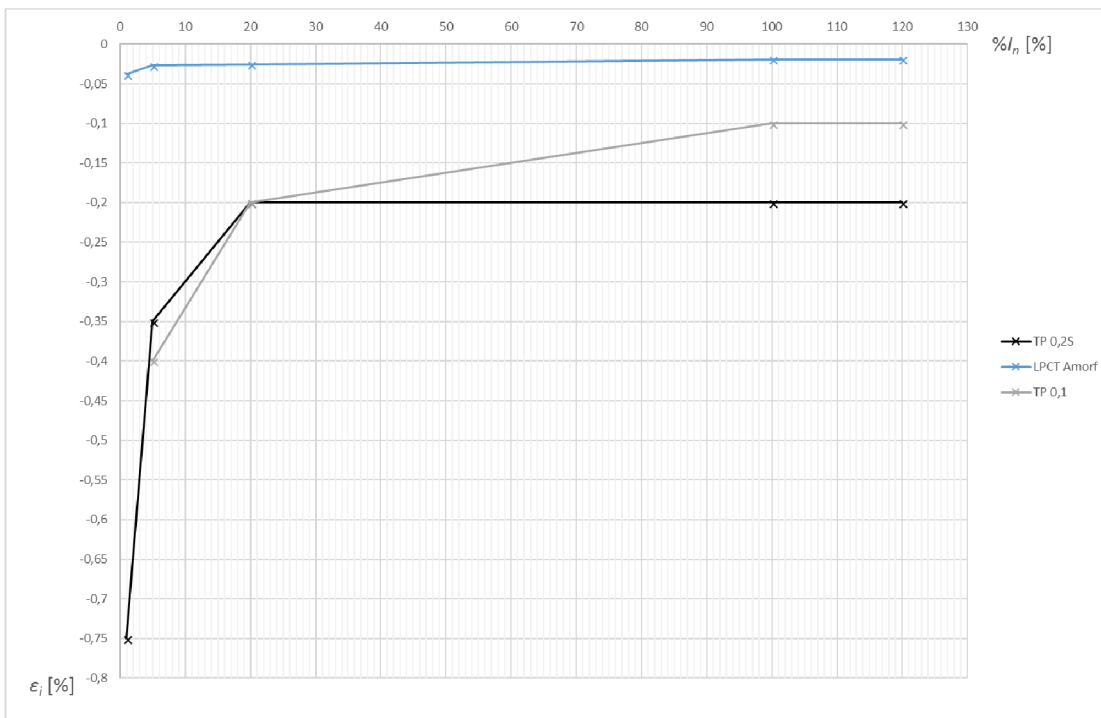
LPCT s amorfním jádrem má skoro o řád menší celkovou chybu proudu než LPCT s SU jádrem. SU totiž potřebuje větší proud k magnetizaci.

V Tabulka 12 v Příloha 3 jsou celkové chyby proudu a fázové chyby v závislosti na primárním proudu pro oba použité materiály. LPCT s amorfním jádrem dosahuje v celém rozsahu lepších výsledků. V rozsahu od 1 A do jmenovitého proudu je velikost celkové chyby proudu pro amorfní jádro drasticky menší než pro SU jádro. Je to kvůli kvalitnější magnetizační charakteristice při nižších proudech. Fáze je rovněž drasticky menší. Zatímco při 1 A má amorfní jádro fázovou chybu 8,88 minut, tak SU jádro má 135,65 minut, tedy až o dva řády více. LPCT s SU jádrem dosahuje příznivých výsledků až nad jmenovitým proudem.

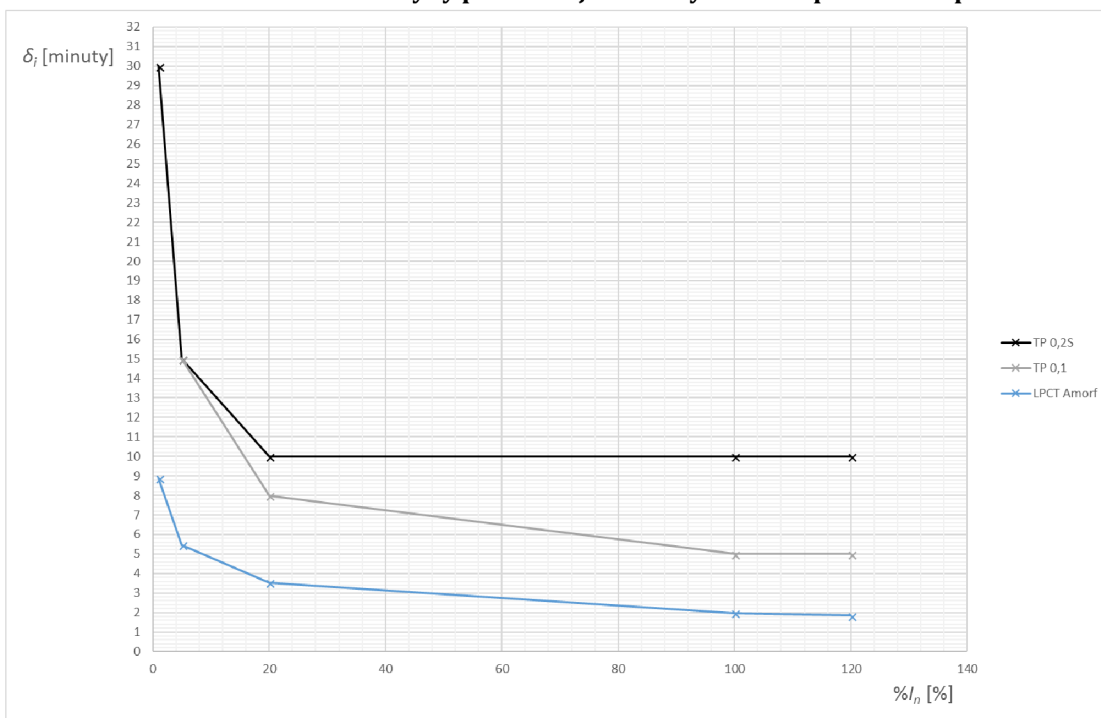
Na Obr. 23 je celková chybu proudu v závislosti na násobcích primárního proudu pro LPCT s amorfním jádrem. Na Obr. 24 je závislost fázové chyby proudu na násobcích primárního proudu. Na obou grafech jsou vyneseny hodnoty pro třídy přesností 0,2S a 0,1. V obou případech leží charakteristika pro LPCT s amorfním jádrem pod charakteristikami pro třídu přesností 0,2S a 0,1. LPCT tedy vyhovuje těmto třídám.

Na Obr. 25 a Obr. 26 jsou závislosti chyb pro LPCT s SU jádrem. V grafech jsou vyneseny hodnoty pro třídy přesností 0,2 a 0,5. Pro třídu přesnosti 0,2 LPCT s SU jádrem vyhovuje pouze v celkové chybě proudu. Charakteristika pro fázovou chybu leží nad křivkou pro třídu přesnosti 0,2. LPCT s SU jádrem vyhovuje třídě přesnosti 0,5.

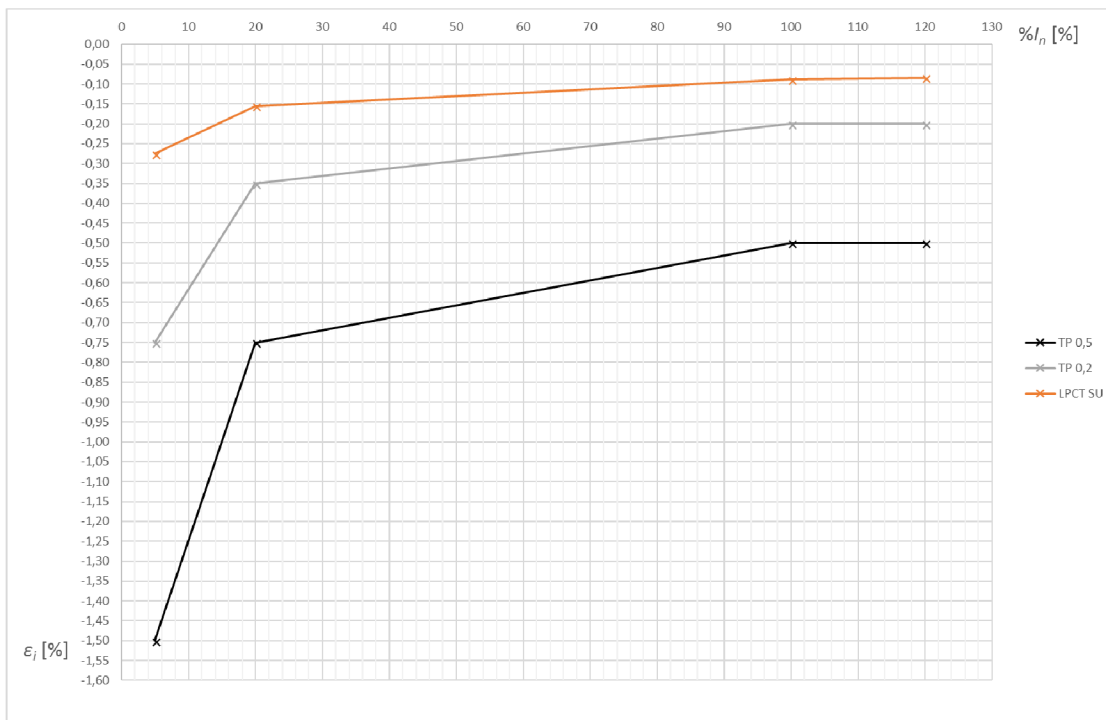
Závislosti celkové chyby proudu na primárním proudu v celém rozsahu jsou v Příloha 6 na Obr. 53a Obr. 54



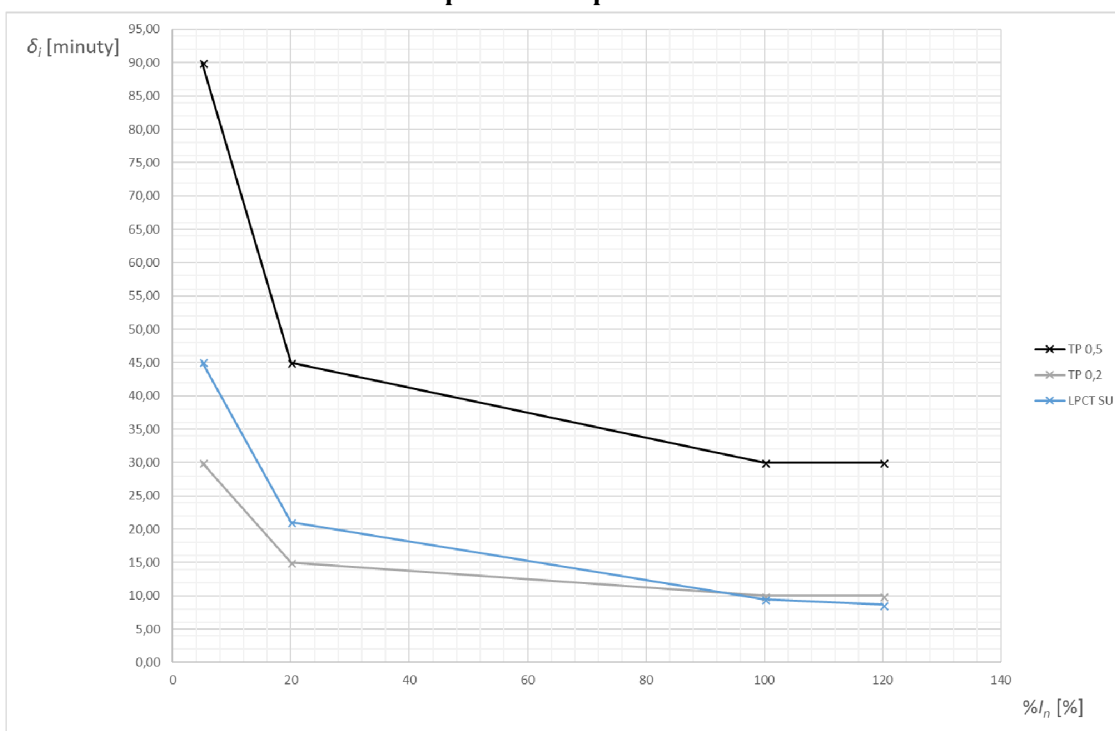
Obr. 23 Závislost celkové chyby proudu a jednotlivých TP na primárním proudu



Obr. 24 Závislost fázové chyby a jednotlivých TP na primárním proudu.



Obr. 25 Závislost celkové chyby proudu pro LPCT s SU jádrem a jednotlivých TP na násobku primárního proudu.

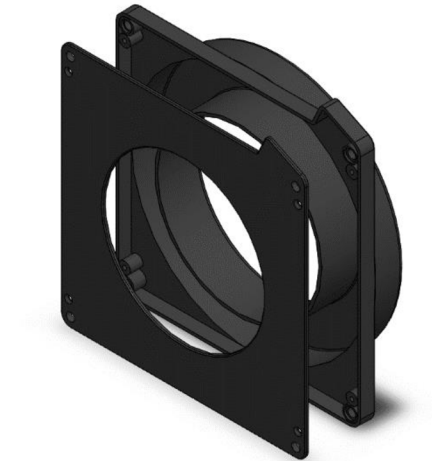


Obr. 26 Závislost fázové chyby pro LPCT s SU jádrem a jednotlivých TP na násobku primárního proudu.

4.9 Návrh krytu LPCT

Navrhovaný LPCT by měl mít kryt z plastového pouzdra, které je schopné vytisknout na 3D tiskárně. Jedná se o ekonomičtější variantu, jelikož pro zalévání do epoxidové pryskyřice by bylo potřeba navrhnout a vyrobit lící formu. Technologie lití je náročnější než 3D tisk.

Plastové pouzdro by mělo být rozebíratelné, aby se mohlo LPCT vyndat. Navržené pouzdro je na Obr. 27.



Obr. 27 Plastové pouzdro pro LPCT.

Kryt LPCT bude tedy ze dvou kusů. Tloušťka stěn plastového pouzdra je volena 3 mm. Na Obr. 28 je detail výstupku. Tento výstupek slouží pro vývod LPCT. Montážní díry jsou dělané tak, aby šrouby byly zapuštěny v krytu a nevystupovala hlavička šroubu z krytu. Kryt je k sobě připevněn šrouby FASTPLAST.



Obr. 28 Detail výstupku krytu LPCT.

Celkové rozměry LCPCT s krytem jsou v Příloha 8 na Obr. 57.

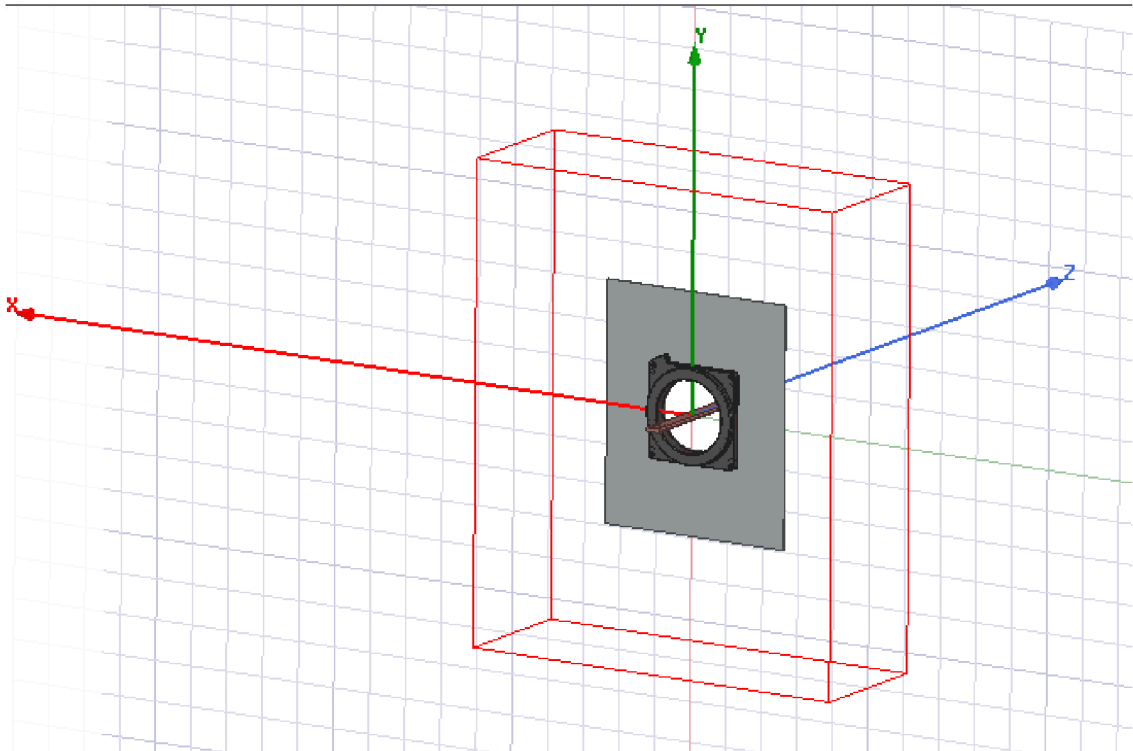
4.10 Simulace v typické aplikaci LPCT

Po návrhu LPCT byly provedeny simulace LPCT v typické aplikaci. Typickou aplikací LPCT je rozváděč. LPCT je namontováno AlZn plech. Jedná se pouze o orientační simulace, jelikož parametry a tvar LPCT nemají razantní vliv na jednotlivá pole

v rozváděči. Rozváděče jsou již navrhovány s uvažováním externích dielektrických či magnetických polí a jsou proti takovým vlivům chráněna.

Simulováno bylo LPCT s amorfním jádrem. Dle předchozích výpočtů dosáhl lepších výsledků než LPCT s SU jádrem. Proto se bere jako primární LPCT.

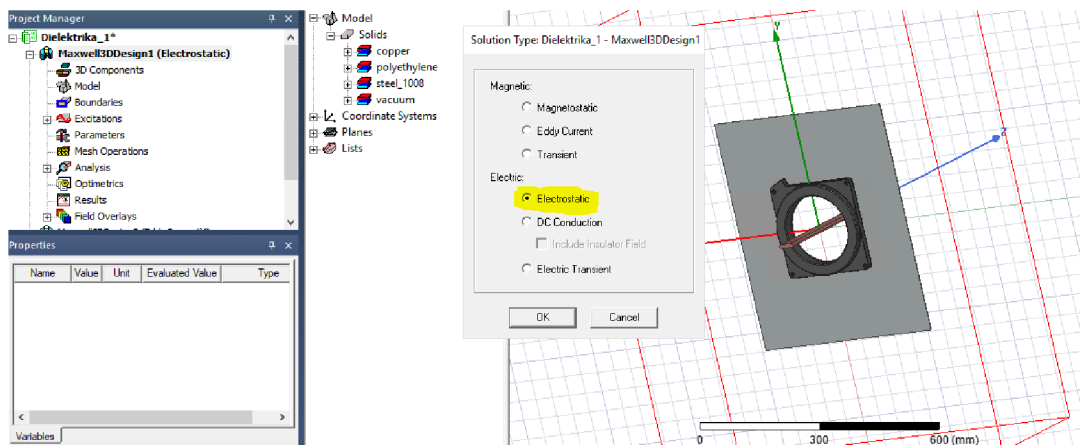
Simulace byly prováděny v prostředí softwaru Ansys Maxwell. Musel být vytvořen 3D model, který je vidět na Obr. 29. Model je velice zjednodušený. LPCT je v plastovém pouzdře a namontovaný ve svislé poloze na stěně rozváděče. Oknem LPCT prochází měděná přípojnice.



Obr. 29 Model LPCT v Ansys Maxwell.

4.10.1 Výpočet dielektrického pole

Pro výpočet dielektrického pole se musí nastavit Solution type na Electrostatic. Dalším krokem je přiřazení materiálů. Pro přípojnicí a sekundární vinutí byl nastaven materiál copper (měď). Pro plastové komponenty, jakož to pouzdro jádra, páska na vinutí a pouzdro LPCT byl nastaven materiál polyethylene. Pro stěnu rozváděče byl nastaven materiál steel_1008, což je obyčejná ocel.

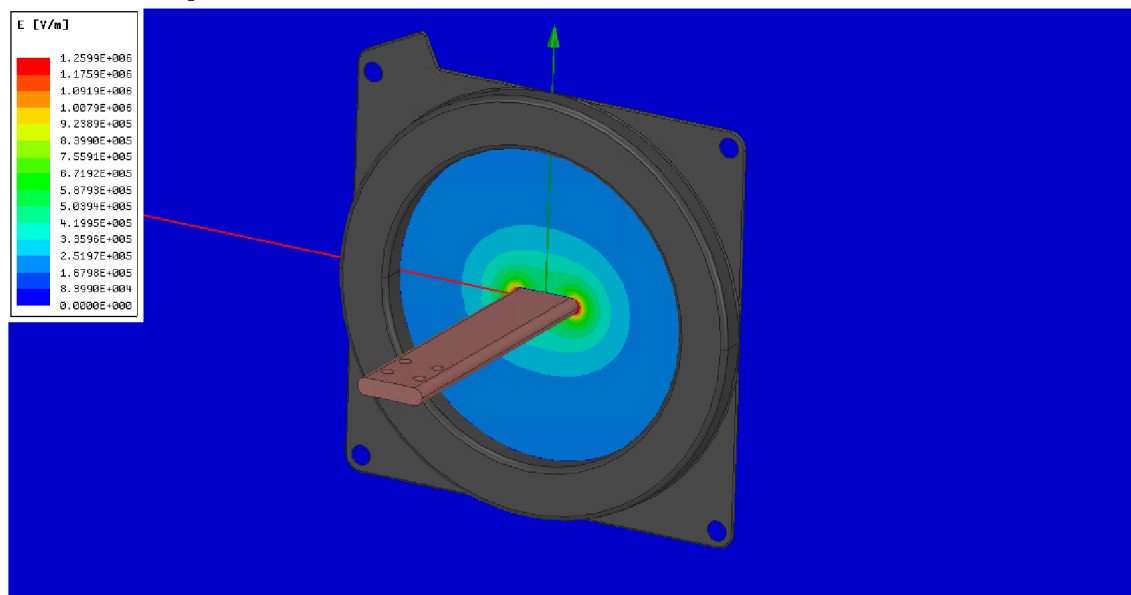


Obr. 30 Nastavení elektrostatické simulace.

Dále byl nastaven region. Region ve směru osy „z“ musí být na krajích měděné přípojnice. Ve směru osy „x“ a „y“ byl nastavený 150 % offset. Materiál regionu bylo zvoleno vakuum.

Nyní se musí nastavit elektrické parametry. Na přípojnici se musí nastavit maximální napětí rozváděče. Uvažuje se rozváděče s jmenovitou hodnotou napětí 17 kV a maximální hodnotou 24 kV. Region a montážní plech jsou nastaveny na nulové napětí. Vinutí je nastaveno na Floating Voltage. To znamená, že se nezná přesná hodnota napětí a napětí není konstantní.

Po nastavení všech parametrů se může spustit elektrostatická simulace. Výsledek elektrostatické simulace na je Obr. 31, kde je zobrazena intenzita elektrického pole



Obr. 31 Intenzita elektrického pole.

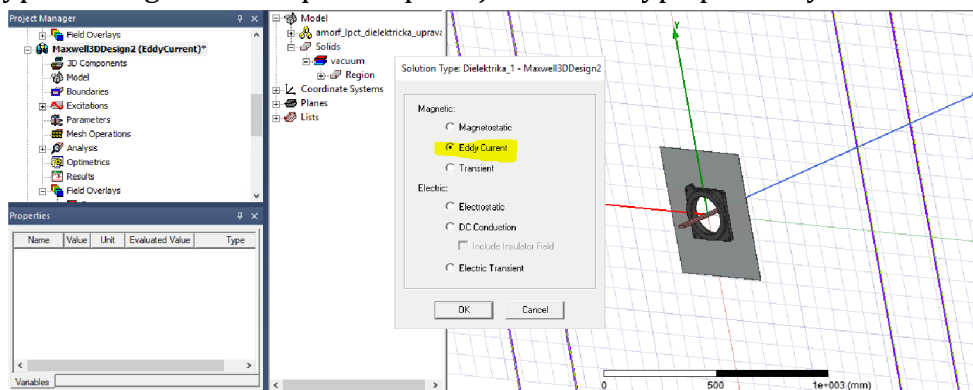
Na okrajích přípojnice dosahuje intenzita elektrického pole až 1,6 MV/m. V blízkosti LPCT je hodnota intenzity elektrického pole až 84 kV/m. V rozváděči pracují vždy minimálně tři LPCT, každý měří jednu fázi a přípojnici. Dielektrické vzdálenosti v rozváděči jsou navrhovány tak, aby při tak velkých intenzit

elektrického pole nedošlo k přeskočení mezi fázemi či na jiné části rozváděče. Dielektrická vzdálenost mezi fázemi se pohybuje od 100–300 mm. LPCT musí být symetricky kolem měřené přípojnice a musí být dostatečně vzdálen od ostatních LPCT.

LPCT jsou v plastovém pouzdře, proto nehrozí, aby došlo k přeskočení na LPCT. Sekundární vinutí musí být náležitě izolováno nevodivými materiály, konkrétně polyesterovou páskou mezi každou vrstvou vinutí. Veškeré ostré hrany musejí být zaobleny.

4.10.2 Výpočet magnetického pole

Pro výpočet magnetického pole je použit stejný model. Můžou se zanedbat veškeré nevodivé materiály, jelikož na simulaci magnetických parametrů nemají žádný vliv. Pro výpočet magnetického pole se použije Solution type pro Eddy currents.



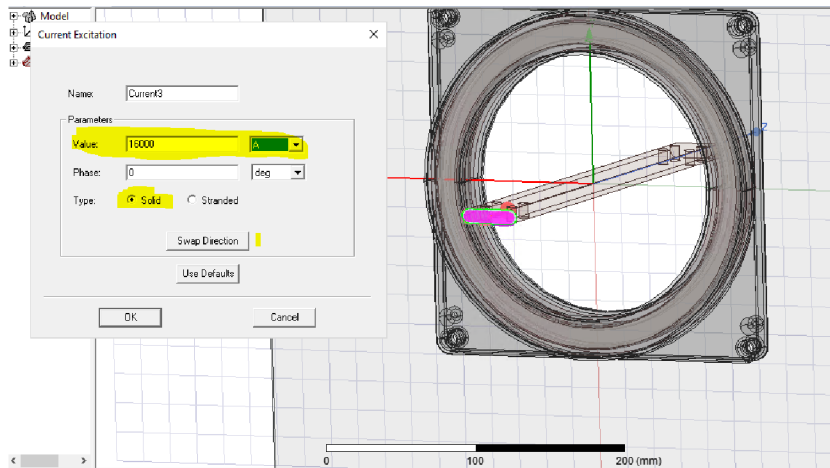
Obr. 32 Solution type pro magnetickou simulaci.

Pro amorfní jádro se zvolí nový materiál, kde se zadá magnetizační charakteristika. Přípojnice a vinutí bude opět měděné. Stěna rozváděče opět steel_1008 jako obyčejná ocel.

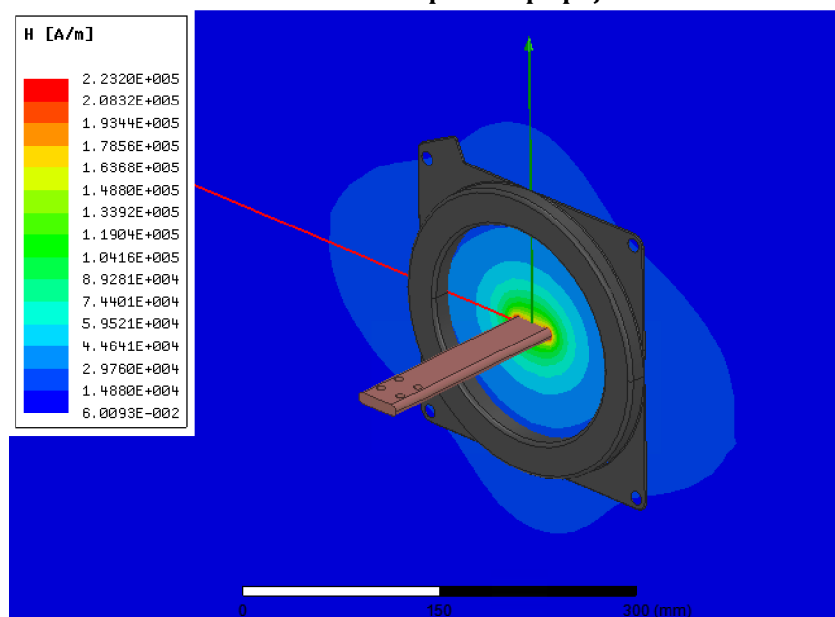
Následně se nastaví procházející proud přípojnicí. Při uvažování nejhoršího případu se nastaví proud přípojnicí 16 kA. Na krajní plochu přípojnice, která je rovnoběžná s rovině „z“ se zvolí Assign Excitation→Current. Nastaví se 16 kA a typ vodiče se zvolí Solid pro masivní vodič. Na druhý konec přípojnice se nastaví stejným způsobem proud 16 kA, avšak zvolí se Swap directions. Nastavení proudu je na Obr. 33.

Na Obr. 34 je intenzita magnetického pole. Lze vidět, že intenzita dosahuje největších hodnot na krajích přípojnice. Se vzdáleností od přípojnice hodnota intenzity magnetického pole klesá. V okolí LPCT je hodnota intenzity elektrického pole až 10 000 A/m. Ochranné prvky při takovém proudu musí okamžitě vybit, jinak hrozí přesycení LPCT a tím pádem nesprávnosti výstupních hodnot LPCT.

Veškeré vodivé prvky v magnetickém poli musejí být chráněny proti vířivým proudům. Jádra LPCT nejsou z jednoho kusu, ale jsou složena z jednotlivých plechů. Tím se omezí vířivé proudy uvnitř jádra LPCT.



Obr. 33 Nastavení proudu přípojnicí.



Obr. 34 Intenzita magnetického pole.

5 VÝROBA LPCT

Ve výsledku by měly být celkem čtyři LPCT. Dva s amorfním jádrem a dva s SU jádrem. Výrobní postup je stejný pro oba dva použité materiály.

5.1 Jádro LPCT

Na Obr. 35 je jádro z amorfního materiálu. Jádro má rozměry dle Obr. 22. Amorfní jádro bylo dodáno již s jeho plastovým pouzdem a bandážováním. Tato bandáž postačí pro budoucí navíjení sekundárního vinutí.

Na Obr. 36 je SU jádro. Tyto jádra byly dodány bez jakýkoliv bandáží. Před navíjením sekundárního vinutí je potřeba tyto SU jádra ochránit před mechanickým poškozením při manipulaci. Bandážování bude provedeno externí firmou, která bude navíjet sekundární vinutí. Na jádro bude připevněna vlnitá lepenka (prešpán) o tloušťce, kterou si určí externí firma dle vlastních potřeb.



Obr. 35 Amorfní jádro s plastovým pouzdem a namotanou textilní páskou.



Obr. 36 SU jádro.

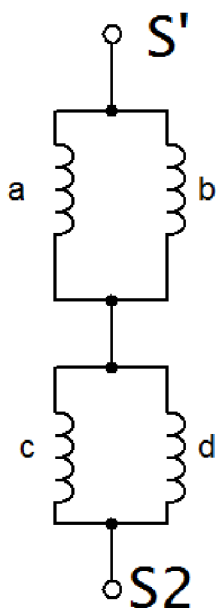
5.2 Sekundární vinutí

Dle výpočtů v kapitole 4.2 a 4.4 má sekundární vinutí 20000 závitů a je tvořeno vodičem celkového průměru $d_{cumax} = 0,310$ mm. Jsou to netradiční hodnoty pro navíječky, které jsou dělané na navíjení pásově vyráběných běžných PTP. Při navíjení mohou nastat jisté komplikace. Může dojít k nerovnoměrnému rozložení sekundárního vinutí a tím vzniknou tzv. „lokální přesycení“.

Ideální případ je, když je sekundární vinutí ve všech vrstvách rovnoměrně navinuto po celém obvodu jádra a celé ho tak pokryje. Tento případ při tak velké hodnotě počtu závitů a při tak malé hodnotě průměru drátu nemůže nastat. Při špatné technologii navíjení je v různých místech na jádře větší počet vinutí než kdekoliv jinde na jádře. Tyto místa se nazývají „lokální přesycení“. Při průchodu proudu sekundárním vinutím se zde bude indukovat větší energie než ve zbytku vinutí a může tak dojít k přesycení jádra, aniž by byla maximální hodnota proudu na primární straně.

Řešením tohoto problému je kompenzační vinutí dle patentu [17]. Princip je na Obr. 37. Jedná se o celkem o čtyři cívky. Dvě cívky jsou spojeny paralelně a tvoří tak jeden pár. Tyto paralelně spojené cívky jsou navinuty každá na opačnou stranu toroidního jádra. Vývod těchto cívek je pak připojen na paralelní spojení dalších dvou cívek, které tvoří druhý pár. Cívky v druhém páru jsou rovněž vinuty každá na

opačnou stranu toroidního jádra, ale jsou pootočena vůči prvnímu páru o 90 stupňů.
[8]



Obr. 37 Princip kompenzačního vinutí. [8]

Pro výpočet kompenzačního vinutí vyráběného LPCT byl použit výpočtový program poskytnutý firmou ABB s.ro. Schéma zapojení cívek je na OBR. Smysl navíjení je na OBR. Sekundární vinutí bude mít celkem 14 vrstev.

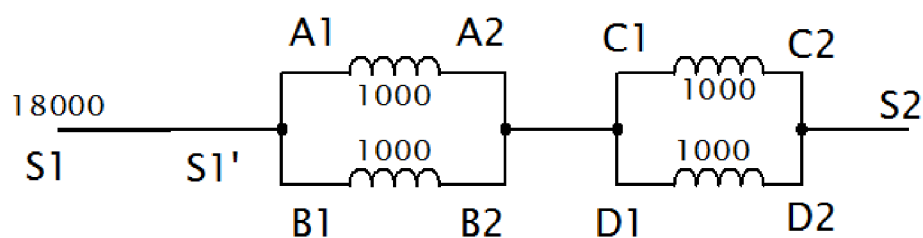
1.-12. vrstva má celkem 18000 závitů, kde každá vrstva má 1500 závitů. Začátek vinutí je značen S1 a konec vinutí S1'.

13. vrstva je první cívka kompenzačního vinutí. Má celkem 2000 závitů a je tvořena dvěma paralelně spojenými cívkami po 1000 závitěch. Začátek první cívky je značen A1 a její konec A2. Druhá cívka je navinuta obráceně na protější stranu toroidního jádra a její začátek je značen B1 a konec B2.

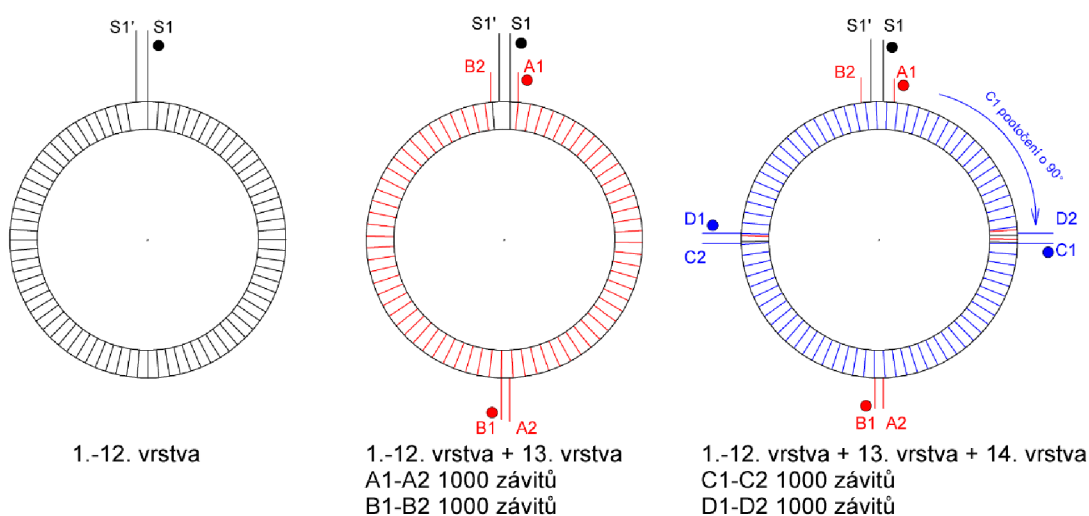
14. vrstva je druhá cívka kompenzačního vinutí, která je pootočena o 90 ° od 13. vrstvy. Má celkem 2000 závitů a je tvořena dvěma paralelně spojenými cívkami po 1000 závitěch. Začátek první cívky je značen C1 a konec C2. Druhá cívka je navinuta obráceně na protější stranu toroidního jádra a její začátek je značen D1 a konec D2.

Sekundární vinutí má tedy celkem až 22000 závitů, avšak poslední dvě vrstvy jsou paralelní větve, kde se sekundární proud patřičně rozdělí. Na výstupní hodnoty to nemá žádný vliv.

Začátek sekundárního vinutí je dle předchozího výkladu S1 a konec vinutí je paralelní spojení vývodů 14. vrstvy C2 a D2 značený jako S2.



Obr. 38 Schéma kompenzačního vinutí.



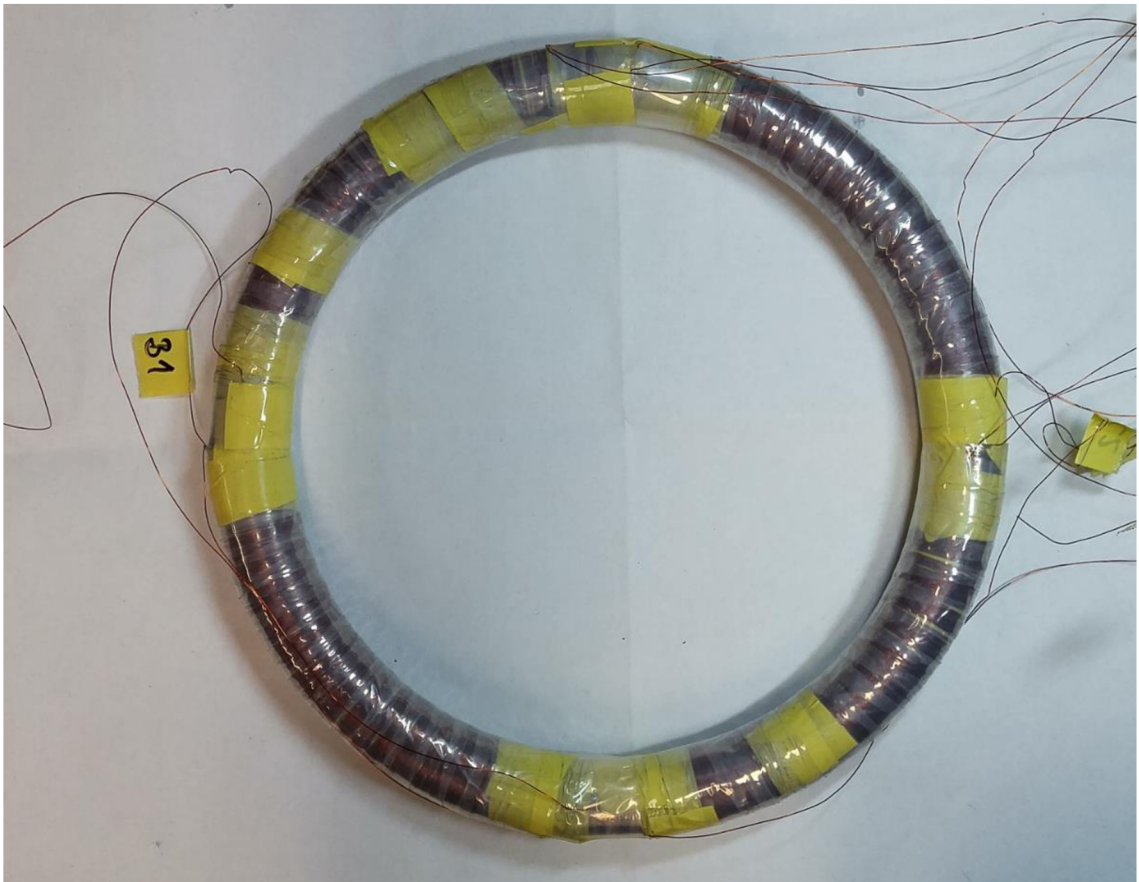
Obr. 39 Smysl navíjení kompenzačního vinutí.

Na Obr. 40 je navinuté amorfní jádro a na Obr. 41 je navinuté jádro SU. Kvůli plastovému pouzdru je navinuté amorfní jádro větší než SU jádro. Mezi každou vrstvou vinutí byla navinuta polyesterová páska. Je to z důvodu ochrany vinutí proti oděrům a vnějším mechanickým vlivům. Polyesterová páska je taky na poslední vrstvě vinutí.

Vývody sekundárního vinutí byly následně pospojovány dle schématu na Obr. 38.



Obr. 40 Navinuté amorfní jádro.



Obr. 41 Navinuté SU jádro.

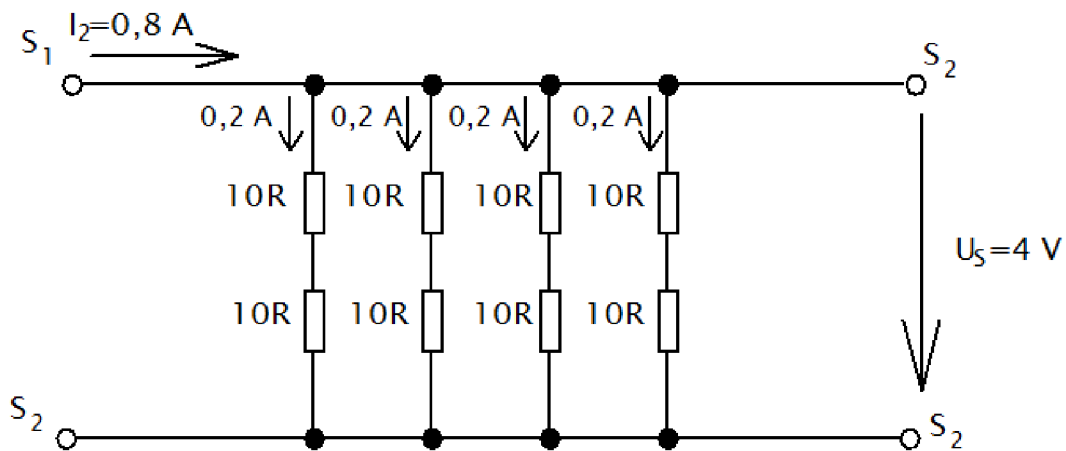
5.3 Odporový bočník R_{sh}

Na odporový bočník se kladou podmínky, kterým musí součástka vyhovět. Odporový bočník je tvořen rezistorem, resp. rezistory. V kapitole 4.2 byl navržen odporový bočník s hodnotou $R_{sh}=5\ \Omega$.

Odporový bočník by měl být teplotně stabilní, tedy měl by mít co nejmenší hodnotu ppm/°C (parts per million). Např. 5 ppm/°C znamená, že když se změní teplota o 1 °C, tak se hodnota odporu změní o 5 Ω na každý 1 M Ω .

Dále by měl být odpor dimenzovaný na ztrátový výkon při největším primárním proudu, konkrétně $P_{ztr}=3,2\ \text{W}$.

Jako odporový bočník bylo zvoleno celkem osm 10 Ω rezistorů, které jsou spojeny do čtyřech paralelních větví po dvou sériově spojených odporech. Takové spojení vytvoří jeden odpor $R_{sh}=5\ \Omega$. Zvolené rezistory jsou metalizované, s hodnotou 50 ppm, tolerancí 1 % a dovoleným výkonem 1 W. Byl zvoleno takové řešení, protože kdyby se použil pouze jeden rezistor s požadovanými parametry, tak by se jednalo o rezistor se speciální technologií, které jsou ekonomicky náročné a málo dostupné. Takhle byly zvoleny rezistory běžně dostupné na trhu. Schéma zapojení odporového bočníku je na Obr. 42.



Obr. 42 Odporový bočník LPCT.

Hodnoty ve schématu na Obr. 42 jsou při maximální primárním proudu, resp. maximálním sekundárním proudu. Díky takovému zapojení se sekundární proud rozdělí celkem do čtyřech větví, tím se sníží ztrátový výkon, který se objeví na rezistoru. Ztrátový výkon jedné paralelní větve:

$$P_{ztr} = (R + R) \cdot I^2 = (10 + 10) \cdot 0,2^2 = 0,8\ \text{W} \quad [\text{W}; \Omega, \text{A}] \quad (5.3-1)$$

Zvolený rezistor má dovolený výkon 1 W, podmínka je tedy splněna.

Takhle navržený odporový bočník je nyní nutno připojit k sekundárnímu vinutí. Odporový bočník je trvale připojen k sekundárnímu vinutí. Připájený

odporový bočník k sekundárnímu vinutí je vidět na Obr. 43. Vývody sekundárního vinutí jsou již pospojovány. R_{sh} je připojen mezi svorky S1 a S2. Veškeré spoje jsou zalepeny izolační páskou.

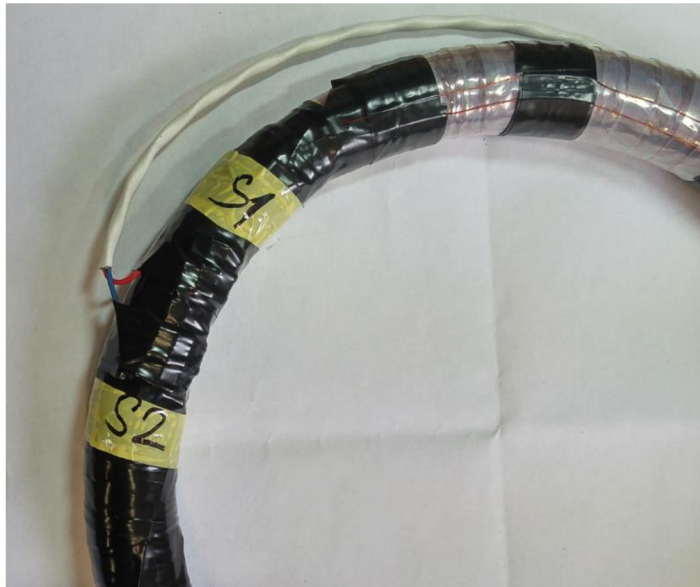


Obr. 43 Připájený odporový bočník LPCT s amorfním jádrem.

5.4 Vývod LPCT

Jelikož na vývodu LPCT se objevují velice malé hodnoty, musí být vývod LPCT náležitě odstíněn. Jako vývodní kabel se použije kroucená dvojlinka. Kroucená dvojlinka obsahuje dva do sebe kroucené dráty, které jsou obaleny stíněním ve formě kovové sítě. To celé je pak obaleno plastovou izolací. Vývod LPCT musí být dostatečně dlouhý, aby ho bylo možno připojit k externím měřícím přístrojům či ochranám.

Připojený vývod LPCT je na Obr. 44.



Obr. 44 Připájený vývod k LPCT.

5.5 Stínění LPCT

Stejně tak jako vývod, musí být i celé LPCT náležitě odstíněno. Stínění je tvořeno polovodivou páskou z krepového papíru. Polovodivá páska musí být spojena se stíněním vývodního kabelu. Ke stínění kabelu je připájen dracoun, který je vyveden na LPCT a následně obmotán polovodivou páskou. Polovodivá páska musí být po celém obvodu LPCT spojena a nesmí vzniknout žádné mezery, jinak by nedošlo k úplnému stínění LPCT. Na Obr. 45 je detail připájeného dracounu. Princip stínění je pak na Obr. 46. Na Obr. 47 je hotové LPCT po namotání polovodivé pásky.



Obr. 45 Detail dracounu a stínění LPCT.



Obr. 46 Motání polovodivé pásky na LPCT.

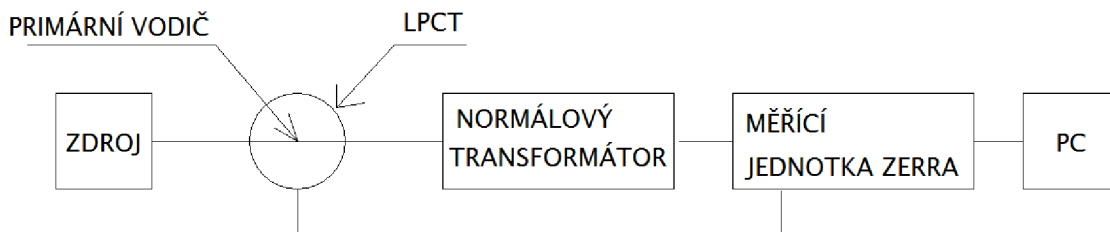


Obr. 47 Hotové LPCT.

6 MĚŘENÍ TŘÍDY PŘESNOSTI LPCT

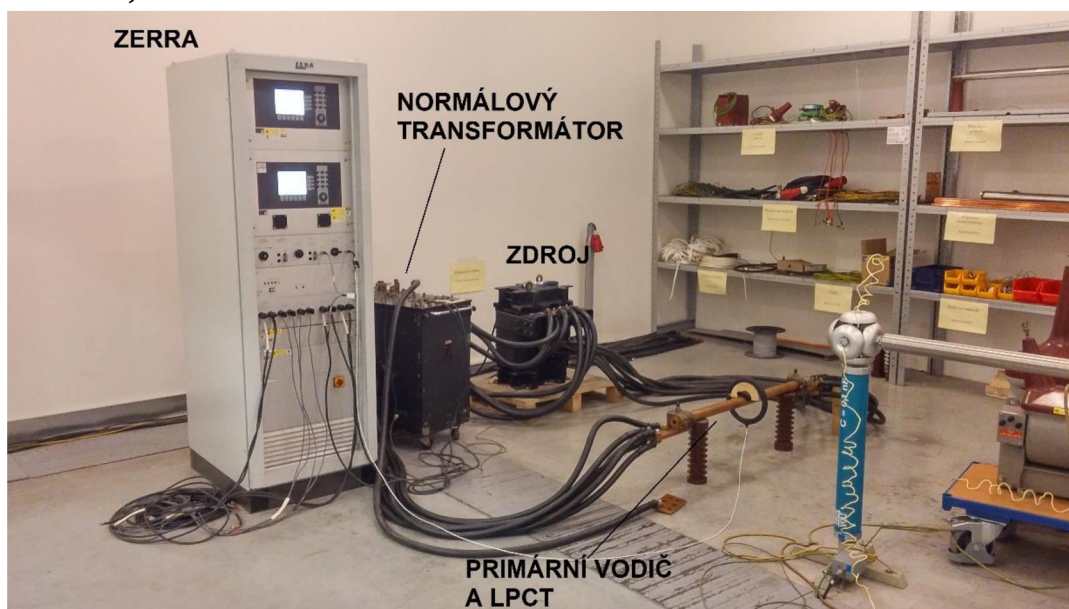
Měření bylo provedeno v laboratořích firmy ABB s.r.o. Byly měřeny dvě LPCT. Jedno s amorfním jádrem a druhý s SU jádrem. LPCT nebylo vloženo do žádného krytu. LPCT bylo ve stavu v jakém je na Obr. 47.

Schéma zapojení měření je na Obr. 48.

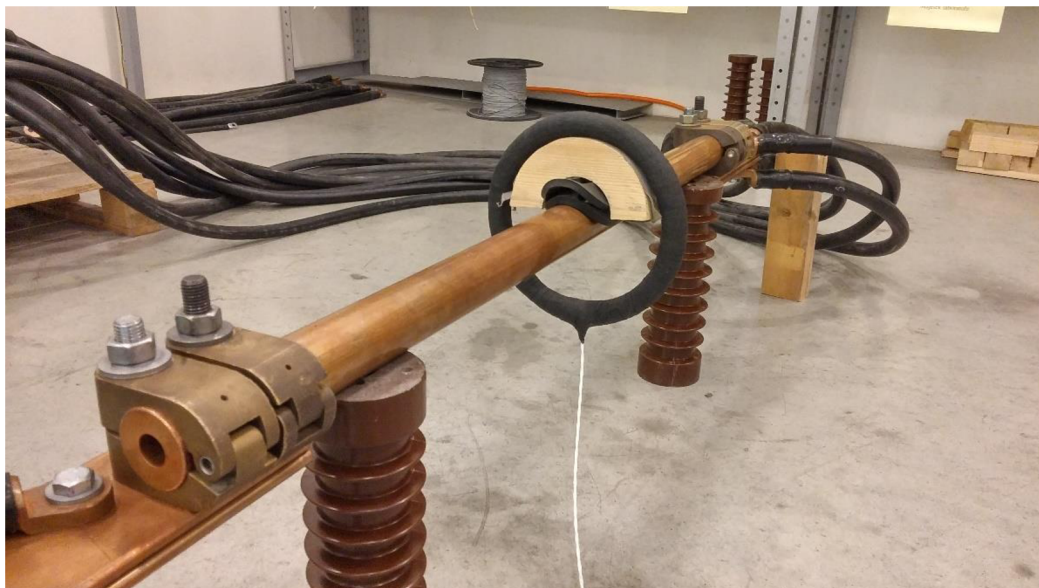


Obr. 48 Schéma zapojení měření TP LPCT.

Jako zdroj je transformátor se sekundárním proudem 4000 A. Ke zdroji byl připojen měřený primární vodič ve formě masivní měděné tyče. Primární vodič byl provlečen oknem LPCT. Vývod primárního vodiče byl připojen k normálovému transformátoru se zaručenou přesností 0,02 % a $\pm 0,5$ min. Normálový transformátor byl připojen k měřicí jednotce ZERRA. Vývod LPCT byl vyveden rovněž k této jednotce. Nastavování primárního proudu a snímání měřících hodnot bylo prováděno na PC, které bylo připojené k měřicí jednotce ZERRA. Měřící pracoviště je na Obr. 49.



Obr. 49 Měřicí pracoviště.



Obr. 50 Primární vodič a LPCT.

Měřicí jednotka ZERRA porovnává výstupní veličiny z normálového transformátoru a LPCT a následně vyhodnotí celkovou chybu proudu a fázovou chybu LPCT. Tato jednotka je určena pro měření proudových senzorů, a tudíž zavádí fázový posun 90° . Od naměřené fázové chyby se tedy muselo odečíst 90° , aby se došlo ke správnému výsledku.

Maximální měřený proud byl 4000 A kvůli rozsahu napájecího zdroje měřeného obvodu.

Naměřené hodnoty jsou v Tabulka 8. Jmenovitý primární proud a jmenovité sekundární napětí byly nastaveny dle navržených hodnot v kapitole 4. Zátěž (břemeno) byla nastavena na hodnotu $Z=0,1\text{ M}\Omega$. Je to nejmenší možná hodnota, kterou může měřicí jednotka ZERRA nastavit. Na LPCT nemá zátěž žádný vliv díky jeho trvale připojenému odporovému bočníku. Měření bylo provedeno při následujících atmosférických podmínkách:

- Teplota: $23,8^\circ\text{C}$
- Tlak: 991 hPa
- Rel. vlhkost: $40,7\%$

Od hodnoty jmenovitého proudu byly kroky měření zvětšovány kvůli zahřívání primárního obvodu. Měřicí veličiny byly celková chyba proudu a fázová chyba v závislosti na primárním proudu.

Tabulka 8 Naměřené hodnoty celkové chyby proudu a fázové chyby. $I_{1n}=100$ A, $U_{sn}= 0,025$ V, $f=50$ Hz, $Z=0,1$ M Ω .

I_1	AMORF		SU	
	ε_i	δ_i	ε_i	δ_i
[A]	[%]	[min]	[%]	[min]
1	-0,375	-2,770	-0,786	83,250
2	-0,381	-0,360	-0,750	67,970
5	-0,374	0,360	-0,764	61,580
10	-0,393	1,150	-0,785	42,190
20	-0,378	1,300	-0,781	28,320
50	-0,387	1,390	-0,840	18,930
100	-0,389	1,420	-0,780	14,510
120	-0,528	-2,140	-0,804	11,450
250	-0,477	-2,350	-0,810	8,690
500	-0,480	-2,530	-0,782	7,520
750	-0,466	-2,660	-0,762	5,860
1000	-0,418	-2,720	-0,760	4,700
1500	-0,458	-3,000	-0,754	3,650
2000	-0,467	-2,990	-0,742	2,740
3000	-0,454	-2,940	-0,723	1,830
4000	-0,440	-2,940	-0,707	1,250

Naměřená celková chyba proudu pro LPCT s amorfním jádrem je v porovnání s výsledky v Tabulka 12 až o řád větší. Zatímco navržený LPCT má celkovou chybu proudu při jmenovitém proudu -0,019 %, vyrobené LPCT má naměřenou celkovou chybu proudu -0,389 %. Naměřená fázová chyba je při menších proudech menší než navržená, avšak s rostoucím proudem neklesá, jak je tomu u navrženého LPCT.

Naměřená celková chyba proudu pro LPCT s SU jádrem je rovněž o řád větší než vypočtené hodnoty. Naměřená chyba při jmenovitém proudu je -0,780 % a vypočtená celková chyba je -0,0888 %. Naměřená fázová chyba je skoro totožná s vypočtenými hodnotami.

Lze také vidět, že amorfní kovy mají při malých proudech lineárnější průběhy. Naměřená celková chyba proudu pro amorfní jádro při malých proudech je konstantnější než pro SU jádro.

Digitální ochrany mají funkci tzv. „offset“, což je posunutí charakteristiky TP o konstantu. Digitální ochraně se zadají hodnoty chyb transformátoru a ta je pomocí rovnice přímky posune na požadovanou hodnotu. PTP, které by vyhovovali např. TP 0,5 po posunutí mohou vyhovovat např. TP 0,2. Aby to bylo možné, hodnoty musejí být skoro konstantní a lineární. Naměřené hodnoty po funkci offset jsou v Tabulka 9.

Tabulka 9 Naměřené hodnoty a hodnoty po funkci offset.

x	I ₁	AMORF		SU	
		ε _i	ε _{ioffset}	ε _i	ε _{ioffset}
[-]	[A]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	1	-0,375	0,065	-0,786	-0,079
2	2	-0,381	0,059	-0,750	-0,043
3	5	-0,374	0,066	-0,764	-0,057
4	10	-0,393	0,047	-0,785	-0,078
5	20	-0,378	0,062	-0,781	-0,074
6	50	-0,387	0,053	-0,840	-0,133
7	100	-0,389	0,051	-0,780	-0,073
8	120	-0,528	-0,088	-0,804	-0,097
9	250	-0,477	-0,037	-0,810	-0,103
10	500	-0,480	-0,040	-0,782	-0,075
11	750	-0,466	-0,026	-0,762	-0,055
12	1000	-0,418	0,022	-0,760	-0,053
13	1500	-0,458	-0,018	-0,754	-0,047
14	2000	-0,467	-0,027	-0,742	-0,035
15	3000	-0,454	-0,014	-0,723	-0,016
16	4000	-0,440	0,000	-0,707	0,000

Celková chyba proudu po offsetu se vypočte dle následující rovnice:

$$\varepsilon_{ixoffset} = \varepsilon_{ix} - q \text{ [%; \%, \%]} \quad (5.5-1)$$

kde ε_i= celková chyba proudu při určitém proudu [%], q= poslední naměřená hodnota v tabulce [%]

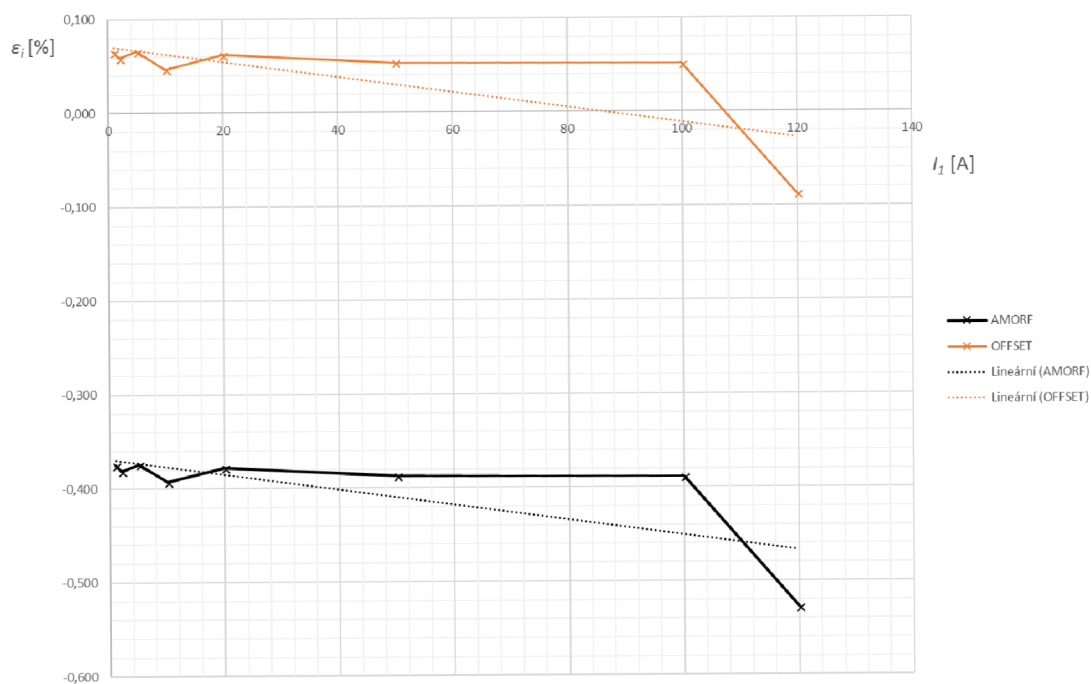
Příklad výpočtu pro jmenovitý proud amorfního LPCT v Tabulka 9:

$$\varepsilon_{i7offset} = \varepsilon_{i7} - q = -0,389 + 0,440 = 0,051 \% \text{ [%; \%, \%]} \quad (5.5-2)$$

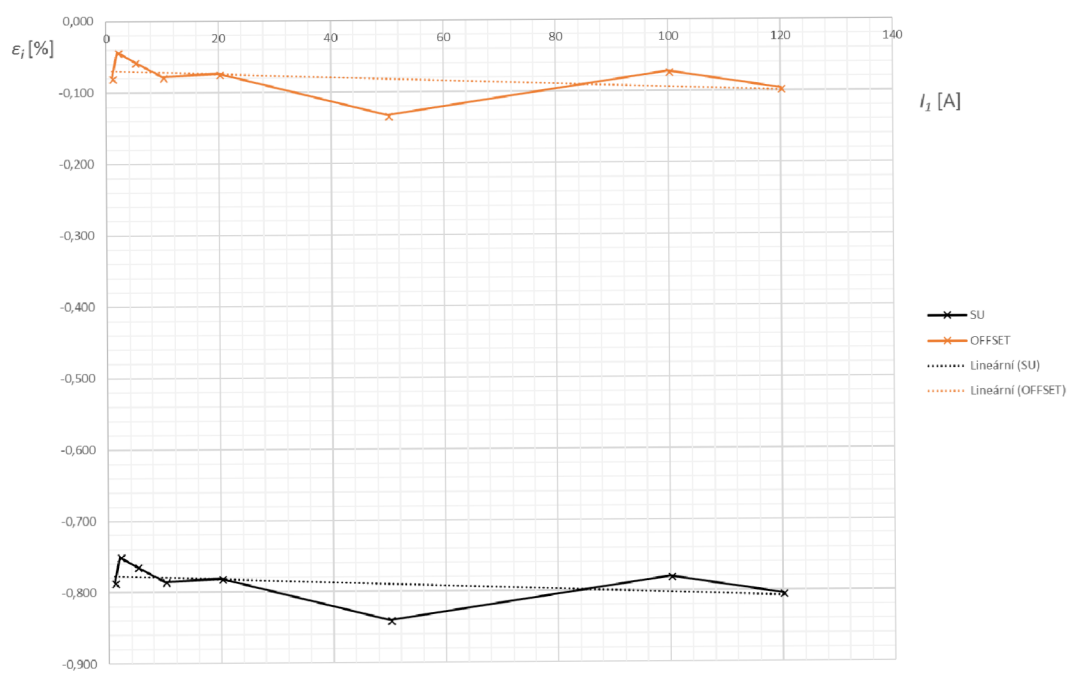
Závislost celkové chyby proudu a celkové chyby proudu po offsetu na primárním proudu v celém rozsahu je pro oba LPCT na Obr. 55 a Obr. 56 v Příloha 7.

Závislost naměřené chyby proudu pro LPCT s amorfem na primárním proudu v rozsahu 0,1-1,2I_n je na Obr. 51. Na OBR je ta stejná závislost akorát pro SU.

Díky funkci offset LPCT s amorfem dosahuje třídy přesnosti 0,1 a 0,2S. LPCT s SU by také mohlo spadat do těchto tříd, ale fázová chyba je mimo hodnoty dané normou. Proto LPCT s SU spadá do třídy přesnosti 0,5. Při posunutí fáze pomocí offsetu by SU mohlo spadat do třídy přesnosti 0,2.



Obr. 51 Závislost naměřené chyby pro LPCT s amorfem v rozsahu 0,1-1,2 I_n .



Obr. 52 Závislost naměřené chyby pro LPCT s SU v rozsahu 0,1-1,2 I_n .

7 ZÁVĚR

V první části diplomové práce je probírána teorie přístrojového transformátoru proudu. Zkoumá se funkce a princip PTP, vznik chyby PTP a jsou zde uvedeny jednotlivé třídy přesností pro PTP. Řeší se požadavky na měřící a jistící PTP v nadproudové oblasti. Jsou zde také uvedeny jednotlivé druhy PTP dle jejich použití.

Druhá část je věnována teorii nízkovýkonového přístrojového transformátoru proudu. Je zde vysvětlen princip funkce LPCT a je provedena diskuze rozdílů, výhod a nevýhod oproti jiným způsobům měření proudu. Konkrétně se LPCT porovnává s PTP a proudovými senzory na principu Rogowského cívky.

Třetí část začíná praktická fáze diplomové práce. Je proveden kompletní návrh LPCT se všemi potřebnými parametry. Navrhováno bylo LPCT s jádrem z amorfního kovu a LPCT s SU jádrem a porovnávaly se výsledky pro jednotlivé materiály. Amorf má oproti SU lepší hodnoty při malých prouděch. Má lepší začátek magnetizační charakteristiky a hodnoty jsou tedy lineárnější. SU na druhou stranu může měřit do většího rozsahu proudu. Při maximální proudu 16 kA má SU magnetickou indukci stále hluboko pod kolenem.

Nejdůležitějšími parametry jsou chyby LPCT, konkrétně chyba proudu a fázová chyba. Tyto chyby se pak porovnají s chybami vyrobeného LPCT.

Čtvrtá část je samotná výroba navrženého LPCT. Veškeré materiály, nástroje a prostory byly poskytnuty firmou ABB s.r.o. Byly vyrobeny celkem čtyři LPCT, kde dva jsou s amorfním jádrem a další dva s SU jádrem.

Vyroběné LPCT bylo následně změřeno rovněž za pomoci firmy ABB s.r.o. Naměřené celkové chyby proudu LPCT s amorfem jsou o řád větší než vypočtené hodnoty. Celková chyba proudu pro LPCT s SU je rovněž o řád větší než vypočtená hodnota. To může být způsobeno několika faktory.

Prvním je špatná technologie navíjení sekundárního vinutí. Mohlo dojít k nerovnoměrnému rozprostření vinutí i při kompenzačním vinutí. Vývody sekundárního vinutí byly následně pájeny. To může mít také vliv na chybu LPCT, jelikož vodiče se musely odizolovat a mohlo tak dojít k jejich poškození.

Dalším a asi největším faktorem jsou rezistory odporového bočníku. Z ekonomických a časových důvodů byly voleny běžně dostupné rezistory. Zvolené rezistory mají toleranci 1 %, což je v porovnání s dosaženými chybami proudů obrovská hodnota.

Dále to jsou vlastní chyby měření. Jedná se o chybu metody a chybu měření. Chyba metody je způsobena špatným odečítáním hodnot či nastavováním

nepřesných hodnot. Chyba měření je způsobena měřicími přístroji či přívodními kabelemi.

Pro budoucí zlepšení chyb LPCT je tedy potřeba zvolit kvalitnější rezistory a lepší technologii navíjení.

Naměřené hodnoty chyb byly upraveny pomocí funkcí offset, která je zavedena v digitálních ochranách.

Závěrem je tedy vyrobené LPCT dle navržených hodnot. Toto vyrobené LPCT bylo následně změřeno a byly přiřazeny třídy přesností. Pro LPCT s amorfním jádrem je po zavedení funkce offset TP 0,1 a 0,2S. Pro LPCT s SU jádrem je TP 0,5 kvůli fázové chybě transformátoru.

Literatura

- [1] IEC 61869-1: *Instrument transformers – Part 1: General requirements*. Geneva: IEC, 2007.
- [2] IEC 61869-2: *Instrument transformers - Part 2: Additional requirements for current transformers*. Geneva: IEC, 2012
- [3] IEC 60044-8: *Instrument transformers – Part 8: Electronic current transformers*. Geneva: IEC, 2002.
- [4] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 9788021440036.
- [5] KRÁL, Josef a Jaromír VANĚK. *Elektromagnetické přístroje*. Brno: VUT, 1984.
- [6] DOSTÁL, Lukáš. *Stavba a výroba elektrických přístrojů: Přístrojové transformátory proudu a napětí*[online]. 2014
- [7] *ABB Brochure Instrument transformers for indoor applications: Product overview*. Rev. 2. 2016.
- [8] MINKNER, Ruthard a Edmund O. SCHWEITZER III. *Low Power Voltage and Current Transducers for Protecting and Measuring Medium and High Voltage Systems*. USA: Trench Switzerland AG and Schweitzer Engineering Laboratories, 2000
- [9] A. KOJOVIC, Ljubomir a Robert BERESH. *Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying: Special Report*. IEEE PRSC, 2010.
- [10] *Low Power Instrument Transformers For Medium Voltage Switchgear*. Switzerland: TRENCH, 2011
- [11] *UniGear Digital/Features* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://www.abb-unigeardigital.com/Features>
- [12] *UniGear Digital/UGD 550* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://www.abb-unigeardigital.com/Features/ugd550>
- [13] *KECA 250 B1 Current Sensor: Instructions for installation, use and maintenance*. Rev. 2. ABB, 2012
- [14] *KECA 80 C104, KECA 80 C165: Indoor current sensor*. Rev. 2. ABB, 2014.
- [15] In: *Busyvee Industrial Solutions* [online]. [cit. 2018-04-1]. Dostupné z: <http://busyveeindustrialsolutions.com/product/lpct/>
- [16] *Product brochure UniGear 550: Medium voltage, arc-proof, air-insulated, metal-clad switchgear*. China: ABB Xiamen Electrical Controlgear Co.
- [17] ODEHNAL, Martin, Roman PERNICA a Pavel VÁŇO. *Current transformer*. EP 2 597 658 A2. Uděleno 29.05.2013. Zapsáno 05.11.2012.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

PTP		Přístrojový transformátor proudu
k	[-]	Převod transformátoru
N_1	[-]	Počet závitů primárního vinutí
N_2	[-]	Počet závitů sekundárního vinutí
I_2	[A]	Sekundární proud transformátoru
I_1	[A]	Primární proud transformátoru
P_1		Primární svorka 1
P_2		Primární svorka 2
S_1		Sekundární svorka 1
S_2		Sekundární svorka 2
IEC		International Electrotechnical Commission
K		Primární svorka – staré značení
L		Primární svorka – staré značení
k		Sekundární svorka – staré značení
l		Sekundární svorka – staré značení
U'_2	[V]	Fázor sekundárního napětí přepočtený na počet závitů primárního vinutí
Z'	[Ω]	Fázor impedance zátěže (břemene) přepočtený na počet závitů primárního vinutí
I'_2	[A]	Fázor sekundárního proudu přepočtený na počet závitů primárního vinutí
U'_{20}	[V]	Fázor indukovaného napětí přepočtený na počet závitů primárního vinutí
R_{Cu2}	[Ω]	Odpor sekundárního vinutí
$X_{\sigma 2}$	[Ω]	Rozptylová reactance sekundárního vinutí
I_{10}	[A]	Fázor budícího proudu (proudu naprázdno)
I_{FE}	[A]	Činná složka proudu naprázdno
I_M	[A]	Magnetizační proud
I_1	[A]	Fázor primárního proudu
ε_i	[%]	Proudová chyba
δ_i	[', minuty]	Chyba úhlu
TP		Třída přesnosti
I_{1N}	[A]	Jmenovitý primární proud
ΔI	[A]	Celková chyba
f	[Hz]	Frekvence
Φ	[Wb]	Magnetický tok
B	[T]	Magnetická indukce

H_0	[A·m ⁻¹]	Hodnota jednotkového magnetického napětí
l_m	[m]	Délka střední siločáry magnetického obvodu
FS		Security factor, Nadproudové číslo
ALF		Accuracy limit factor
I_{1n}	[A]	Jmenovitý primární proud
I_{2n}	[A]	Jmenovitý sekundární proud
U_{sn}	[A]	Jmenovité sekundární napětí
U_s	[V]	Sekundární napětí
I_{th}	[A]	Jmenovitý krátkodobý tepelný proud
I_{cth}	[A]	Jmenovitý nepřetržitý tepelný proud
I_{dyn}	[A]	Jmenovitý dynamický proud
I_{2th}	[A]	Sekundární proud při jmenovitém krátkodobém tepelném proudu na primární straně.
I_{2cth}	[A]	Sekundární proud při jmenovitém nepřetržitým tepelném proudu na primární straně
LPCT		Nízkovýkonový přístrojový transformátor proudu, Low Power Current Transformer
R_{sh}	[Ω]	Odporový bočník
R_b	[Ω]	Odpor břemene
S_n	[VA]	Jmenovitý výkon
J_{norma}	[A/mm ²]	Proudová hustota daná normou
T_{norma}	[°C]	Teplota okolí daná normou
T_{zadane}	[°C]	Zadaná teplota okolí
T_E	[°C]	Teplotní nárůst pro třídu E
T_{max}	[°C]	Maximální teplota daná teplotní třídou
P_{ztr}	[W]	Ztrátový výkon
S_{Cu}	[mm ²]	Průřez vodiče
d_{Cu}	[mm]	Průměr vodiče
d_{Cumax}	[mm]	Průměr vodiče s izolací
B_{max}	[T]	Maximální magnetická indukce, při níž dojde k nasycení jádra
H_{max}	[A/m]	Maximální intenzita magnetického pole, při níž dojde k nasycení jádra
B_n	[T]	<i>Jmenovitá magnetická indukce</i>
H_n	[A/m]	Jmenovitá intenzita magnetického pole
S_j	[mm ²]	Průřez jádra
a	[mm]	Délka jedné stěny jádra
D_1	[mm]	Vnitřní průměr LPCT
D_{cu}	[mm]	Vnitřní průměr sekundárního vinutí
t_p	[mm]	Tloušťka plastového pouzdra LPCT

k_{scu}	[-]	Činitel skládání sekundárního vinutí
n	[-]	Počet vrstev sekundárního vinutí
n_c	[-]	Celkový počet vrstev sekundárního vinutí
N_{1vrst}	[-]	Počet závitů jedné vrstvy sekundárního vinutí
t_{Cu}	[mm]	Tloušťka sekundárního vinutí
d_{1min}	[mm]	Minimální možný průměr jádra
d_1	[mm]	Vnitřní průměr jádra
d_2	[mm]	Vnější průměr jádra
b	[mm]	Šířka plastového pouzdra amorfního jádra
h	[mm]	Výška plastového pouzdra amorfního jádra
l_{1zavit}	[m]	Délka jednoho závitu sekundárního vinutí
l_{1vrst}	[m]	Délka jedné vrstvy sekundárního vinutí
l_{cel}	[m]	Celková délka sekundárního vinutí
R_{20}	[Ω]	Odpor vinutí při 20 °C
R_{75}	[Ω]	Odpor vinutí při 75 °C
ρ_{20}	[$\Omega \cdot m$]	Měrný elektrický odpor mědi při 20 °C
α	[K ⁻¹]	Teplotní součinitel odporu mědi
$\Delta\vartheta$	[K]	Rozdíl teplot
U_0	[V]	Indukované napětí
U_{0n}	[V]	Jmenovité indukované napětí
l_{fe}	[m]	Délka střední siločáry
I_{μ}	[A]	Magnetizační proud
I_{prim}	[A]	Skutečný primární proud
E	[V/m]	Intenzita elektrického pole
q	[%]	Konstanta, poslední naměřená hodnota v tabulce.

PŘÍLOHY

Příloha 1

Tabulka 10 P1 Základní a magnetické parametry v celém rozsahu pro LPCT s amorfním jádrem.

I_1/I_{1N}	I_1	I_2	U_s	P_{ztr}	U_o	B	H	φ_o
[-]	[A]	[A]	[V]	[W]	[V]	[T]	[A/m]	[°]
0,01	1	0,00005	0,00025	12,500E-9	0,01979	0,00004	0,00396	81,69232
0,02	2	0,0001	0,0005	50,00E-9	0,03958	0,00009	0,00644	81,36257
0,05	5	0,00025	0,00125	312,500E-9	0,09896	0,00022	0,01224	80,37331
0,1	10	0,0005	0,0025	1,250E-6	0,19791	0,00045	0,01990	78,72454
0,2	20	0,001	0,005	5,00E-6	0,39582	0,00089	0,03218	75,98311
0,3	30	0,0015	0,0075	11,250E-6	0,59373	0,00134	0,04191	75,41038
0,4	40	0,002	0,010	20,00E-6	0,79164	0,00178	0,05055	74,83765
0,5	50	0,0025	0,0125	31,250E-6	0,98956	0,00223	0,05846	74,26969
0,6	60	0,003	0,015	45,00E-6	1,18747	0,00267	0,06569	73,77474
0,7	70	0,0035	0,0175	61,250E-6	1,38538	0,00312	0,07249	73,27978
0,8	80	0,004	0,020	80,00E-6	1,58329	0,00356	0,07895	72,78483
0,9	90	0,0045	0,0225	101,250E-6	1,78120	0,00401	0,08513	72,28751
1	100	0,005	0,025	125,00E-6	1,97911	0,00445	0,09141	71,67660
1,2	120	0,006	0,030	180,00E-6	2,37493	0,00535	0,10340	70,45478
2	200	0,010	0,050	500,00E-6	3,95822	0,00891	0,14331	66,76480
4	400	0,020	0,100	2,00E-3	7,91645	0,01782	0,21215	62,11657
6	600	0,030	0,150	4,500E-3	11,87467	0,02673	0,26952	58,76570
8	800	0,040	0,200	8,00E-3	15,83289	0,03564	0,32034	56,33721
10	1000	0,050	0,250	12,500E-3	19,79111	0,04455	0,36699	54,95842
12	1200	0,060	0,300	18,00E-3	23,74934	0,05345	0,41011	53,57962
14	1400	0,070	0,350	24,500E-3	27,70756	0,06236	0,45050	52,20083
16	1600	0,080	0,400	32,00E-3	31,66578	0,07127	0,48869	50,82204
18	1800	0,090	0,450	40,500E-3	35,62400	0,08018	0,52111	50,15271
20	2000	0,100	0,500	50,00E-3	39,58223	0,08909	0,55019	49,79635
40	4000	0,200	1,000	200,00E-3	79,16445	0,17818	0,78643	46,23270
60	6000	0,300	1,500	450,00E-3	118,74668	0,26727	0,96920	42,66905
80	8000	0,400	2,000	800,00E-3	158,32890	0,35637	1,10431	41,25606
100	10000	0,500	2,500	1,250E+0	197,91113	0,44546	1,22404	41,45379
120	12000	0,600	3,000	1,800E+0	237,49336	0,53455	1,36002	48,73013
140	14000	0,700	3,500	2,450E+0	277,07558	0,62364	1,55279	58,75771
160	16000	0,800	4,000	3,200E+0	316,65781	0,71273	1,87534	67,51583

Příloha 2

Tabulka 11 P2 Základní a magnetické parametry v celém rozsahu pro LPCT s SU jádrem.

I_1/I_{1N}	I_1	I_2	U_s	P_{ztr}	U_0	B	H	φ_o
[-]	[A]	[A]	[V]	[W]	[V]	[T]	[A/m]	[°]
0,01	1	0,00005	0,00025	12,500E-9	0,01979	0,00004	0,06090	81,34857
0,02	2	0,0001	0,0005	50,00E-9	0,03958	0,00009	0,07280	80,08856
0,05	5	0,00025	0,00125	312,500E-9	0,09896	0,00022	0,10177	78,51590
0,1	10	0,0005	0,0025	1,250E-6	0,19791	0,00045	0,13778	77,28986
0,2	20	0,001	0,005	5,00E-6	0,39582	0,00089	0,19207	75,97259
0,3	30	0,0015	0,0075	11,250E-6	0,59373	0,00134	0,23634	75,17236
0,4	40	0,002	0,010	20,00E-6	0,79164	0,00178	0,27484	74,53981
0,5	50	0,0025	0,0125	31,250E-6	0,98956	0,00223	0,30864	74,04969
0,6	60	0,003	0,015	45,00E-6	1,18747	0,00267	0,33901	73,69629
0,7	70	0,0035	0,0175	61,250E-6	1,38538	0,00312	0,36701	73,34290
0,8	80	0,004	0,020	80,00E-6	1,58329	0,00356	0,39312	72,98950
0,9	90	0,0045	0,0225	101,250E-6	1,78120	0,00401	0,41770	72,63611
1	100	0,005	0,025	125,00E-6	1,97911	0,00445	0,44098	72,28271
1,2	120	0,006	0,030	180,00E-6	2,37493	0,00535	0,48412	71,69108
2	200	0,010	0,050	500,00E-6	3,95822	0,00891	0,62719	70,05180
4	400	0,020	0,100	2,00E-3	7,91645	0,01782	0,93427	67,13416
6	600	0,030	0,150	4,500E-3	11,87467	0,02673	1,18853	65,23113
8	800	0,040	0,200	8,00E-3	15,83289	0,03564	1,41069	63,60373
10	1000	0,050	0,250	12,500E-3	19,79111	0,04455	1,61124	61,97633
12	1200	0,060	0,300	18,00E-3	23,74934	0,05345	1,79817	60,66216
14	1400	0,070	0,350	24,500E-3	27,70756	0,06236	1,97641	59,84252
16	1600	0,080	0,400	32,00E-3	31,66578	0,07127	2,14502	59,02288
18	1800	0,090	0,450	40,500E-3	35,62400	0,08018	2,30565	58,20324
20	2000	0,100	0,500	50,00E-3	39,58223	0,08909	2,45950	57,38360
40	4000	0,200	1,000	200,00E-3	79,16445	0,17818	3,94120	51,61086
60	6000	0,300	1,500	450,00E-3	118,74668	0,26727	5,23878	48,61721
80	8000	0,400	2,000	800,00E-3	158,32890	0,35637	6,41706	46,41517
100	10000	0,500	2,500	1,250E+0	197,91113	0,44546	7,51063	44,21313
120	12000	0,600	3,000	1,800E+0	237,49336	0,53455	8,54111	42,01109
140	14000	0,700	3,500	2,450E+0	277,07558	0,62364	9,52192	39,80905
160	16000	0,800	4,000	3,200E+0	316,65781	0,71273	10,46213	37,60701

Příloha 3

Tabulka 12 P3 Tabulka závislosti celkové chyby proudu a fázové chyby na primárním proudu pro jednotlivé materiály.

I_1/I_{1N}	I_1	AMORF		SU	
		ε_i	δ_i	ε_i	δ_i
[-]	[A]	[%]	[min]	[%]	[min]
1	1	-0,03805	8,88006	-0,67807	135,65044
0,02	2	-0,03209	7,21349	-0,43928	80,97462
0,05	5	-0,02712	5,47126	-0,27522	45,11423
0,1	10	-0,02574	4,42450	-0,20350	30,42106
0,2	20	-0,02576	3,53963	-0,15521	21,09832
0,3	30	-0,02325	3,06568	-0,13409	17,24947
0,4	40	-0,02184	2,76606	-0,12164	15,00106
0,5	50	-0,02094	2,55185	-0,11255	13,44567
0,6	60	-0,02020	2,38355	-0,10517	12,28631
0,7	70	-0,01967	2,24890	-0,09960	11,38076
0,8	80	-0,01928	2,13753	-0,09523	10,64737
0,9	90	-0,01900	2,04321	-0,09172	10,03715
1	100	-0,01897	1,96778	-0,08884	9,51864
1,2	120	-0,01903	1,84136	-0,08386	8,67939
2	200	-0,01865	1,49300	-0,07072	6,68083
4	400	-0,01637	1,06305	-0,05994	4,87813
6	600	-0,01537	0,87100	-0,05479	4,07711
8	800	-0,01464	0,75576	-0,05175	3,58050
10	1000	-0,01390	0,68137	-0,04996	3,22422
12	1200	-0,01339	0,62364	-0,04845	2,96123
14	1400	-0,01301	0,57660	-0,04680	2,76712
16	1600	-0,01273	0,53692	-0,04553	2,60571
18	1800	-0,01224	0,50404	-0,04453	2,46803
20	2000	-0,01171	0,47646	-0,04373	2,34821
40	4000	-0,00897	0,32198	-0,04036	1,75085
60	6000	-0,00784	0,24828	-0,03808	1,48524
80	8000	-0,00685	0,20643	-0,03648	1,31729
100	10000	-0,00605	0,18377	-0,03551	1,18742
120	12000	-0,00493	0,19319	-0,03488	1,08001
140	14000	-0,00380	0,21506	-0,03446	0,98725
160	16000	-0,00296	0,24561	-0,03417	0,90468

Příloha 4

Tabulka 13 P4 Tabulka všech hodnot pro LPCT s amorfním jádrem.

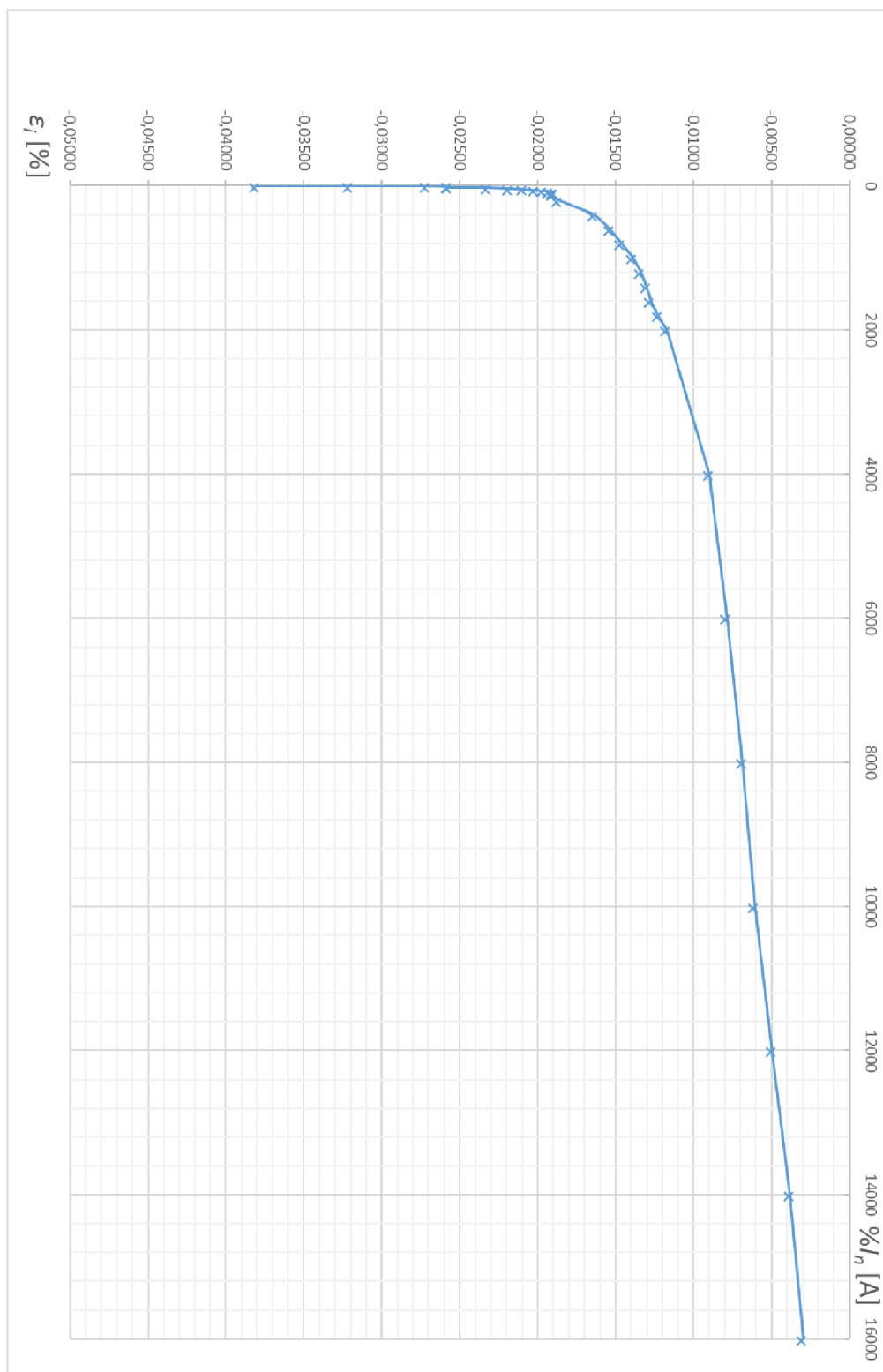
I_1/I_{1N}	I_1	I_2	U_s	P_{ztr}	U_0	B	H	φ_0	I_μ	I_{prim}	ε_i	δ_i
[-]	[A]	[A]	[V]	[W]	[V]	[T]	[A/m]	[°]	[A]	[A]	[%]	[min]
0,01	1	0,00005	0,00025	12,500E-9	0,01979	0,00004	0,00396	81,69232	130,575E-9	1,00038	-0,03805	8,88006
0,02	2	0,0001	0,0005	50,00E-9	0,03958	0,00009	0,00644	81,36257	212,307E-9	2,00064	-0,03209	7,21349
0,05	5	0,00025	0,00125	312,500E-9	0,09896	0,00022	0,01224	80,37331	403,674E-9	5,00136	-0,02712	5,47126
0,1	10	0,0005	0,0025	1,250E-6	0,19791	0,00045	0,01990	78,72454	656,351E-9	10,00257	-0,02574	4,42450
0,2	20	0,001	0,005	5,00E-6	0,39582	0,00089	0,03218	75,98311	1,062E-6	20,00515	-0,02576	3,53963
0,3	30	0,0015	0,0075	11,250E-6	0,59373	0,00134	0,04191	75,41038	1,383E-6	30,00698	-0,02325	3,06568
0,4	40	0,002	0,010	20,00E-6	0,79164	0,00178	0,05055	74,83765	1,668E-6	40,00874	-0,02184	2,76606
0,5	50	0,0025	0,0125	31,250E-6	0,98956	0,00223	0,05846	74,26969	1,928E-6	50,01047	-0,02094	2,55185
0,6	60	0,003	0,015	45,00E-6	1,18747	0,00267	0,06569	73,77474	2,167E-6	60,01212	-0,02020	2,38355
0,7	70	0,0035	0,0175	61,250E-6	1,38538	0,00312	0,07249	73,27978	2,391E-6	70,01377	-0,01967	2,24890
0,8	80	0,004	0,020	80,00E-6	1,58329	0,00356	0,07895	72,78483	2,604E-6	80,01543	-0,01928	2,13753
0,9	90	0,0045	0,0225	101,250E-6	1,78120	0,00401	0,08513	72,28751	2,808E-6	90,01710	-0,01900	2,04321
1	100	0,005	0,025	125,00E-6	1,97911	0,00445	0,09141	71,67660	3,015E-6	100,01898	-0,01897	1,96778
1,2	120	0,006	0,030	180,00E-6	2,37493	0,00535	0,10340	70,45478	3,411E-6	120,02284	-0,01903	1,84136
2	200	0,010	0,050	500,00E-6	3,95822	0,00891	0,14331	66,76480	4,727E-6	200,03732	-0,01865	1,49300
4	400	0,020	0,100	2,00E-3	7,91645	0,01782	0,21215	62,11657	6,998E-6	400,06548	-0,01637	1,06305
6	600	0,030	0,150	4,500E-3	11,87467	0,02673	0,26952	58,76570	8,891E-6	600,09222	-0,01537	0,87100
8	800	0,040	0,200	8,00E-3	15,83289	0,03564	0,32034	56,33721	10,567E-6	800,11716	-0,01464	0,75576
10	1000	0,050	0,250	12,500E-3	19,79111	0,04455	0,36699	54,95842	12,106E-6	1000,13904	-0,01390	0,68137
12	1200	0,060	0,300	18,00E-3	23,74934	0,05345	0,41011	53,57962	13,528E-6	1200,16066	-0,01339	0,62364
14	1400	0,070	0,350	24,500E-3	27,70756	0,06236	0,45050	52,20083	14,861E-6	1400,18218	-0,01301	0,57660
16	1600	0,080	0,400	32,00E-3	31,66578	0,07127	0,48869	50,82204	16,120E-6	1600,20369	-0,01273	0,53692
18	1800	0,090	0,450	40,500E-3	35,62400	0,08018	0,52111	50,15271	17,190E-6	1800,22030	-0,01224	0,50404
20	2000	0,100	0,500	50,00E-3	39,58223	0,08909	0,55019	49,79635	18,149E-6	2000,23432	-0,01171	0,47646
40	4000	0,200	1,000	200,00E-3	79,16445	0,17818	0,78643	46,23270	25,942E-6	4000,35891	-0,00897	0,32198
60	6000	0,300	1,500	450,00E-3	118,74668	0,26727	0,96920	42,66905	31,971E-6	6000,47016	-0,00784	0,24828
80	8000	0,400	2,000	800,00E-3	158,32890	0,35637	1,10431	41,25606	36,427E-6	8000,54772	-0,00685	0,20643
100	10000	0,500	2,500	1,250E+0	197,91113	0,44546	1,22404	41,45379	40,377E-6	10000,60526	-0,00605	0,18377
120	12000	0,600	3,000	1,800E+0	237,49336	0,53455	1,36002	48,73013	44,863E-6	12000,59185	-0,00493	0,19319
140	14000	0,700	3,500	2,450E+0	277,07558	0,62364	1,55279	58,75771	51,221E-6	14000,53136	-0,00380	0,21506
160	16000	0,800	4,000	3,200E+0	316,65781	0,71273	1,87534	67,51583	61,861E-6	16000,47319	-0,00296	0,24561

Příloha 5

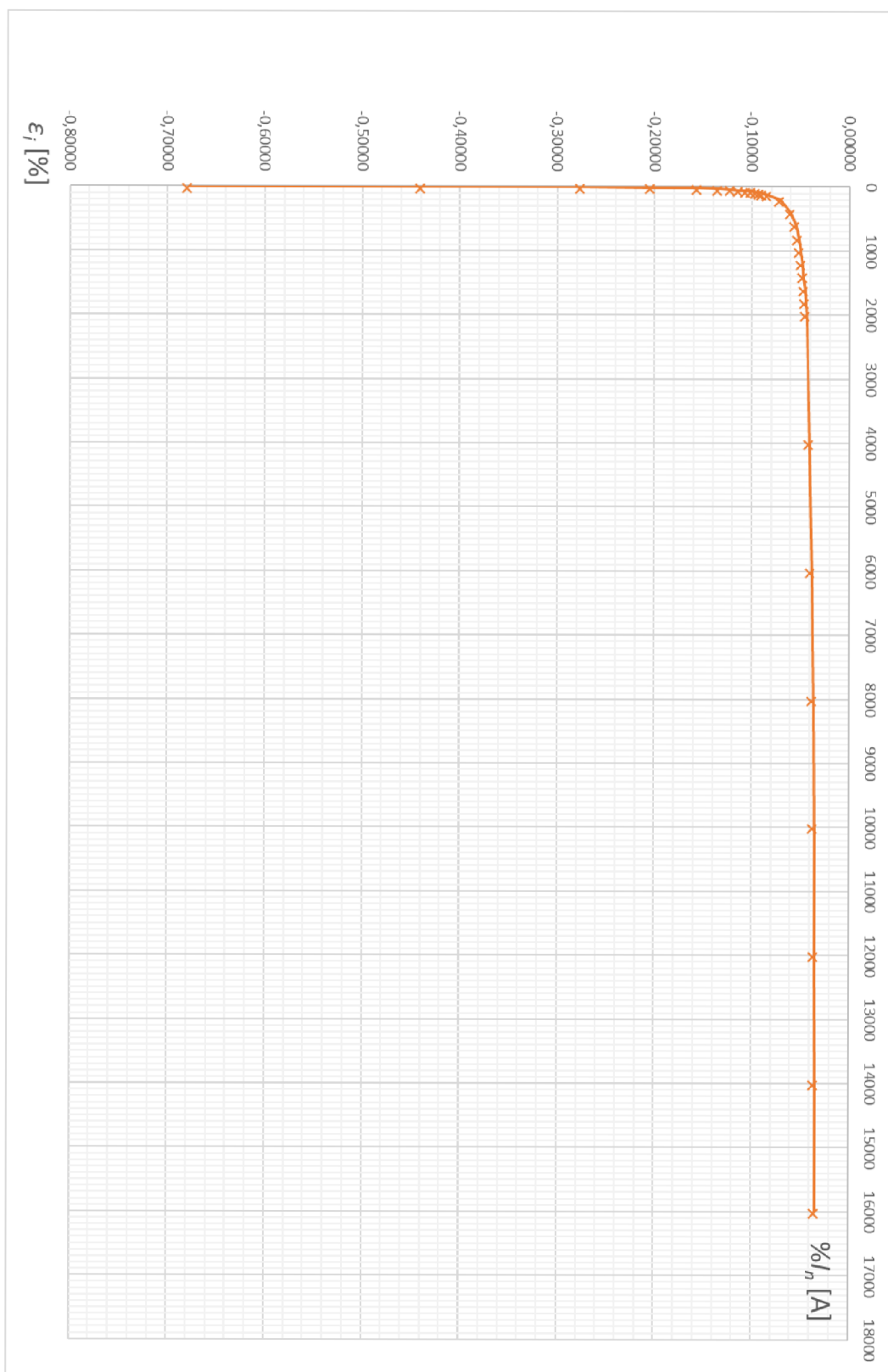
Tabulka 14 P5 Tabulka všech hodnot pro LPCT s SU jádrem.

I_1/I_1 N	I_1	I_2	U_2	P_{ztr}	U_0	B	H	φ_0	I_μ	I_{prim}	ε_i	δ_i
[-]	[A]	[A]	[V]	[W]	[V]	[T]	[A/m]	[°]	[A]	[A]	[%]	[min]
0,01	1	0,00005	0,00025	12,500E-9	0,01979	0,00004	0,06090	81,34857	2,009E-6	1,00683	-0,67807	135,65044
0,02	2	0,0001	0,0005	50,00E-9	0,03958	0,00009	0,07280	80,08856	2,401E-6	2,00882	-0,43928	80,97462
0,05	5	0,00025	0,00125	312,500E-9	0,09896	0,00022	0,10177	78,51590	3,357E-6	5,01380	-0,27522	45,11423
0,1	10	0,0005	0,0025	1,250E-6	0,19791	0,00045	0,13778	77,28986	4,545E-6	10,02039	-0,20350	30,42106
0,2	20	0,001	0,005	5,00E-6	0,39582	0,00089	0,19207	75,97259	6,336E-6	20,03109	-0,15521	21,09832
0,3	30	0,0015	0,0075	11,250E-6	0,59373	0,00134	0,23634	75,17236	7,796E-6	30,04028	-0,13409	17,24947
0,4	40	0,002	0,010	20,00E-6	0,79164	0,00178	0,27484	74,53981	9,066E-6	40,04872	-0,12164	15,00106
0,5	50	0,0025	0,0125	31,250E-6	0,98956	0,00223	0,30864	74,04969	10,181E-6	50,05634	-0,11255	13,44567
0,6	60	0,003	0,015	45,00E-6	1,18747	0,00267	0,33901	73,69629	11,183E-6	60,06317	-0,10517	12,28631
0,7	70	0,0035	0,0175	61,250E-6	1,38538	0,00312	0,36701	73,34290	12,106E-6	70,06979	-0,09960	11,38076
0,8	80	0,004	0,020	80,00E-6	1,58329	0,00356	0,39312	72,98950	12,968E-6	80,07626	-0,09523	10,64737
0,9	90	0,0045	0,0225	101,250E-6	1,78120	0,00401	0,41770	72,63611	13,779E-6	90,08263	-0,09172	10,03715
1	100	0,005	0,025	125,00E-6	1,97911	0,00445	0,44098	72,28271	14,547E-6	100,08892	-0,08884	9,51864
1,2	120	0,006	0,030	180,00E-6	2,37493	0,00535	0,48412	71,69108	15,970E-6	120,10072	-0,08386	8,67939
2	200	0,010	0,050	500,00E-6	3,95822	0,00891	0,62719	70,05180	20,689E-6	200,14155	-0,07072	6,68083
4	400	0,020	0,100	2,00E-3	7,91645	0,01782	0,93427	67,13416	30,819E-6	400,23991	-0,05994	4,87813
6	600	0,030	0,150	4,500E-3	11,87467	0,02673	1,18853	65,23113	39,206E-6	600,32893	-0,05479	4,07711
8	800	0,040	0,200	8,00E-3	15,83289	0,03564	1,41069	63,60373	46,534E-6	800,41419	-0,05175	3,58050
10	1000	0,050	0,250	12,500E-3	19,79111	0,04455	1,61124	61,97633	53,149E-6	1000,49987	-0,04996	3,22422
12	1200	0,060	0,300	18,00E-3	23,74934	0,05345	1,79817	60,66216	59,316E-6	1200,58169	-0,04845	2,96123
14	1400	0,070	0,350	24,500E-3	27,70756	0,06236	1,97641	59,84252	65,195E-6	1400,65551	-0,04680	2,76712
16	1600	0,080	0,400	32,00E-3	31,66578	0,07127	2,14502	59,02288	70,757E-6	1600,72883	-0,04553	2,60571
18	1800	0,090	0,450	40,500E-3	35,62400	0,08018	2,30565	58,20324	76,056E-6	1800,80195	-0,04453	2,46803
20	2000	0,100	0,500	50,00E-3	39,58223	0,08909	2,45950	57,38360	81,131E-6	2000,87508	-0,04373	2,34821
40	4000	0,200	1,000	200,00E-3	79,16445	0,17818	3,94120	51,61086	130,007E-6	4001,61521	-0,04036	1,75085
60	6000	0,300	1,500	450,00E-3	118,74668	0,26727	5,23878	48,61721	172,810E-6	6002,28541	-0,03808	1,48524
80	8000	0,400	2,000	800,00E-3	158,32890	0,35637	6,41706	46,41517	211,678E-6	8002,91932	-0,03648	1,31729
100	10000	0,500	2,500	1,250E+0	197,91113	0,44546	7,51063	44,21313	247,751E-6	10003,55211	-0,03551	1,18742
120	12000	0,600	3,000	1,800E+0	237,49336	0,53455	8,54111	42,01109	281,743E-6	12004,18738	-0,03488	1,08001
140	14000	0,700	3,500	2,450E+0	277,07558	0,62364	9,52192	39,80905	314,097E-6	14004,82625	-0,03446	0,98725
160	16000	0,800	4,000	3,200E+0	316,65781	0,71273	10,46213	37,60701	345,111E-6	16005,46860	-0,03417	0,90468

Příloha 6

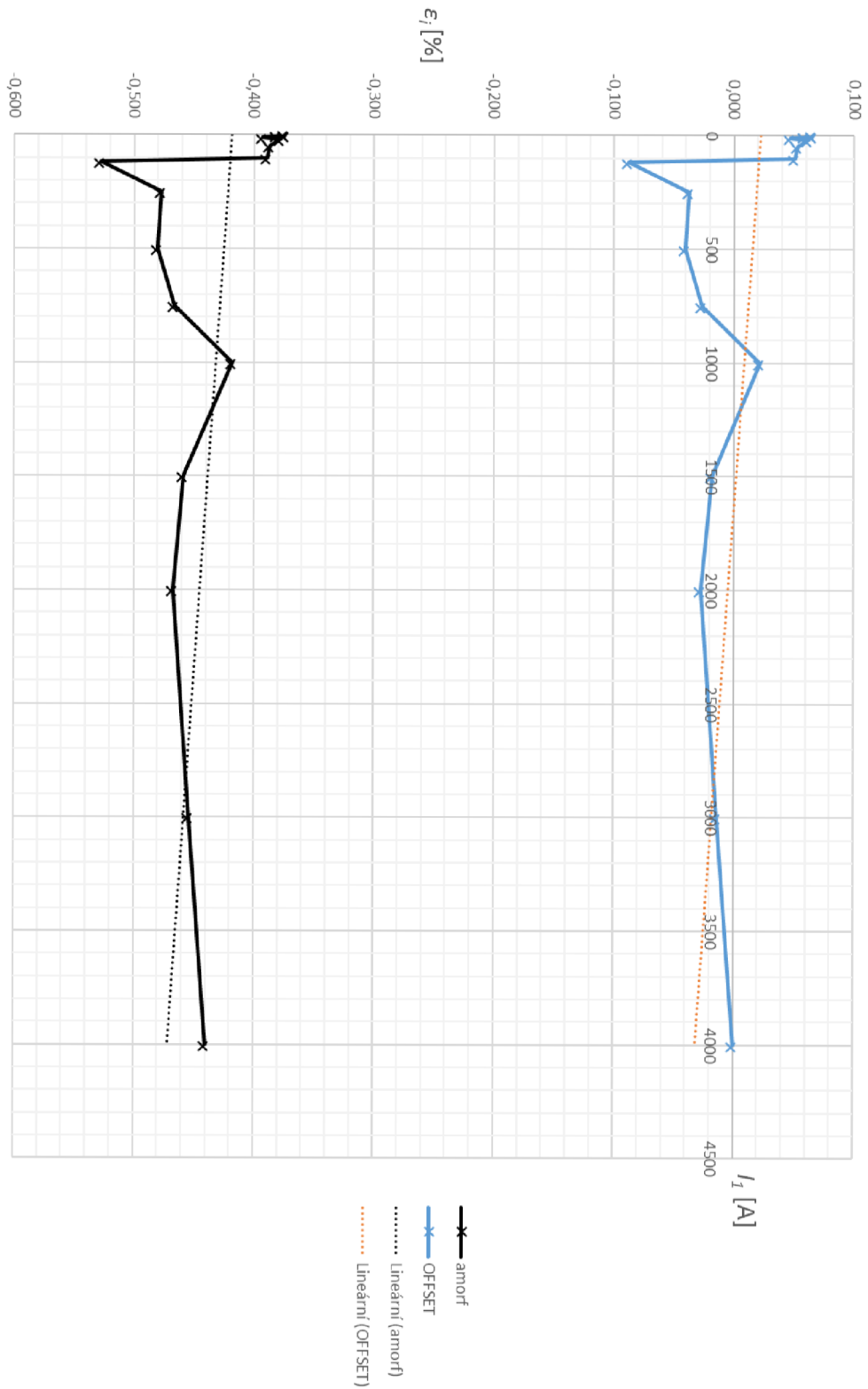


Obr. 53 P6 Závislost celkové chyby proudu pro LPCT s amorfním jádrem na primárním proudu v celém rozsahu.



Obr. 54 P6 Závislost celkové chyby proudu pro LPCT s SU jádrem na primárním proudu v celém rozsahu.

Příloha 7

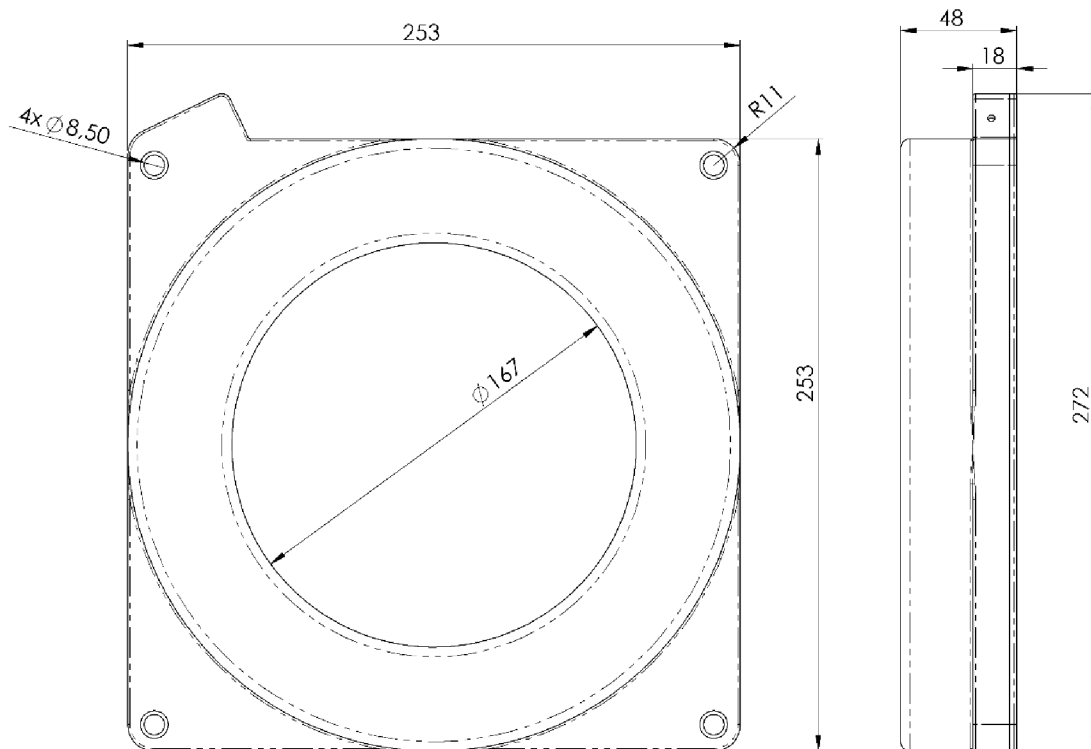


Obr. 55 P7 Závislost naměřené chyby proudu LPCT s amorfem před a po offsetu na primárním proudu v celém rozsahu.



Obr. 56 P7 Závislost naměřené chyby proudu LPCT s SU před a po offsetu na primárním proudu v celém rozsahu.

Příloha 8



Obr. 57 P8 Celkové rozměry LPCT s krytem.