

# **Návrh laboratorního stanoviště pro testování přístrojů pro měření proudů**

Design of a laboratory station for testing current measuring instruments

**Bc. Adam Pavlík**

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Lukáš Prokop, Ph.D.

Ostrava, 2022

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Adam Pavlík**

Studijní program: N0713A060003 Elektroenergetika

Téma: **Návrh laboratorního stanoviště pro testování přístrojů pro měření proudů**  
**Design of a laboratory station for testing current measuring instruments**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický úvod - rozbor možností měření elektrického proudu, popis principu vybraných možností, analýza vlastností
2. Návrh základního zapojení a konstrukčních částí laboratorní úlohy.
3. Praktická realizace laboratorní úlohy
4. Zpracování dokumentace k laboratorní úloze – vzorový laboratorní protokol
5. Závěr a vyhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KOPEČEK, Jan a Miloš DVORÁK. Přístrojové transformátory (měřicí a jisticí). Vyd. 1. Praha: Academia, 1966.
- [2] KRÁL, Josef a Jaromír VANĚK. Elektromagnetické přístroje. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1984.
- [3] HAPL, Josef a Karel NOSEK. Stavba transformátorů. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1971.
- [4] ČSN EN 61869-1 Přístrojové transformátory - Část 1: Všeobecné požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [5] ČSN EN 61869-2 Přístrojové transformátory - Část 2: Dodatečné požadavky na transformátory proudu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [6] ČSN EN IEC 61869-10 Přístrojové transformátory - Část 10: Dodatečné požadavky pro pasivní transformátory proudu nízkého výkonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [7] ČSN EN 13150 Pracovní stoly pro laboratoře ve vzdělávacích institucích - Rozměry, požadavky na bezpečnost a trvanlivost a zkušební metody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Lukáš Prokop, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2021

Datum odevzdání: 30.04.2022

---

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry

---

prof. Ing. Jan Platoš, Ph.D.  
děkan fakulty

**Abstrakt:**

Tato práce se zabývá porovnáním odlišných vlastností měření proudu přístrojového transformátoru proudu a senzoru proudu na principu Rogowského cívky, které jsou demonstrovány prostřednictvím laboratorní úlohy v laboratořích Vysoké školy Báňské - TUO. V teoretické části této práce je popsáno základní rozdělení a analýza vlastností vybraných přístrojů proudu. V teorii jsou také vysvětleny normalizované třídy přesnosti a základní definice týkající se přístrojů proudu. Praktická část je zaměřena na návrh základního zapojení laboratorní úlohy a její konstrukční části. Dále obsahuje referenční měření spolu s praktickou realizací laboratorní úlohy. V praktické části je popsáno vytvoření všech potřebných pomůcek pro měření na přístrojovém transformátoru proudu a senzoru proudu. Součástí praktické části je popsán podrobný návod měření s vypracovaným vzorovým protokolem dle textového zadání. V příloze jsou k dispozici všechny potřebné materiály pro zavedení do výuky.

**Klíčová slova:**

Přístrojový transformátor proudu, měřicí transformátor proudu, senzor proudu, Rogowského cívky, třída přesnosti, měření proudu, laboratorní úloha, návod měření, protokol

**Abstract:**

This thesis deals with the comparison of the different characteristics of current measurement of an instrumented current transformer and a Rogowski coil current sensor, which are demonstrated through a laboratory task in the laboratories of the University of Mining - TUO. In the theoretical part of this thesis, the basic distribution and analysis of the properties of the selected current instruments are described. The theory also explains the standardized accuracy classes and basic definitions related to current instruments. The practical part focuses on the design of the basic circuit of the laboratory task and its design part. It also includes reference measurements along with the practical implementation of the laboratory task. The practical part describes the creation of all the necessary instruments for measurements on the instrumented current transformer and current sensor. The practical part describes detailed measurement instructions with a sample protocol according to the text assignment. In the appendix, all the necessary materials for introduction into the classroom are provided.

**Key words:**

instrument current transformer, measuring current transformer, current sensor, Rogowski coil, accuracy class, current measurement, laboratory task, instructions for laboratory task, protocol

**Poděkování:**

Tímto bych rád poděkoval panu doc. Ing. Lukáši Prokopovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a cenné rady, které mi pomohli při vypracování diplomové práce. Poděkování také patří všem, kteří mi pomohli a podporovali mě při realizaci diplomové práce.

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek.....	
Seznam ilustrací.....	
Seznam tabulek .....	
Úvod .....	1
1 Přístrojové transformátory proudu .....	2
1.1 Rozdělení .....	2
1.2 Základní parametry.....	3
1.2.1 Všeobecné definice .....	3
1.2.2 Definice týkající se proudových hodnot .....	3
1.2.3 Definice týkající se přesnosti .....	4
1.2.4 Definice týkající se jiných veličin.....	5
1.3 Normalizované třídy přesnosti a tabulka dovolených chyb .....	5
1.3.1 Měřicí transformátor proudu .....	5
1.3.2 Jisticí transformátory proudu .....	7
1.4 Princip činnosti přístrojového transformátoru proudu .....	7
1.4.1 Teorie přístrojových transformátorů.....	8
1.4.2 Fázorový diagram .....	9
1.4.3 Komplexní diagram chyb .....	10
1.5 Analýza vlastností přístrojového transformátoru .....	11
1.5.1 Závislost na proudu .....	11
1.5.2 Závislost na břemeni.....	12
1.5.3 Závislost na sekundárním účinníku.....	12
1.5.4 Závislost na kmitočtu .....	12
2 Senzory proudu .....	13
2.1 Senzor proudu na principu Rogowského cívky.....	13
2.1.1 Princip činnosti Rogowského cívky .....	13
2.1.2 Chování Rogowského cívky v režimech nakrátko a naprázdno .....	14
2.2 Normalizované třídy přesnosti a tabulka dovolených chyb .....	14
2.2.1 Definice týkající se přesnosti .....	15
2.2.2 Měřicí transformátory proudu malého výkonu.....	15
2.2.3 Jisticí transformátory proudu malého výkonu .....	16
2.2.4 Účinky umístění primárního vodiče na přesnost.....	17

2.3	Provedení Rogowského cívky .....	19
2.3.1	Pevné provedení Rogowského cívky .....	19
2.3.2	Pružné provedení Rogowského cívky .....	20
2.3.3	PCB provedení Rogowského cívky .....	20
2.4	Analýza vlastností senzoru proudu.....	21
2.4.1	Lineární měřicí rozsah.....	21
2.4.2	Kmitočtový rozsah .....	22
2.4.3	Přesnost měření .....	22
2.4.4	Teplotní závislost .....	22
2.4.5	Výstupní signál.....	23
2.4.6	Elektromagnetická kompatibilita .....	23
3	Návrh zapojení a konstrukční části laboratorní úlohy .....	24
3.1	Zapojení laboratorní úlohy .....	24
3.2	Vytvoření břemene transformátoru proudu .....	26
3.3	Vytvoření pomůcek pro měření na senzor proudu .....	27
3.3.1	Adaptér pro senzor proudu .....	28
3.3.2	Polohový nástavec pro uchycení primárního vodiče.....	28
3.4	Návrh laboratorního stanoviště .....	30
4	Praktická realizace laboratorní úlohy .....	31
4.1	Referenční měření .....	31
4.2	Laboratorní měření.....	34
5	Vypracování návodu měření a vzorového protokolu .....	38
5.1	Návod k měření .....	38
5.1.1	Zapojení laboratorní úlohy a ovládání proudového zdroje .....	38
5.1.2	Nastavení břemene přístrojového transformátoru proudu .....	40
5.1.3	Nastavení polohového nástavce senzoru proudu .....	41
5.1.4	Podrobný postup měření.....	42
5.2	Vzorový protokol .....	44
5.2.1	Zadání .....	44
5.2.2	Schéma zapojení.....	44
5.2.3	Postup měření .....	45
5.2.4	Tabulky naměřených a vypočtených hodnot .....	46
5.2.5	Grafické vyhodnocení.....	48

5.2.6	Seznam použitých přístrojů .....	50
5.2.7	Kontrolní otázky.....	50
5.2.8	Vyhodnocení laboratorní úlohy.....	51
	Závěr .....	52
	Literatura .....	
	Seznam příloh .....	

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Význam	Jednotka
B	Magnetická indukce	T
$d_{\max}$	Maximální rozměr od primárního vodiče k oknu senzoru proudu	mm
$d_{\min}$	Minimální rozměr od primárního vodiče k oknu senzoru proudu	mm
$f_R$	Jmenovitý kmitočet	Hz
FS	Nadproudové číslo	(-)
H	Intenzita magnetické indukce	A/m
$I_p, I_1, i_p$	Skutečný primární proud	A
$I_{10}$	Budící proud	A
$I_{1fe}$	Proud na krytí ztrát v železe	A
$I_{1m}$	Magnetizační proud	A
$I_{pr}, I_{1n}$	Jmenovitý primární proud	A
$i_{2,K}$	Sekundární proud nezatížený chybou proudu $-i_{\mu}$	A
$i(t)$	Okamžitá hodnota proudu	A
$I_2'$	Přepočtený primární proudu na sekundární stranu	A
$I_{20}$	Celková chyba proudu přepočítaná na počet sekundárních závitů	A
$I_{2fe}$	Proud na krytí ztrát v železe přepočtený na sekundární vinutí	A
$I_{2m}$	Magnetizační proud přepočtený na sekundární stranu	A
$I_{cth}$	Jmenovitý trvalý tepelný proud	A
$I_{dyn}$	Jmenovitý dynamický proud	A
$I_{PL}$	Jmenovitý primární nadproud	A
$I_s, I_2$	Skutečný sekundární proud	A
$I_{sr}, I_{2n}$	Jmenovitý sekundární proud	A
$I_{th}$	Jmenovitý krátkodobý tepelný proud	A
$i_{\mu}$	Magnetizační proud	A
$K_{pcr}$	Jmenovitý činitel zvýšeného primárního proudu	(-)
$K_R$	Jmenovitý převod transformátoru (senzor proudu)	(-)
$k_r$	Jmenovitý převod transformátoru	(-)
$k_x$	Konstanta pro výpočet vstupní indukčnosti	(-)
k	Skutečný převod	(-)
$L_1$	Primární indukčnost	H
$L_2$	Sekundární indukčnost	H
$L_{vst}$	Vstupní indukčnost obvodu	H
L	Indukčnost	H
$N_1$	počet závitů primárního vinutí	(-)
$N_2$	počet závitů sekundárního vinutí	(-)
N	počet závitů cívky	(-)
$P_n$	Jmenovitá zátěž transformátorů proudu	V·A
$R_1$	Odpor primárního vinutí	$\Omega$
$R_2$	Odpor sekundárního vinutí	$\Omega$
$R_2'$	Přepočtený odpor sekundární vinutí na primární stranu	$\Omega$
$R_b$	Činný odpor břemene	$\Omega$
$R_{ob}$	Odpor odporového bočnicku	$\Omega$



$R_{tr100\%}$	Odpor stoprocentního břemene	$\Omega$
$R_{tr25\%}$	Odpor dvacetiprocentního břemene	$\Omega$
$R_{tr50\%}$	Odpor padesátiprocentního břemene	$\Omega$
$R_{tr75\%}$	Odpor sedmdesátiprocentního břemene	$\Omega$
$S_R$	Jmenovitý zdánlivý výkon	VA
$S$	Plocha závitů	mm <sup>2</sup>
$t_{dr}$	Jmenovité zpoždění	s
$t$	Okamžitá hodnota času	s
$T$	Trvání jednoho cyklu	s
$u_1$	Okamžitá hodnota primárního napětí	V
$U_1$	Primární napětí	V
$U_{10}$	Indukované napětí	V
$u_2$	Okamžitá hodnota sekundárního napětí	V
$U_2$	Sekundární napětí	V
$U_2'$	Přepočtené sekundární napětí na primární stranu	V
$U_{20}$	Indukované napětí	V
$U_m$	Nejvyšší napětí pro zařízení	V
$u_s$	Sekundární napětí	V
$U_{sp}$	Výstupní napětí Rogowského cívky	V
$U_{sys}$	Nejvyšší napětí elektrické sítě	V
$X_2$	Rozptylová reaktance sekundárního vinutí	$\Omega$
$X_2'$	Rozptylová přepočtená reaktance sekundární vinutí na primární stranu	$\Omega$
$X_m$	Magnetizační reaktance	$\Omega$
$X_p$	Efektivní hodnota primární veličiny	
$Y_s$	Efektivní hodnota sekundární veličiny	
$Z, Z_b$	Vnější břemeno	$\Omega$
$Z_n$	Jmenovité břemeno transformátoru	$\Omega$
$\delta_i, \delta$	Staré značení chyby úhlu	'
$\varepsilon_c$	Celková chyba	%
$\varepsilon_i, \varepsilon$	Chyba převodu (chyba proudu)	%
$\mu_0$	Permeabilita vakua	H/m
$\mu_r$	Relativní permeabilita	H/m
$\varphi_e$	Fázová chyba	'
$\varphi_{or}$	Jmenovitá fázová odchylka	'
$X_1$	Rozptylová reaktance primárního vinutí	$\Omega$
$\Delta U_{R_{tp}}$	Úbytek napětí na břemenu přístrojového transformátoru proudu	V
$\Delta U_1$	Úbytek napětí na primárním vinutí	V
$\Delta U_2$	Úbytek napětí na sekundárním vinutí	V
$\Delta U_R$	Úbytek napětí na odporovém bočniku	V
$\Delta I$	celková chyba zobrazující na vektoru	A
$\Delta \varphi$	Chyba úhlu	'
$i(t)$	Okamžitá hodnota proudu	A
$u(t)$	Okamžitá hodnota napětí	V
$\beta$	Úhel mezi proudem $I_2$ a napětím $U_2$	°
P1, P2	Svorky primárního vinutí	

S1, S2 Svorky sekundárního vinutí

**Zkratky**

LPPCT Low power passive current transformer (pasivní transformátor proudu malého výkonu)

LPCT Low power current transformer (transformátory proudu malého výkonu)

nn Nízké napětí

PCB Printed Circuit Boards

PF position factor

PLA polylactic acid

vvv Velmi vysoké napětí

## Seznam ilustrací

Obr. 1 Nadproudová charakteristika, 1 – tvar charakteristiky pro měření, 2 – tvar charakteristiky pro jištění [9].....	7
Tab 2 Náhradní schéma transformátoru [12].....	9
Obr. 3 Fázorový diagram přístrojového transformátoru proudu [12] .....	9
Obr. 4 Magnetizační charakteristika vzduchu a feromagnetika (upraveno) [14] .....	10
Obr. 5 Komplexní diagram chyb přístrojového transformátoru proudu [12] .....	11
Obr. 6 Magnetizační charakteristika vlevo a budící charakteristika $I_{20} = fU_{20}$ vpravo (upraveno) [2] .....	12
Obr. 7 Obvodový model transformátoru proudu zatíženého bočnickem $R_b$ (upraveno) [16].....	14
Obr. 8 Ukázka štítků senzoru proudu (vlevo staré značení, vpravo nové značení) [25] .....	17
Obr. 9 Ukázka polohy vodiče a měřicího okna LPCT (upraveno) [21] .....	18
Obr. 10 a) Senzor proudu s pevnou konstrukcí [26], b) Senzor proudu s pružnou (flexibilní) konstrukcí [27], c) Senzor proudu s rozdělitelnou (split-core) konstrukcí [28]. .....	19
Obr. 11 Ukázka pevného provedení Rogowského cívky [31] .....	20
Obr. 12 Ukázka pružného provedení Rogowského cívky (upraveno) [32] .....	20
Obr. 13 Ukázka PCB provedení Rogowského cívky [39] .....	21
Obr. 14 Sériové zapojení PCB Rogowského cívek [33] .....	21
Obr. 15 Porovnání výstupního signálu senzoru proudu a přístrojové transformátoru proudu (upraveno) [25] .....	21
Obr. 16 Frekvenční závislost Rogowského cívky na různé vstupní kapacity měřicího zařízení [35] .....	22
Obr. 17 Princip dvou vodičového smyčkového vinutí Rogowského cívky [36] .....	23
Obr. 18 Skutečné zapojení laboratorní úlohy.....	24
Obr. 19 Odporový bočník použitý pro laboratorním měření .....	25
Obr. 20 Přístrojový transformátor proudu použitý pro laboratorním měření [38].....	25
Obr. 21 Senzor proudu použitý pro laboratorním měření .....	26
Obr. 22 Měřicí karta použitá pro laboratorním měření .....	26
Obr. 23 Břemeno přístrojového transformátoru proudu použité pro laboratorním měření .....	27
Obr. 24 Konektory senzorů proudu, vlevo konektor dle staré normy, vpravo konektor dle nové normy. [25] .....	28
Obr. 25 Ukázka polohového nástavce, a) nástavce na senzor proudu, b) nástavec na primární vodič .....	29
Obr. 26 Návrh laboratorního stanoviště .....	30
Obr. 27 Detail laboratorního stanoviště (detail přístrojů proudu).....	30
Obr. 28 Schéma zapojení referenčního měření .....	31
Obr. 29 Chyba převodu transformátoru proudu použitým při referenčního měření .....	32
Obr. 30 Chyba úhlu přístrojového transformátoru proudu použitým při referenčního měření.....	33
Obr. 31 Nadproudová charakteristika přístrojového transformátoru použitým při referenčního měření .....	34
Obr. 32 Popis jednofázového proudového zdroje napětí a proudu.....	38
Obr. 33 Popis zapojení přístrojů proudu .....	39
Obr. 34 3D model břemene přístrojového transformátoru proudu .....	40
Obr. 35 Umístění senzoru proudu a primárního vodiče pro a) PF = 0 b) PF = 0,5 c) PF = 1 .....	41

Obr. 36 Umístění senzoru proudu a primárního vodiče pro a) úhel = 10° b) úhel = 30° c) úhel = 70°..	41
Obr. 37 Schéma zapojení laboratorní úlohy.....	44
Obr. 38 Grafické porovnání chyb převodu transformátoru proudu a senzoru proudu .....	48
Obr. 39 Grafické porovnání chyb převodu transformátoru proudu pro zadané hodnoty břemene ....	48
Obr. 40 Grafické porovnání chyb převodu pro zadané polohy senzoru proudu vůči primárnímu vodiči .....	49
Obr. 41 Nadproudová charakteristika transformátoru proudu a senzoru proudu .....	49

## Seznam tabulek

Tab. 1 Dovolené chyby převodu a chyby úhlu měřících transformátorů proudu (pro třídy přesnosti od 0,1 do 1) [4] .....	6
Tab. 2 Dovolené chyby převodu a chyby úhlu měřících transformátorů proudu (pro třídy přesnosti 0,2S a 0,5S) [4].....	6
Tab. 3 Dovolené chyby převodu a chyby úhlu měřících transformátorů proudu (pro třídy přesnosti 3 a 5) [4].....	6
Tab. 4 Dovolené chyby jisticích transformátorů proudu [4] .....	7
Tab. 5 Dovolené chyby převodu a chyby fáze měřících pasivních transformátorů proudu malého výkonu [22] .....	16
Tab. 6 Dovolené chyby měřících pasivních transformátorů proudu malého výkonu [22] .....	17
Tab. 7 Rozšířené značení třídy přesnosti u transformátoru proudu malého výkonu [22] .....	17
Tab. 8 Tabulka naměřených hodnot pro první měření .....	35
Tab. 9 Tabulka naměřených hodnot pro druhé měření .....	35
Tab. 10 Tabulka naměřených hodnot pro třetí měření .....	36
Tab. 11 Tabulka naměřených hodnot pro čtvrté měření .....	36
Tab. 12 Tabulka naměřených hodnot pro páté a šesté měření .....	37
Tab. 13 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot přístrojového transformátoru proudu .....	46
Tab. 14 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot senzoru proudu .....	47

# Úvod

Přístroje proudu představují nedílnou součástí elektrizační soustavy. Používají se pro měření, jištění a regulaci soustavy. Důležitou vlastností přístrojů proudu je galvanické oddělení měřené části obvodu od obvodů měřicích a jisticích systémů, což vede ke zvýšení bezpečnosti obsluhy. Na měřicích přístrojích pak stojí samotné fungování ekonomiky prodeje elektrické energie. Použití může být různé, u blokových transformátorů elektráren, v přenosových soustavách na hladině vvn, i v elektroměrech na hladině nn. Prakticky jsou součástí elektrizační soustavy od výroby, až po konečnou spotřebu elektrické energie. Jisticí přístroje proudu jsou nepostradatelnou součástí ochran v elektrizační soustavě. Jejich použití je např. pro ochranu generátorů v elektrárnách, výkonových transformátorů v soustavě, nebo pro ochranu elektrického vedení. Jisticí přístroje proudu musí zajišťovat přesný přenos informací o proudech i při velkých nadproudech nebo v případě zkratových proudů.

Přístrojové transformátory proudu jsou pro své vlastnosti nejčastěji používaným přístrojem proudu v elektrizační soustavě. Konstrukce přístrojového transformátoru může obsahovat několik samostatných sekundárních vinutí, např. pro měřicí systémy a pro jisticí systémy. Nejlepší vlastností transformátorů proudu je vysoká přesnost, která se využívá např. pro fakturační měření proudu.

Senzory proudu na principu Rogowského cívky jsou taktéž hojně používány v elektrizační soustavě. Vlastnosti, kterými senzory proudu vyniká oproti transformátorech proudu, je funkčnost i ve vysokých nadproudových oblastí, široký rozsah měření proudu a snadná aplikace. Taktéž rozměry a náklady na pořízení jsou nižší. V současnosti senzory proudu nedosahují takové přesnosti, např. výrobce ABB u senzoru proudu KECA 80 C85 udává třídu přesnosti 0,5.

Tato práce je zaměřená na porovnání odlišných vlastností měření proudu přístrojového transformátoru proudu a senzoru proudu na principu Rogowského cívky, které jsou demonstrovány prostřednictvím laboratorní úlohy. Laboratorní měření převážně cílí na studenty prvního ročníku magisterského studia se zaměřením na stroje a přístroje. Laboratorní úloha je měřena v prostorách laboratoří Vysoké školy Báňské – TUO, kde se nachází jednofázový zdroj proudu, který lze použít pro měření přístrojů proudu. Cílem práce je prostřednictvím laboratorní úlohy demonstrovat odlišné vlastnosti obou způsobů měření. Seznámení studentů s klasickými přístroji proudu, jako jsou přístrojové transformátory proudu, ale i novými přístroji proudu jako, jsou senzory proudu. Dále jsou studenti seznamováni s měřením a vyhodnocováním chyb přístrojů proudu.

# 1 Přístrojové transformátory proudu

Přístrojové transformátory proudu jsou definovány jako netočivé elektromagnetické stroje, které mají za účel snížit proud na odpovídající hodnotu v rozsahu měřicích, jisticích přístrojů. Dále oddělují napěťovou hladinu vvn od napěťové hladiny nn. Toto oddělení napěťových hladin oddaluje jisticí a měřicí přístroje od působení elektrických a magnetických polí, které by měly nepříznivé následky na funkci. [1; 2]

## 1.1 Rozdělení

Přístrojové transformátory můžeme dělit do několik skupin, a to podle tvaru a umístění vodičů, podle primárního vinutí a podle způsobu izolace. Můžou být dále rozděleny podle funkce na přístrojové transformátory měřicí, a na přístrojové transformátory jisticí. Nejčastěji se setkáváme s přístrojovými transformátory proudu, které plní obě ze zmiňovaných funkcí (měřicí i jisticí). [1]

- a) Rozdělení podle tvaru a umístění vodičů
  - transformátory podpěrné
  - transformátory průchozí
  - transformátory průchodkové
- b) Rozdělení podle provedení primárního vinutí
  - jednozávitové
  - závitové
  - smyčkové
  - tyčové
  - násuvné
  - prstencové
- c) podle jiných hledisek
  - jednojádrové
  - vícejádrové
  - s rozebíratelným magnetickým obvodem
  - s několika sekundárními výstupy
  - kaskádové
  - sčítací
- d) podle funkce
  - transformátory jisticí
  - transformátory měřicí
- e) podle materiálu izolace
  - epoxidové
  - vzduchové
  - olejové

Dále můžeme přístrojové transformátory dělit podle umístění, transformátory pro vnitřní montáž a transformátory pro venkovní montáž. [2]

## 1.2 Základní parametry

Pro účely popisu přístrojových transformátorů proudu je nezbytné si určit důležité pojmy a definice, které charakterizují základní veličiny a vlastnosti.

### 1.2.1 Všeobecné definice

**Přístrojový transformátor** – transformátor určený k přenosu informačního signálu do měřicích přístrojů, elektroměrů a ochranných nebo ovládacích zařízení nebo podobných přístrojů. [3]

**Transformátor proudu** – přístrojový transformátor jehož sekundární proud za normálních provozních podmínek, je v podstatě úměrný primárnímu proudu a fázově se od něj liší o úhel, který je přibližně nulový při vhodném způsobu zapojení. [4]

**Měřicí transformátor proudu** – transformátor proudu určený k přenášení informačního signálu k měřicím přístrojům a elektroměrům. [4]

**Jisticí transformátor proudu** – transformátor proudu určený k přenosu informačního signálu do ochranných a ovládacích zařízení. [4]

**Kryt** – pouzdro poskytující typ a stupeň ochrany vhodný pro dané použití. [3]

**Primární svorky** – svorky, na které se aplikuje napětí nebo proud, které mají být transformovány. [3]

**Sekundární svorky** – svorky, které přenášejí informační signál do měřicích přístrojů, elektroměrů a ochranných nebo ovládacích zařízení nebo podobných přístrojů. [3]

**Sekundární obvod** – vnější obvod, který získává informační signály ze sekundárních svorek přístrojového transformátoru. [3]

### 1.2.2 Definice týkající se proudových hodnot

**Jmenovitý primární proud ( $I_{pr}$ )** – hodnota primárního proudu, na které je založena jeho činnost transformátoru. Standardizované hodnoty primárního proudu jsou 10 – 12,5 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75 A, a jejich dekadické násobky nebo zlomky. Podtržené hodnoty jsou preferovány. [4] Jedná se o efektivní hodnotu primárního proudu, tento parametr je nutný pro konstrukci daného transformátoru. Hodnota je uvedena na štítku. [2]

**Jmenovitý sekundární proud ( $I_{sr}$ )** – hodnota sekundárního proudu, na které je založena jeho činnost transformátoru. Standardizované hodnoty sekundárního proudu jsou 1 A a 5 A. [4] Sekundární proud 1 A se používá u transformátorů malého výkonu, tj. když primární proud dosahuje do 200 A. Hodnota sekundárního proudu 1 A se také doporučuje při dlouhých přívodech k měřicím, či jisticím přístrojům, vedení proudu 5 A způsobuje vznik přídavné zátěže, která by měla negativní dopad na přesnost. [5]

**Jmenovitý krátkodobý tepelný proud ( $I_{th}$ )** – maximální efektivní hodnota primárního proudu, kterou transformátor vydrží za specifikovanou krátkou dobu, aniž by došlo k poškození, přičemž je sekundární vinutí zkratováno. [4] Jeho hodnota se ověřuje typovou zkouškou nebo výpočtem. Jmenovitý krátkodobý proud je uvedený na štítku proudového transformátoru, bývá zde napsána i doba po kterou byl transformátor zkoušen. [5; 6]



**Jmenovitý dynamický proud** ( $I_{dyn}$ ) – vrcholová hodnota primárního proudu, kterou transformátor vydrží bez elektrického nebo mechanického poškození elektrodynamickými silami, přičemž je sekundární vinutí zkratováno. [4] Jedná se o vrcholovou hodnotu zpravidla první amplitudy primárního proudu. Jmenovitý dynamický proud je jedna ze dvou hodnot, ze které se určuje vnitřní zkratovou odolnost transformátoru. Další hodnotou je, buď jmenovitý tepelný proud, nebo zkratová třída. [5]

**Jmenovitý trvalý tepelný proud** ( $I_{cth}$ ) – hodnota proudu, která může trvale protékat primárním vinutím, aniž by došlo k překročení předepsané hodnoty oteplení, přičemž je k sekundárnímu vinutí připojeno jmenovité břemeno. [4]

**Jmenovitý primární nadproud** ( $I_{PL}$ ) – hodnota minimálního primárního proudu, při které je celková chyba měřicího transformátoru proudu rovna nebo menší než 10 %, přičemž je k sekundárnímu vinutí připojeno jmenovité břemeno (přičemž připojené břemeno je rovno jmenovitému břemenu). [4]

### 1.2.3 Definice týkající se přesnosti

**Skutečný převod** ( $k$ ) – poměr skutečného primárního proudu nebo napětí ke skutečnému sekundárnímu proudu nebo napětí. [3]

**Jmenovitý převod transformátoru** ( $k_r$ ) – poměr jmenovitého primárního proudu nebo napětí ke jmenovitému sekundárnímu proudu nebo napětí. [3] Tato hodnota je důležitá pro výpočet chyby převodu a je dána vzorcem: [5]

$$k_r = \frac{I_{pr}}{I_{sr}} \quad (-; A)$$

**Chyba převodu** ( $\varepsilon$ ) – chyba, kterou přístrojový transformátor vnáší do měření a která vyplývá z faktu, že skutečný převod není roven jmenovitému převodu. Chyba převodu je vyjádřena v procentech a je dána vzorcem: [3; 4]

$$\varepsilon = \frac{k_r I_s - I_p}{I_p} \cdot 100 \quad (\%, A)$$

**Chyba úhlu** ( $\Delta\varphi$ ) – fázový rozdíl mezi fázory primárního napětí nebo proudu a sekundárního napětí nebo proudu; orientace fázorů je volena tak, že u ideálního transformátoru je chyba úhlu nulová. [3]

Chyba úhlu se považuje za kladnou, jestliže fázor sekundárního napětí nebo proudu předchází fázor primárního napětí nebo proudu. Obvykle bývá vyjádřena v úhlových minutách nebo centiradiánech. [3]

Tato definice platí pouze pro napětí nebo proud sinusového průběhu. [3]

**Třída přesnosti** – označení přiřazené přístrojovému transformátoru, jehož chyba převodu a chyba úhlu nepřekročí dovolené hodnoty za předepsaných provozních podmínek. [3] Normalizované třídy přesnosti a dovolené chyby převodu nebo chyby úhlu budou obsaženy v kapitole níže.

**Břemeno** – admitance (nebo impedance) sekundárního obvodu, vyjádřená v siemensech (nebo ohmech) a účinník. [3]

**Jmenovité břemeno** – hodnota zátěže, ze které jsou odvozeny požadavky na předepsanou přesnost. [3]

**Jmenovitý zdánlivý výkon ( $S_r$ )** – hodnota zdánlivého výkonu (ve voltampérech při daném účinníku), který transformátor přenáší do sekundárního obvodu při jmenovitém sekundárním napětí nebo proudu a připojeném jmenovitém břemeni. [3] Hodnota jmenovitého výkonu přístrojového transformátoru je uvedena na štítku zařízení a vypočítá se podle rovnice: [2]

$$S_r = Z_n \cdot I_{sr}^2 \quad (V \cdot A, \Omega, A)$$

#### 1.2.4 Definice týkajících se jiných veličin

**Jmenovitý kmitočet ( $f_R$ )** – hodnota kmitočtu, ze které jsou odvozeny požadavky této normy. [3]

**Nejvyšší napětí pro zařízení ( $U_m$ )** – nejvyšší efektivní hodnota sdruženého napětí, na kterou je zařízení navrženo, pokud se týká izolace, jakož i jiných charakteristik, které případně s tímto napětím souvisejí, podle příslušných norem zařízení. [3]

**Nejvyšší napětí elektrické sítě ( $U_{sys}$ )** – nejvyšší hodnota provozního napětí mezi fázemi (efektivní hodnota), která může nastat při normálním provozu v libovolném okamžiku a v libovolném místě sítě. [3]

**Nadproudové číslo (FS)** – poměr jmenovitého primárního nadproudu ke jmenovitému primárnímu proudu [4; 7]

### 1.3 Normalizované třídy přesnosti a tabulka dovolených chyb

Normalizované třídy přesnosti označují nejvyšší dovolenou chybu (v procentech) přiděleného přístrojového transformátoru proudu při daném jmenovitém primárním proudu. [2]

#### 1.3.1 Měřicí transformátor proudu

Dle normy ČSN EN 61869-2 jsou třídy přesnosti u měřicích transformátorů proudu:

$$0,1 - 0,2 - 0,2S - 0,5 - 0,5S - 1 - 3 - 5 \quad [4]$$

Použití jednotlivých tříd přesnosti u měřicích transformátorů proudu jsou: 0,1 – přesná laboratorní měření, 0,2 – laboratorní měření, 0,2S – laboratorní měření s rozšířeným měřicím rozsahem (měří s přesností již, od 1 % jmenovitého primárního proudu), 0,5 – měření spotřeby elektrické energie, 0,5S – měření spotřeby elektrické energie (měří s přesností již, od 1 % jmenovitého primárního proudu), 1 – podružné měření, 3 – (kontrolní) orientační měření. [8] Dovolené chyby převodu a chyby úhlu pro měřicí transformátory proudu jednotlivých tříd přesnosti jsou v tabulkách tab. 1 a tab. 2.

Tab. 1 Dovolené chyby převodu a chyby úhlu měřících transformátorů proudu (pro třídy přesnosti od 0,1 do 1) [4]

Třída přesnosti	Chyba převodu (proudu)				Chyba úhlu							
	± %				± Minuty				± Centiradiány			
	Procenta primárního proudu $I_{pr}$ (%)				Procenta primárního proudu $I_{pr}$ (%)				Procenta primárního proudu $I_{pr}$ (%)			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

U měřících transformátorů proudu s třídami přesnosti 0,2S a 0,5S jsou chyby převodu a chyby úhlu uvedeny v tabulce tab. 2, a to z důvodu, že měřící transformátory proudu měří již od 1 % jmenovitého primárního proudu oproti transformátorům proudu s třídou přesnosti v tabulce tab. 1.

Tab. 2 Dovolené chyby převodu a chyby úhlu měřících transformátorů proudu (pro třídy přesnosti 0,2S a 0,5S) [4]

Třída přesnosti	Chyba převodu (proudu)					Chyba úhlu									
	± %					± Minuty					± Centiradiány				
	Procenta primárního proudu $I_{pr}$ (%)					Procenta primárního proudu $I_{pr}$ (%)					Procenta primárního proudu $I_{pr}$ (%)				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9

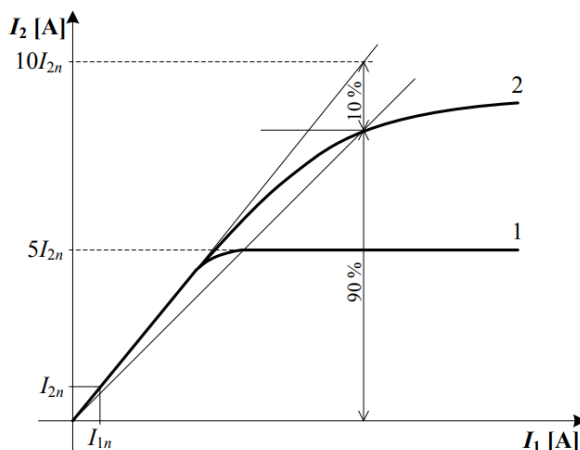
Dovolené chyby u tříd přesnosti 3 a 5 jsou uvedeny v tabulce tab. 3. U měřících transformátorů proudu těchto tříd se vyhodnocuje jen chyba převodu, a to v 50 % a 120 % jmenovitého primárního proudu.

Tab. 3 Dovolené chyby převodu a chyby úhlu měřících transformátorů proudu (pro třídy přesnosti 3 a 5) [4]

Třída přesnosti	Chyba převodu (proudu)	
	± %	
	Procenta primárního proudu $I_{pr}$ (%)	
	50	120
3	3	3
5	5	5

### 1.3.2 Jisticí transformátory proudu

Třídy přesnosti, dle normy ČSN EN 61869-2, pro jisticí transformátory proudu jsou 5P a 10P. Stanovená třída přesnosti jisticího transformátoru proudu udává nejvyšší přípustné procento celkové chyby při krajním primárním proudu. [8]



Obr. 1 Nadproudová charakteristika, 1 – tvar charakteristiky pro měření, 2 – tvar charakteristiky pro jištění [9]

Normalizované hodnoty nadproudových čísel jsou 5 – 10 – 15 – 20 – 30. [4] Při daném nadproudovém čísle celková chyba transformátoru dosáhne stanovených hodnot dle své třídy přesnosti (viz. tabulka tab. 4) [2].

Tab. 4 Dovolené chyby jisticích transformátorů proudu [4]

Třída přesnosti	Chyba převodu při jmenovitém primárním proudu ± %	Chyba úhlu při jmenovitém primárním proudu		Celková chyba při jmenovitém primárním nadproudu %
		± Minuty	± Centiradiány	
5P	1	60	1,8	5
10P	3	–	–	10

Tabulka tab. 4 obsahuje hodnoty chyby převodu a chyby úhlu pro třídu přesnosti 5P a chybu převodu pro třídu přesnosti 10P. Hodnoty v tabulce nesmějí být překročeny, pokud je transformátor proudu provozován při jmenovitém primárním proudu, jmenovitém kmitočtu a připojené jmenovité zátěži. [2]

### 1.4 Princip činnosti přístrojového transformátoru proudu

Transformátor proudu je založen na principu elektromagnetické indukce. Jedná se o transformátor s uzavřeným ferromagnetickým obvodem (jádrem) a dvěma elektrickými obvody, které jsou magneticky spřaženy. Vstupním obvodem (primárním vinutím) s  $N_1$  závitů prochází proud, který vyvolá ve ferromagnetickém obvodě střídavý magnetický tok. Spřažený střídavý magnetický tok prochází výstupním obvodem (sekundárním vinutím) přičemž se na závitěch  $N_2$  indukuje napětí, při stavu nakrátko prochází vinutím proud. [10; 11]

### 1.4.1 Teorie přístrojových transformátorů

Přístrojový transformátor může transformovat jen jednu ze dvou primárních veličin s vyhovující přesností, proto rozeznáváme transformátory proudu a transformátory napětí. Přístrojový transformátor proudu je charakterizován velkou budicí impedancí, tedy malým budicím proudem. Velikost rozptylové reaktance je velikostně porovnatelná s impedancí vnějšího elektrického obvodu připojené na svorky sekundárního vinutí. Přístrojové transformátory proudu jsou provozovány v oblasti blízkého se chodu nakrátko. [5]

Pokud by se zanedbal malý budicí proud a primární a sekundární ampérváhy si budou rovny ( $N_1 \cdot I_1 \doteq N_2 \cdot I_2$ ), můžeme převod určit jako: [1]

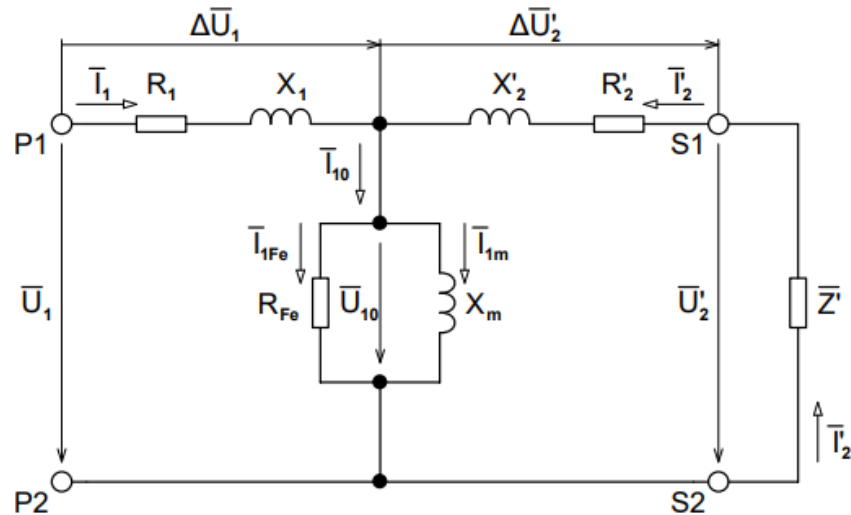
$$k = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (-)$$

Požadavky na transformaci (převod) primárního proudu na sekundární proud jsou takové, aby rozdíl proudů (chyba převodu) a rozdíl fází (chyba úhlu) byl, pokud možno co nejmenší. [1] Ne vždy je třeba, aby sekundární proud dosahoval takové kvality transformace, proto jsou dány třídy přesnosti, které udávají meze chyb proudu (převodu) a chyb úhlu.

Proudová chyba  $\varepsilon_i$  (chyba převodu  $\varepsilon$ ) je definována jako rozdíl mezi naměřeným sekundárním proudem převedeným jmenovitým převodem na stranu primárního proudu a skutečným primárním proudem. Její hodnota se uvádí v procentech. [1]

Chyba úhlu  $\delta$  je definována úhlem mezi vektorem primárního proudu a sekundárního proudu otočeného o  $180^\circ$ . Kladná chyba je, když vektor sekundárního proudu pootočený o  $180^\circ$  předstihuje vektor primárního proudu. Hodnota fázové chyby (chyba úhlu) se udává v úhlových minutách. [1]

Přístrojové transformátory proudu fungují na stejném principu jako transformátory výkonové, rozdíl je pouze v tom, že jsou na ně kladeny jiné požadavky, které již byly zmíněny. Taktéž výkony přístrojových transformátorů nedosahují takových hodnot jako u výkonových transformátorů. Využívají se pro napájení měřicích, jisticích a regulačních systémů. Dalším rozdílem oproti transformátorům výkonovým je, že se jejich primární vinutí zapojují sériově do měřeného obvodu. Zanedbáním ztrát a chyb je poměr primárního proudu a sekundárního proudu určen, poměrem počtu závitů primárního vinutí  $N_1$  a sekundárního vinutí  $N_2$ . Napětí na obou vinutí je dán Ohmovým zákonem, tedy součinem příslušného proudu a impedance. [2] Pro názornost můžeme zmíněné napětí a proudy zobrazit na náhradní schéma transformátoru, které respektuje elektrické obvody a nahrazuje magnetický obvod (mag. jádro) el. veličinami (obr. 2).



Obr. 2 Náhradní schéma transformátoru [12]

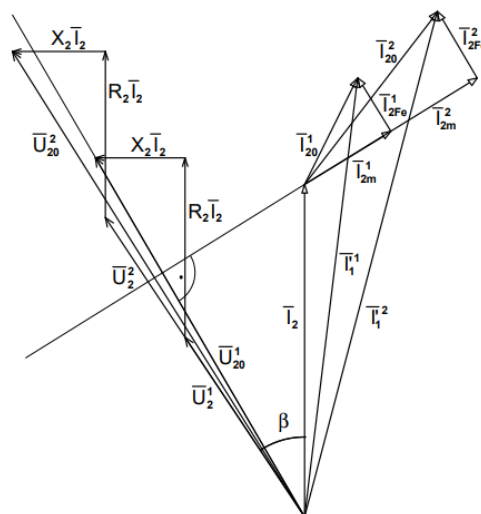
Pokud primárním vinutím prochází proud a na sekundární vinutí není připojena zátěž, nebo není spojeno nakrátko je přístrojový transformátor proudu vystavován elektrickému namáhání. [13] Dle rovnice:

$$U_2 = Z_b \cdot I_2 \quad \text{V; } \Omega, \text{ A}$$

Kdy  $Z_b \rightarrow \infty$ , lze z rovnice říci, že  $U_2 \rightarrow \infty$ . Toto znamená, že na výstupní/sekundární straně transformátoru proudu může výstupní napětí dosahovat nebezpečných hodnot pro obsluhu i samotný transformátor. [13]

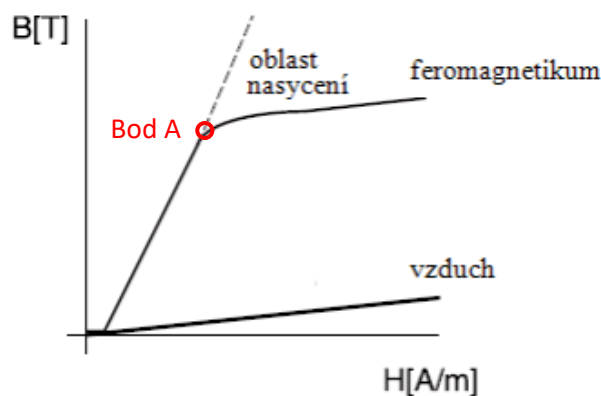
### 1.4.2 Fázorový diagram

Pro sestavení náhradního schématu je třeba respektovat konstrukci přístrojových transformátorů. U přístrojových transformátorů proudu, které nemají stejný počet závitů na primárním a sekundárním vinutí, musí dojít k přepočtu veličin podle poměru závitů, v tomto případě výstupního obvodu. [2] Jedná se o napětí, proudy, odpory, reaktance a jmenovitou zátěž (impedanci), přepočtené veličiny jsou označeny apostrofem.



Obr. 3 Fázorový diagram přístrojového transformátoru proudu [12]

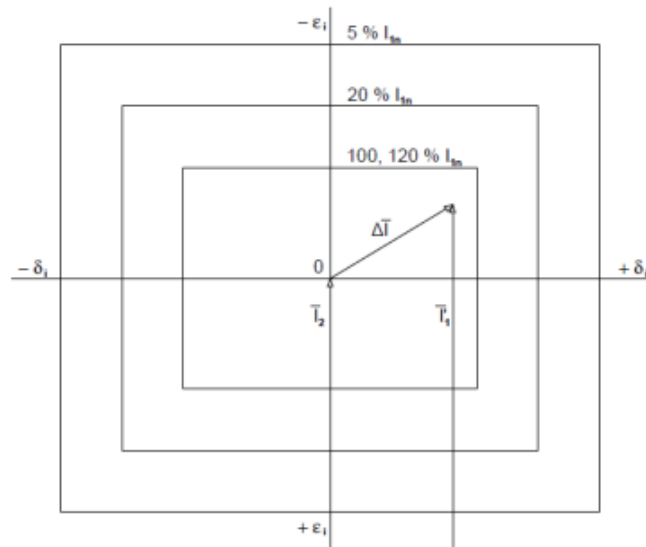
Na obrázku obr. 3 je zobrazen fázorový diagram, který zobrazuje celkovou chybu  $\Delta \bar{I}$  pro dvě různé zátěže z pohledu výstupního obvodu. Celková chyba  $\Delta \bar{I}$  je pak rozdíl mezi fázory  $\bar{I}_2$  a  $\bar{I}'_1$ , je dána fázorem  $\bar{I}_{20}$ . Fázor  $\bar{I}_{20}$  je budicí proud a skládá se ze dvou složek: proudu magnetizačního  $\bar{I}_{2m}$  a proudu na krytí ztrát v železe  $\bar{I}_{2Fe}$ . Z fázového diagramu na obrázku obr. 3 je patrné, že změnou zátěže se mění úbytek napětí  $U_2$ , při zanedbání odporu a reaktancí vinutí se mění i indukované napětí  $U_{20}$ . Dle indukčního zákona je určitému indukovanému napětí přímo úměrná hodnota magnetické indukce, která pak odpovídá magnetickému napětí a tím i proudu  $\bar{I}_{10}$ . Rostoucí zátěž má za následek zvyšující se proud  $\bar{I}_{10}$ , tím dochází ke zvýšení celkové chyby. Celková chyba a proud  $\bar{I}_{10}$  neroste lineárně, záleží, v jaké části magnetizační charakteristiky transformátor proudu pracuje. [2] Nelinearita je způsobena magnetickým nasycením feromagnetického materiálu, které tvoří jádro přístrojového transformátoru. Na obrázku obr. 4 lze určit bod (bod A) do kterého celková chyba  $\Delta \bar{I}$  roste lineárně.



Obr. 4 Magnetizační charakteristika vzduchu a feromagnetika (upraveno) [14]

### 1.4.3 Komplexní diagram chyb

Pro zobrazení chyby proudu (chyby převodu) a chyby úhlu současně, se konstruuje komplexní diagram chyb. Nejčastěji se u přístrojových transformátorů proudu veličiny přepočítávají z primární strany na sekundární, proto na obrázku obr. 5 proud  $I'_1$  je přepočtený primární proud podle daného poměru. Konstrukce komplexního diagramu se provádí tak, že je vždy jen jedna z hodnot proměnná a druhá hodnota je konstantní, např. břemeno transformátoru proudu jako proměnná a proud je konstantní. Komplexní diagram chyb také zobrazuje hranici chyb pro určitou třídu přesnosti, kterou nesmí koncový bod překročit. Hranice pole chyb se mění i podle proudu kterým měření provádíme, to je uvedeno v tabulce tab. 1 a zobrazeno na obrázku obr. 5. [2; 5]



Obr. 5 Komplexní diagram chyb přístrojového transformátoru proudu [12]

Měřítko komplexního diagramu chyb musí být stejné, jak pro chybu proudu, tak pro chybu úhlu, aby byly zachovány popsané vlastnosti. To znamená, že délková jednotka zobrazující 1% chybu proudu (chybu převodu) se musí rovnat délkové jednotce zobrazující chybu úhlu o hodnotě 34,40 minut (1 centiradián). Při zachování stejných délek je možno celkový diagram chyb využít k řešení různých úloh. [5]

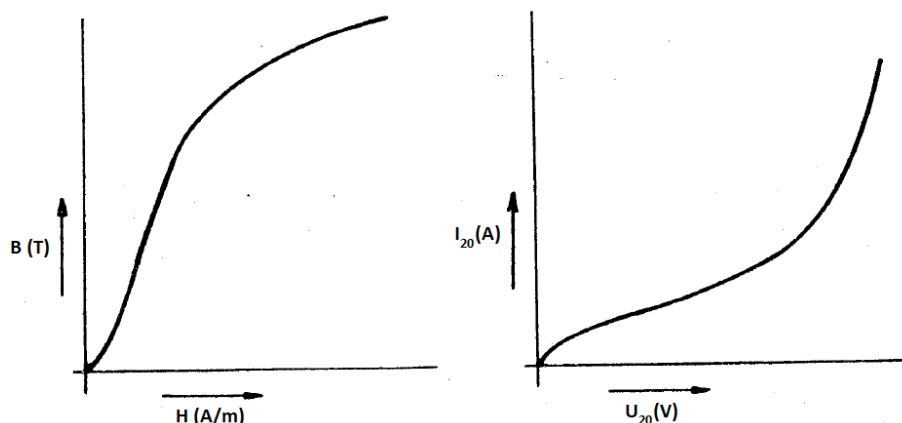
## 1.5 Analýza vlastností přístrojového transformátoru

Přístrojové transformátory proudu jsou konstruovány proto, aby plnily funkci měření, či jistění. Závislost naměřených chyb pak závisí na veličinách, které jsou jmenovány níže. Z nich lze analyzovat silné a slabé stránky přístrojových transformátorů proudu.

### 1.5.1 Závislost na proudu

Přístrojový transformátor proudu má široký rozsah měření proudu ( $0,1$  až  $1,2 \cdot I_{1n}$ ), kde musí splňovat požadavky třídy přesnosti dané příslušnou normou. Závislost proudu se uvažuje při připojení konstantním břemenu na sekundárních svorkách. Potom platí, že změnou proudu se mění indukované napětí  $U_{20}$ , magnetická indukce, a tím i proud  $I_{20}$ . Budicí charakteristika  $I_{20} = f(U_{20})$  je v jiném měřítku zrcadlově převrácený obraz magnetizační charakteristiky  $B = f(H)$  použitého materiálu magnetického obvodu. Tento fakt v podstatě udává, že závislost celkové chyby závisí na indukovaném napětí. Obrázek obr. 6 ukazuje, že celková chyba není lineární a nejmenší chyby proudu a úhlu se dosahuje v oblasti nasycení použitého magnetického materiálu. [2]





Obr. 6 Magnetizační charakteristika vlevo a budící charakteristika  $I_{20} = f(U_{20})$  vpravo (upraveno) [2]

### 1.5.2 Závislost na břemeni

Při závislosti na břemeni se uvažuje konstantní proud, se změnou břemene na sekundárních svorkách, dochází ke změně indukovaného napětí  $U_{20}$ . Závislost lze odvodit podobně, jako u závislosti na proudu. Celková chyba se zvyšujícím břemenem roste a růst celkové chyby je nelineární. [2]

### 1.5.3 Závislost na sekundárním účinníku

Předpoklady pro určení této závislosti je připojení konstantního břemene a konstantní primární proud. Při dodržení těchto podmínek lze říct, že koncový bod fázoru  $I_{20}$  ( $\Delta I$ ) se pohybuje po kružnici o poloměru  $I_{20}$ , jejíž střed je v počátku  $I_{20}$ . Změnou účinníku se mění úhel  $\beta$  a tím i velikosti chyby proudu (převodu) a chyby úhlu. [2]

### 1.5.4 Závislost na kmitočtu

Přístrojový transformátor proudu je trvale přizpůsobený na stanovený kmitočet. Při provozování na jiném kmitočtu se nepřímo úměrně mění magnetická indukce proudící ve feromagnetickém jádře. Dochází tak ke změně magnetizačního příkonu jádra a ke změně vzniklých činných ztrát v magnetickém jádře. Pokles magnetické indukce zapříčiní pokles hodnoty celkové chyby  $\Delta I$  a jejích složek. Závislost feromagnetického materiálu na kmitočtu je nelineární a skutečnost, že reaktance vinutí a reaktance břemene je lineární, je třeba chování přístrojového transformátoru posuzovat případ od případu. [2]

## 2 Senzory proudu

Senzory proudu představují modernější řešení měření proudu pro měřicí a jisticí systémy. Dříve nebyly používány z důvodu nedostatečného výkonu pro napájení a provoz měřicích a jisticích zařízení a jejich elektromechanickými mechanismy. Modernější mikroprocesorové ochrany nejsou závislé na napájení ze senzorů proudu a můžou tak využít jejich výhody. Použití senzorů proudu nevyžaduje rozsáhlá zapojení, není třeba přizpůsobovat zátěž, jako u přístrojových transformátorů proudu. Celý systém je elektromagneticky kompatibilní a je dosaženo galvanického oddělení od měřeného, silového obvodu. [15]

### 2.1 Senzor proudu na principu Rogowského cívky

Senzory proudu na principu Rogowského cívky je nutno pohlížet jako na vzduchový transformátor, jedná se tedy o transformátor bez feromagnetického jádra, a tak jej nelze přesytit. Absencí feromagnetického jádra lze senzor proudu Rogowského cívky využít v elektrizačních soustavách o frekvenci 50 Hz i 60 Hz. Mezi další klady patří lineární výstup signálu, jednoduchost, lehká a levná konstrukce oproti transformátorů proudu. [15; 16]

#### 2.1.1 Princip činnosti Rogowského cívky

Jak již bylo zmíněno, tak na Rogowského cívku se pohlíží jako na vzduchový transformátor. Vzduchový transformátor se skládá primárního a sekundárního vinutí, nejčastěji navinuté na nemagnetickém jádru. Z pohledu Rogowského cívky je primární vinutí nejčastěji tvořeno vodičem, kterým protéká měřený proud. Sekundární vinutí je vlastní Rogowského cívka, na které se indukuje napětí. Jedná se o transformátor proudu, protože měřený primární proud vytváří nestacionární magnetické pole, které indukuje napětí na sekundárním vinutí. Nestacionární magnetické pole vytvořeno primárním vinutím nesmí být nijak ovlivněno, proto vnitřní objem Rogowského cívky nesmí obsahovat feromagnetické materiály (které by ovlivňovaly tvar magnetického pole) a sekundárním vinutím, tedy Rogowského cívku nesmí procházet proud. [16]

Princip Rogowského cívky spočívá v tom, že střídavý proud protékající primárním vodičem vytváří kolem sebe nestacionární magnetické pole. Toto nestacionární magnetické pole indukuje napětí na sekundárním vinutí (Rogowského cívce), které obklopuje primární vodič. Indukované napětí je úměrné derivaci okamžité hodnoty proudu, který prochází primárním vinutím. Pro výstupní indukované napětí lze za určitých podmínek napsat rovnici [17]:

$$u(t) = -\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \cdot S \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

Výstup z Rogowského cívky je indukované napětí, proto aby se získala přesná hodnota měřeného proudu, musí být toto napětí integrováno podle času. Integrátory mohou být součástí samotného senzoru proudu, ovšem nejčastěji se nachází v připojených zařízeních (např. ochranách) z důvodu snížení nákladů. Samotná integrace se provádí pomocí pasivního RC integrátoru nebo aktivního integrátoru za využití operačního zesilovače. [18]

Pasivní RC integrátor je v podstatě zapojení rezistoru a kondenzátoru do výstupu Rogowského cívky. Pro vyhovující přesnost musí být výstupní napětí velké, proto se využívá tam, kde jsou rychlé proudové rázy. Schopnost integrace v nízkých frekvencích je špatná. Jejich výhodou je, že nemusí být napájeny. [19]

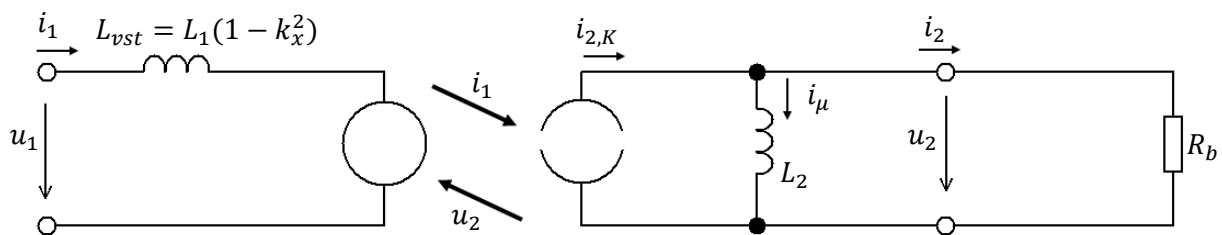
Aktivní integrátor využívá zapojení s operačním zesilovačem, jehož vstupní impedance musí být nekonečně velká. Využití aktivního integrátoru je univerzálnější. Může se použít pro nízké frekvence (0,1 Hz), ale i pro frekvence blížíící se 1 MHz. Použitím operačního zesilovače, lze integrovat i velmi malé indukované napětí ( $\mu\text{V}$ ). [19; 20]

### 2.1.2 Chování Rogowského cívky v režimech nakrátko a naprázdno

Zapojení výstupu Rogowského cívky můžeme uskutečnit ve dvou režimech. Nakrátko, kdy je na výstup Rogowského cívky připojen rezistor a naprázdno, kdy na výstupu není nic připojeno. [16]

Při zapojení Rogowského cívky nakrátko, je na výstup připojen rezistor o velmi malém odporu. Ten se využívá jako odporový bočník, na němž je snímáno výstupní napětí Rogowského cívky. Měřený proud je pak vypočítán dle Ohmova zákona. Cívka se pak chová jako běžný proudový transformátor, ovšem bez magnetického jádra, jehož sekundární proud je zatížen systematickou chybou o velikosti  $-i_\mu$ . [16]

Při zapojení Rogowského cívky naprázdno, není na výstupu připojen žádný rezistor. Z obvodového modelu na obrázku obr. 7 vyplývá, že sekundární indukčnost  $L_2$  přebírá funkci bočníku. Dle indukčního zákona je napětí na indukčnosti  $L_2$  přímo úměrné derivaci sekundárního proudu:  $u_2(t) = L \cdot \frac{di_{2,K}(t)}{dt}$ . Integrováním výstupního napětí  $u_2$  se získá proud  $i_{2,K}$ , který není zatížen chybou  $-i_\mu$  jako při režimu nakrátko. [16]



Obr. 7 Obvodový model transformátoru proudu zatíženého bočníkem  $R_b$  (upraveno) [16]

## 2.2 Normalizované třídy přesnosti a tabulka dovolených chyb

V normě ČSN EN IEC 61869–10 jsou uvedeny dva druhy transformátorů proudu malého výkonu. Prvním je transformátor proudu malého výkonu s magnetickým jádrem. Jedná se o klasickou konstrukci násuvného přístrojového transformátoru proudu s tím rozdílem, že na výstupních svorkách je trvale připojeno břemeno. Toto břemeno, je pak pevnou součástí konstrukce transformátoru. Výstupním signálem je napětí, které je vyhodnocováno elektronikou mimo konstrukci transformátoru. Rozměry a výkon transformátor proudu malého výkonu s magnetickým jádrem jsou oproti konvenčním přístrojovým transformátorům výrazně nižší. Druhým je transformátor proudu malého výkonu s nemagnetickým jádrem. Toto řešení funguje na principu Rogowského cívky. Výstupním signálem je napětí, ovšem je třeba ho vyhodnocovat speciální elektronikou, která bude splňovat několik podmínek, např. téměř nekonečnou impedanci vstupního obvodu. Elektronika nevyhodnocuje výstupní napětí, ale průběh napětí je integrován a pak dále zpracováván. [21; 22]

Transformátory proudu malého výkonu (LPCT) se rozdělují na pasivní a aktivní (součástí je elektronika). Pasivní transformátory proudu malého výkonu jsou zcela nezávislé na externím napájení

a výstupní signál není nijak upravován. Aktivní transformátory proudu malého výkonu obsahují elektronické komponenty, které vyžadují externí napájení. Výstupní signál tohoto transformátoru může být upravován. Informace výstupního signálu pak může mít analogovou či digitální podobu. [21] Již zmíněná norma ČSN EN IEC 61869–10 udává standart pro pasivní transformátor proudu malého výkonu (LPPCT).

### 2.2.1 Definice týkající se přesnosti

**Chyba převodu ( $\varepsilon$ )** – je definována stejně jako chyba převodu ( $\varepsilon$ ) v kapitole: 1.2.3 Definice týkající se přesnosti. S tím rozdílem, že rozeznáváme chyby převodu přístrojů s analogovým a digitálním výstupem. Pro analogový výstup je chyba převodu udaná v procentech a je dána tímto vztahem: [21]

$$\varepsilon = \frac{K_r Y_s - X_p}{X_p} \cdot 100 \quad (\%; -, -)$$

**Fázová chyba ( $\varphi_e$ )** – je definována jako chyba úhlu ( $\Delta\varphi$ ), viz. v kapitole: 1.2.3 Definice týkající se přesnosti, mínus chyba způsobená jmenovitou fázovou odchylkou a jmenovitým zpožděním. [23]

$$\varphi_e = \Delta\varphi - (\varphi_{or} + \varphi_{tdr}) \quad \text{a} \quad \varphi_{tdr} = -2\pi \cdot f \cdot t_{dr}$$

**Celková chyba ( $\varepsilon_c$ )** – v ustálených podmínkách, celková chyba je efektivní hodnota rozdílu mezi:

- okamžitými hodnotami primárního proudu a
- okamžitými hodnotami skutečného sekundárního výstupu násobeného jmenovitým převodem transformátoru; kladná znaménka primárního proudu a sekundárního výstupu odpovídají dohodě o značení svorek.

Pro analogový výstup, celková chyba  $\varepsilon_c$  je obecně vyjádřena v procentech efektivní hodnoty primárního proudu podle vztahu: [24; 23]

$$\varepsilon_c (\%) = \frac{100}{I_p} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [K_r u_s(t) - i_p(t - t_{dt})]^2 dt}$$

kde

$I_p$  je efektivní hodnota primárního proudu

Obecně platí, že hodnota celkové chyby  $\varepsilon_c$  se využívá pro ochranné, jisticí účely. [21]

**Jmenovitý činitel zvýšeného primárního proudu ( $K_{pcr}$ )** – udává poměr zvýšeného primárního proudu a jmenovitého primárního proudu. Normalizované hodnoty jmenovitého činitele zvýšeného primárního proudu jsou 5, 10, 20, 50 a 100 [24]

### 2.2.2 Měřicí transformátory proudu malého výkonu

U měřicích pasivních transformátorů proudu malého výkonu jsou dle normy ČSN EN IEC 61869–10 tyto třídy přesnosti:

$$0,1 - 0,2 - 0,25 - 0,5 - 0,5S - 1 - 3 [22]$$

Pro tyto třídy přesnosti lze uvést tabulku tab. 5 dovolených chyb převodu a chyb fáze měřicích transformátorů proudu malého výkonu.

Tab. 5 Dovolené chyby převodu a chyby fáze měřících pasivních transformátorů proudu malého výkonu [22]

Třída přesnosti	Chyba převodu, $\varepsilon$ , $\varepsilon_{cor I}$					$\pm$ chyba fáze pro primární proud je uvedeno níže									
	$\pm$ %					Minuty					Centiradiány				
	pro proud					pro proud					pro proud				
	0,01 $I_{pr}$	0,05 $I_{pr}$	0,2 $I_{pr}$	$I_{pr}$	$K_{pcr} \cdot I_{pr}$	0,01 $I_{pr}$	0,05 $I_{pr}$	0,2 $I_{pr}$	$I_{pr}$	$K_{pcr} \cdot I_{pr}$	0,01 $I_{pr}$	0,05 $I_{pr}$	0,2 $I_{pr}$	$I_{pr}$	$K_{pcr} \cdot I_{pr}$
0,1	-	0,4	0,2	0,1	0,1	-	15	8	5	5	-	0,45	0,24	0,1 5	0,15
0,2	-	0,75	0,35	0,2	0,2	-	30	15	10	10	-	0,9	0,45	0,3	0,3
0,2 S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5	-	1,5	0,75	0,5	0,5	-	90	45	30	30	-	2,7	1,35	0,9	0,9
0,5 S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9
1,0	-	3,0	1,5	1,0	1,0	-	180	90	60	60	-	5,4	2,7	1,8	1,8
3	-	-	4,5	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabulka tab. 5 uvádí chyby převodu a chyby fáze, za předpokladu daného umístění transformátoru proudu malého výkonu na primární vodič. Tato problematika je uvedena níže v kapitole: 2.2.4 Účinky umístění primárního vodiče na přesnost. Hodnoty ve zmíněné tabulce jsou uvedeny pro jmenovitý kmitočet a za předpokladu jmenovité nebo vyšší hodnoty břemene.

### 2.2.3 Jisticí transformátory proudu malého výkonu

Třídy přesnosti, dle normy ČSN EN IEC 61869–10, pro jisticí transformátory proudu malého výkonu jsou:

5P – 10P – 5TPE [22]

Číslice a písmeno u tříd přesnosti v tabulce tab. 6 mají svůj význam. Číslice stanovuje třídu přesnosti jisticího transformátoru proudu malého výkonu, tedy udává nejvyšší přípustné procento celkové chyby při krajním primárním proudu (viz. v 1.3.2 Jisticí transformátory proudu). [8] Písmeno „P“ (protection) udává, že se jedná o třídu přesnosti pro jisticí transformátory malého výkonu. Písmena „TPE“ (transient protection electronic classes) udávají, že se jedná o třídu přesnost jisticích transformátorů proudu malého výkonu pro přechodné jevy. [22; 23]

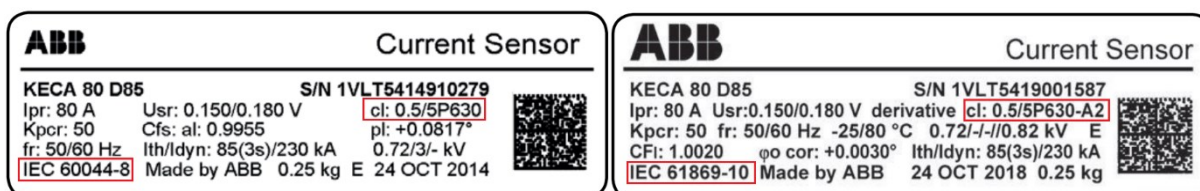
Tab. 6 Dovolené chyby měřicích pasivních transformátorů proudu malého výkonu [22]

Třída přesnosti	± Chyba převodu při jmenovitém primárním proudu $\epsilon$ %	Chyba fáze při jmenovitém primárním proudu		Celková chyba při jmenovitých mezích přesnosti Primárního proudu %	V podmínkách mezi přesnosti Maximální špičková okamžitá chyba %
		± Minuty	± Centiradiány		
5TPE	1	60	1,8	5	10
5P	1	60	1,8	5	-
10P	3	–	–	10	-

Pro hodnoty chyb převodu a chyb fáze v tabulce tab. 6 také platí předpoklad umístění transformátoru proudu malého výkonu na primární vodič. Tato problematika je uvedena níže v kapitole: 2.2.4 Účinky umístění primárního vodiče na přesnost. Hodnoty ve zmíněné tabulce jsou uvedeny pro jmenovitý kmitočet a za předpokladu jmenovité nebo vyšší hodnoty břemene.

## 2.2.4 Účinky umístění primárního vodiče na přesnost

Umístění měřicí hlavy pasivního transformátoru proudu malého výkonu na vodič má vliv na přesnost přístroje. Proto součástí normy ČSN EN IEC 61869–10 v příloze D je uvedena tabulka, která rozšiřuje informace o třídě přesnosti pasivních transformátorů proudu malého výkonu bez integrovaného primárního vodiče. [21] Tohoto rozšíření třídy přesnosti si můžeme všimnout i na štítcích přístrojů (obr. 8), kde vidíme rozdíl ve značení staré (vlevo) a nové (vpravo) normy.



Obr. 8 Ukázka štítků senzoru proudu (vlevo staré značení, vpravo nové značení) [25]

Kódy A1, A2 a A3 určují, jak moc umístění primárního vodiče ovlivňuje přesnosti měřicího zařízení. Rozmezí umístění primárního vodiče na přesnost nám určuje tabulka tab. 7. [22]

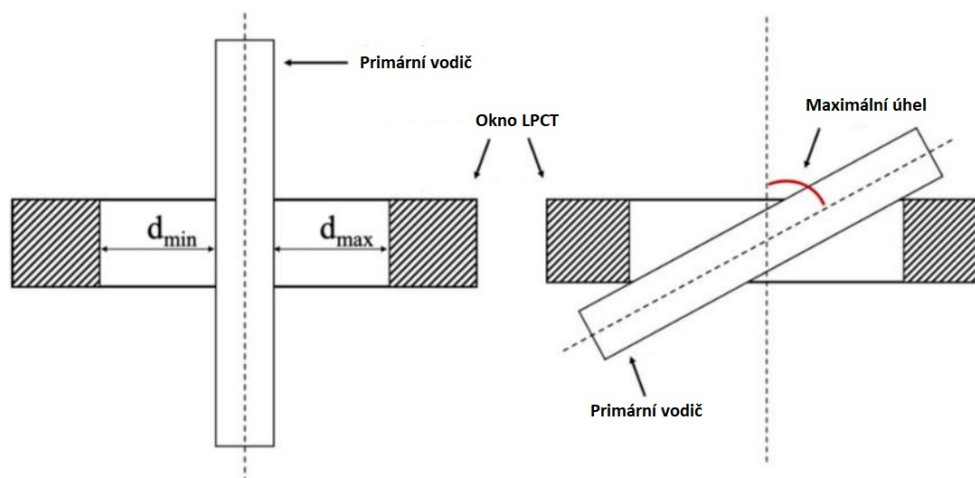
Tab. 7 Rozšířené značení třídy přesnosti u transformátoru proudu malého výkonu [22]

Rozšířené značení třídy přesnosti	Maximální polohový faktor (PF), do kterého je zaručena třída přesnosti	Maximální úhel, do kterého je zaručena třída přesnosti
A1	0	0
A2	0,5	10°
A3	1	45°

Polohový faktor (PF – position factor) v tabulce tab. 7 specifikuje vzdálenosti mezi vodičem a oknem transformátoru proudu malého výkonu (LPCT). Když je PF = 0, znamená to, že osa vodiče splývá s osou okna LCPT, zatímco když je PF = 1, znamená to, že vodič a okno LPCT se dotýkají. [21] Vypočítá se:

$$PF = (d_{\max} - d_{\min}) / (d_{\max} + d_{\min}) \quad [22]$$

Maximální úhel zmíněný v tabulce tab. 7, je definován jako úhel svírající se mezi osou vodiče a osou okna LPCT. [21] Tento úhel je pak zvýrazněn na obrázku obr. 9.

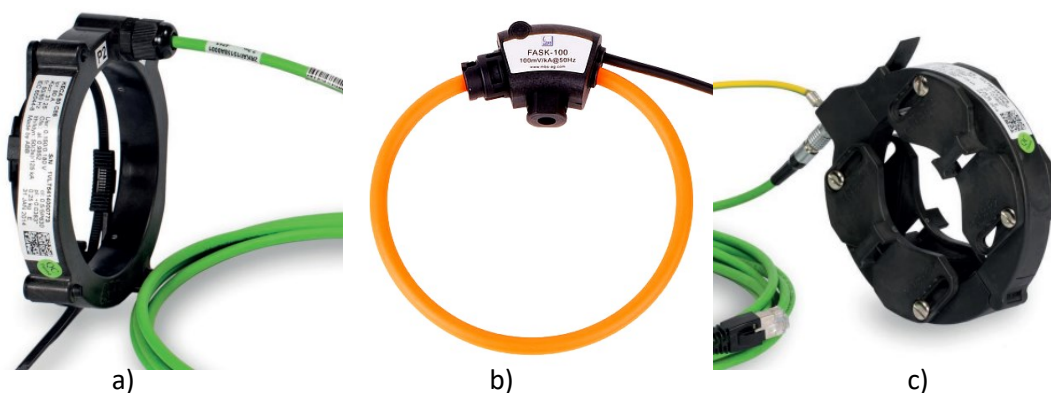


Obr. 9 Ukázka polohy vodiče a měřicího okna LPCT (upraveno) [21]

Z tabulky tab. 7 a obrázku obr. 9 vyplývá, že LPCT s kódem A3 splňuje svou třídu přesnosti i pokud je  $PF = 1$  a maximální úhel  $45^\circ$ . V případě kódového označení A1 se jedná o LPCT, které jsou nejcitlivější na umístění primárního vodiče vůči oknu LPCT. [21]

## 2.3 Provedení Rogowského cívky

Konstrukce senzorů proudu se odvíjejí od provedení Rogowského cívky, proto jej můžeme rozdělit na senzory proudu s nerozdělitelnou (pevnou), rozdělitelnou (split-core) a pružnou (flexibilní) konstrukcí. Pevná konstrukce senzorů proudu je vhodná pro aplikaci na stěny a přechody rozváděčů. Předností rozdělitelné konstrukce je snadná instalace na stávající, i nové vodiče, tedy bez přerušení dodávky elektrické energie. Pružné (flexibilní) senzory proudu se dají použít na vodiče velkých průměrů, ale i na nevhodně tvarované vodiče. Pružné senzory mají také rozebíratelnou konstrukci, proto instalace probíhá bez přerušení dodávky elektrické energie. Spolu s Rogowského cívkou můžou senzory proudu obsahovat integrátor, ovšem nejčastěji se vyrábějí senzory proudu, které v těle integrátor neobsahují.



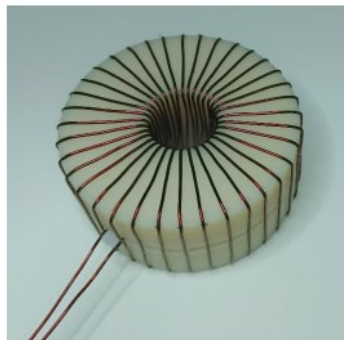
Obr. 10 a) Senzor proudu s pevnou konstrukcí [26], b) Senzor proudu s pružnou (flexibilní) konstrukcí [27], c) Senzor proudu s rozdělitelnou (split-core) konstrukcí [28].

### 2.3.1 Pevné provedení Rogowského cívky

Jedná se o nerozebíratelnou konstrukci Rogowského cívky, kde toroidní jádro je vyrobeno z nemagnetického materiálu, např. plast, epoxid, na které je navinuto vinutí Rogowského cívky. Výhodou je, že výstupní napětí dosahuje vyšších hodnot než u PCB provedení. Jedná se o konstrukčně náročnější a dražší řešení. [29]

Vliv blízkých vodičů přenášející velké proudy by mohl ovlivnit měření, proto je Rogowského cívka konstruována ze dvou vodičových smyček zapojenými v elektricky opačném směru. Tato konstrukce vinutí způsobí odstranění vlivu okolních elektrických polí působících na Rogowského cívku. Dvou vodičové smyčky můžou mít dvě provedení, první je, kdy druhá smyčka je vedena skrze střed vracující se na začátek vinutí. Druhé provedení je, kdy jsou obě smyčky z vinutého drátu navinuty na nemagnetické jádro, v tomto případě je indukované napětí dvojnásobné. [30]

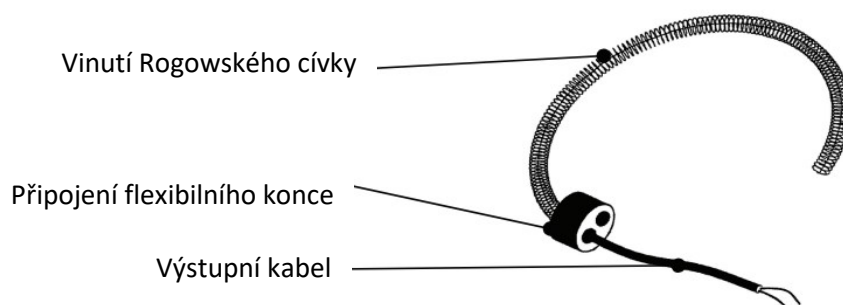




Obr. 11 Ukázka pevného provedení Rogowského cívky [31]

### 2.3.2 Pružné provedení Rogowského cívky

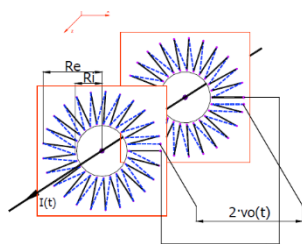
Rogowského cívka je navinuta na jádro z pružného materiálu např. silikonové pryže. Jak již bylo zmíněno, tak drát z konce vinutí se vrací skrze střed na začátek vinutí. Pružné Rogowského cívky jsou vhodné pro měření proudu, kde je omezený prostor kolem vodiče nebo pokud je vodič nevhodně tvarovaný. Pružná Rogowského cívka je vzhledem k použitým materiálům lehká a její přesnost závisí na správném umístění cívky snímače na primární vodič. [29]



Obr. 12 Ukázka pružného provedení Rogowského cívky (upraveno) [32]

### 2.3.3 PCB provedení Rogowského cívky

Konstrukce PCB Rogowského cívky je jiná, než již zmíněná provedení. Samotná konstrukce neobsahuje žádné vinutí a cívky se nevinou na nemagnetické jádro. Celá Rogowského cívka je vyrobena na desce plošných spojů. Konce vodivých cest cívky jsou pak prokovovány, což znamená spojení vodivých cest horní a dolní strany desky. Strojová výroba PCB Rogowského cívek zajistí vysokou přesnost a sníží výrobní náklady. Z důvodu vyššího kroku závitů na desce plošných spojů je počet závitů nižší, oproti vinuté Rogowského cívky. PCB cívka je tak ovlivněna magnetickým polem vnějších vodičů, kterými prochází proud. To může způsobit chybu měření. Pro minimalizaci vlivu blízkých vodičů se použijí dvě PCB cívky, které jsou vedle sebe. Každá deska plošných spojů obsahuje jednu Rogowského cívku s jiným hodinovým směrem navíjení. Na jedné desce je vinutí cívky ve směru hodinových ručiček a na druhé proti směru hodinových ručiček. Tyto desky obsahující cívky se spojí sériově podle obrázku obr. 14, což má za následek potlačení vlivu blízkých vodičů, ale i zvýšení výstupního napětí. PCB Rogowského cívky mohou mít různá provedení, kruhová, oválná nebo obdélníkového tvaru. Jak již bylo zmíněno, konstrukce neobsahuje nic kromě vytištěné Rogowského cívky, proto je konstrukce oproti zmíněným provedením lehčí. [30; 33]



Obr. 14 Sériové zapojení PCB Rogowského cívek [33]



Obr. 13 Ukázka PCB provedení Rogowského cívky [39]

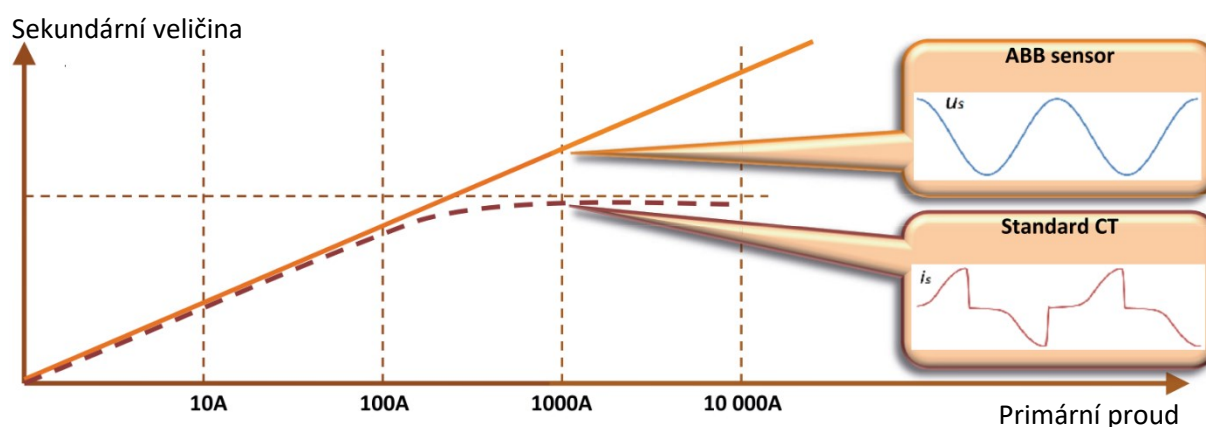
## 2.4 Analýza vlastností senzoru proudu

Vlastnosti senzorů proudu záleží na samotném provedení Rogowského cívky. V některých níže uvedených vlastnostech mají výhodu PCB provedení Rogowského cívky např. v kmitočtovém rozsahu. Výhodou vinuté provedení Rogowského cívky je např. velikost výstupního napětí. Lze tedy obecně říci, že senzory proudu na principu Rogowského cívky mají níže uvedené vlastnosti.

Provedení Rogowského cívky není jediným atributem ovlivňující vlastnosti senzorů. Jsou to např: délka použitého kabelu k senzoru, preciznost výroby (výrobní tolerance), použitý integrátor atd., proto níže uvedené vlastnosti se uvažují pro komerčně používané senzory proudu.

### 2.4.1 Lineární měřicí rozsah

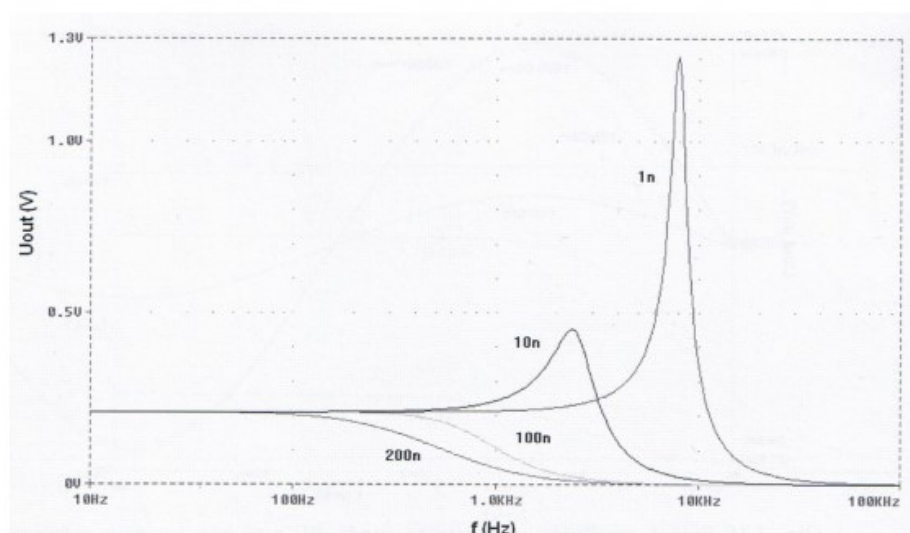
Z důvodu použití nemagnetického jádra Rogowského cívky, nemůže dojít k přesycení materiálu jádra. To zaručuje linearitu výstupního signálu, tedy nedochází ke zkreslení obrazu měřené veličiny. Proudový rozsah senzorů proudu, ve kterém jsou schopny měřit je velmi široký. U komerčních senzorů proudu se rozmezí udává od 4 A, až po 100 kA. Maximální hodnota proudového rozsahu je ovlivněna, jak frekvencí, tak amplitudou měřeného proudu. Co také omezuje rozsah měření je použitá elektronika integrátoru. [15; 34]



Obr. 15 Porovnání výstupního signálu senzoru proudu a přístrojové transformátoru proudu (upraveno) [25]

## 2.4.2 Kmitočtový rozsah

Senzory proudu se nejčastěji vyrábějí pro kmitočty 50 Hz a 60 Hz. Můžou být použity i pro nízké kmitočty (0,1 Hz), a i pro kmitočty blížíící se 1 MHz. Taktéž lze říci, že s rostoucím počtem závitů, roste parazitní kapacita cívky. To má za následek omezení použitelnosti v horních kmitočtech. [16; 35]



Obr. 16 Frekvenční závislost Rogowského cívky na různé vstupní kapacity měřicího zařízení [35]

Obrázek obr. 16 ukazuje frekvenční závislost Rogowského cívky na vstupní kapacitě měřicího zařízení. Lze se všimnout, že výstupní napětí z Rogowského cívky je ovlivňováno kapacitou měřicího zařízení, které zpracovává měřený signál. [35]

## 2.4.3 Přesnost měření

Celková přesnost komerčně vyráběných senzorů proudu na principu Rogowského cívky se pohybují již od 0,5 %. Dle normy IEC 67869 – 10 spadají do třídy přesnosti 0,5. Zdrojů nepřesnosti senzoru proudu je hned několik, např. výrobní tolerance, vliv blízkých vodičů, kterými teče proud a teplotní závislost. Mimo zmíněné vlivy je přesnost senzoru proudu závislá na umístění vodiče v měřicím okně senzoru. Senzory proudu, které jsou přímo určeny pro použití na vodiči jsou vybaveny mechanickými držáky (obr. 10 a)), aby nešlo k nevhodnému umístění. [34; 25]

## 2.4.4 Teplotní závislost

Z důvodu různých tepelných roztažností použitých materiálů v konstrukci senzoru proudu má většina komerčně prodávaných senzorů proudu vymezený teplotní rozsah použití. Pokud by došlo k použití mimo výrobcem daný teplotní rozsah, mělo by to za následek oddálení/přiblížení závitů a roztažnost jádra cívky. Díky této nepatrné změně konstrukce by muselo dojít k úpravě měřicí hlavy senzoru a ke speciální kalibraci přístroje. Teplotní rozsahy záleží od vybavenosti senzoru proudu. Pokud by senzor proudu obsahoval integrační elektroniku, tak je jeho teplotní rozsah užší oproti senzoru proudu bez integrační elektronik [34; 25]

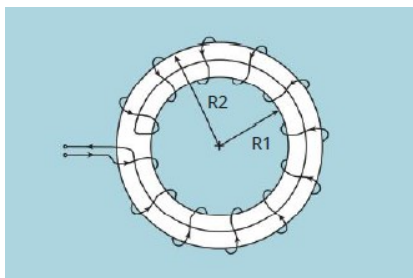
## 2.4.5 Výstupní signál

Nejčastějším výstupním signálem ze senzorů proudu je napětí. Jedná se tedy o senzor proudu bez integrační elektroniky. Jednou z předností senzorů proudu oproti transformátorům proudu je, že výstupní napětí je bezpečné i ve stavu při rozpojení sekundárního vinutí/výstupního obvodu v provozu. Pokud u transformátoru proudu při provozu dojde k rozpojení sekundárního obvodu, objeví se na sekundárních svorkách nebezpečné napětí, a mohlo by dojít i ke zničení samotného přístroje. [34]

Rozsah výstupního napětí je typicky vyjádřen jako citlivost. U komerčních senzorů proudu se setkáváme s citlivostí od 0,01 mV/A do 200 mV/A, dle typu Rogowského cívky. Nejčastěji se na senzorech proudu používá zápis ve jmenovitých hodnotách např. 80 A/0,150 V při 50 Hz (neboli jmenovitý transformační převod). [34; 25]

## 2.4.6 Elektromagnetická kompatibilita

Nevětší vliv na přesnost senzorů proudu (na principu Rogowského cívky) má vnější magnetické pole. Toto vnější magnetické pole vzniká ve vodičích, které jsou v blízkosti senzoru a prochází jimi proud. Vliv blízkých vodičů na senzor je závislý na vzdálenosti vodiče od senzoru a na procházejícím proudem vodičem. Proto, aby se zamezil vliv blízkých vodičů, je vinutí Rogowského cívky vytvořeno dvouvodičovou smyčkou (obr. 17) nebo v případě PCB provedení dvěma deskami ve speciálním zapojení (obr. 14). [30]



Obr. 17 Princip dvouvodičového smyčkového vinutí Rogowského cívky [36]

Samotný senzor proudu s jeho připojovacím kabelem jsou chráněny proti naindukování rušivého napětí, který by měl za následek zkreslení výstupního signálu. Dosahuje se toho tím, že je senzor i s kabelem opatřen stíněním. U stínění senzoru se musí dbát na to, aby se stínění po obvodě senzoru nespojilo. Pokud by stínění bylo po obvodě senzoru celistvé, mohlo by dojít ke zkreslení výstupního signálu vířivými proudy. [37] Na obrázku obr. 10 c) lze vidět senzory s připojeným zemním kabelem, ten slouží k uzemnění stínění senzoru.

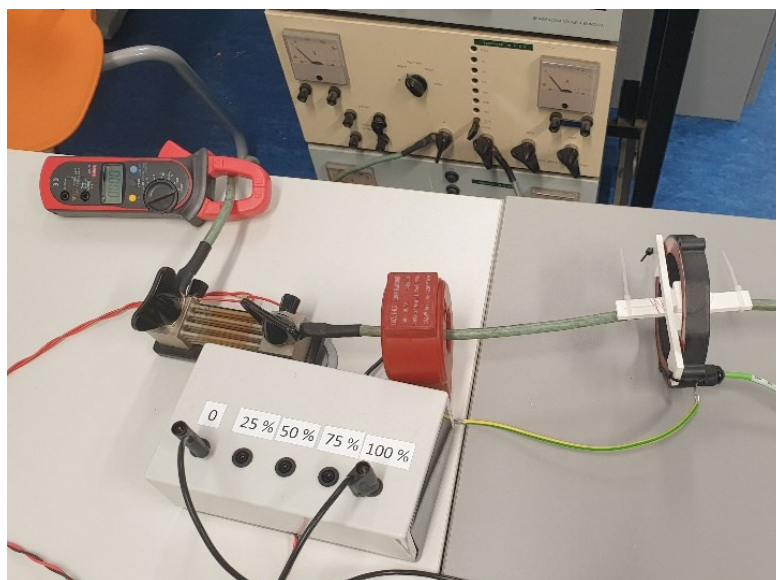
### 3 Návrh zapojení a konstrukční části laboratorní úlohy

Návrh zapojení přístrojového transformátoru proudu a proudového senzoru je vytvořen proto, aby bylo možné jednoduše změřit potřebné parametry přístrojů proudu. Jako první bylo třeba vyřešit napájecí zdroj, který by dodal potřebný proud pro měření. Taktéž bylo třeba vyřešit měřené vedení, které by odolávalo teplotnímu namáhání při průchodu proudem. Proto, aby měření probíhalo bez přerušení, bylo třeba vytvořit měřicí pomůcky např. břemeno transformátoru proudu nebo adaptér pro připojení senzoru proudu.

Některé konstrukční části laboratorní úlohy bylo třeba vytvořit. Břemeno transformátoru proudu bylo vytvořeno, protože rozsah břemene nebylo možno zakoupit kvůli nestandardní hodnotě odporu a vysokému výkonu. Adaptér pro připojení senzoru proudu bylo třeba taktéž vytvořit, jelikož zakončení výstupního kabelu má koncovku RJ45. Výrobce senzorů nedoporučuje jakkoliv upravovat výstupní kabel s koncovkou RJ45, mělo by to za následek negativní dopad na přesnost, a znemožnilo by to dalšímu použití senzoru proudu.

#### 3.1 Zapojení laboratorní úlohy

Zapojení laboratorní úlohy se nachází na laboratorním stole, kde jsou měřicí i měřené přístroje umístěny. Proudový zdroj, který je součástí zapojení se nenachází na laboratorním stole, je umístěn samostatně na podlaze v blízkosti laboratorního stolu.



Obr. 18 Skutečné zapojení laboratorní úlohy

Proudový zdroj je schopen trvale dodat až 600 A, což je dostačující pro měření třídy přesnosti přístrojů i určení nadproudového čísla u transformátoru proudu.

Součástí zapojení je odporový bočník s vysokou přesností (0,1 %). Na odporovém bočníku je měřena skutečná hodnota procházejícího proudu, která je následně porovnávána s naměřenými hodnotami proudu z jednotlivých přístrojů proudu.



Obr. 19 Odporový bočník použitý pro laboratorním měření

Dále je zapojen přístrojový transformátor proudu (obr. 20), jehož parametry se budou ověřovat. Třída přesnosti transformátoru je 0,5 a transformační převod je 100 A/5 A. Na sekundární/výstupní svorky transformátoru proudu je připojeno jmenovité břemeno, jmenovitý zdánlivý výkon je 5 VA. Naměřený proud přístrojového transformátoru proudu je vyhodnocován podle úbytku napětí na břemeni.



Obr. 20 Přístrojový transformátor proudu použitý pro laboratorním měření [38]

Dalším přístrojem proudu, jehož parametry se budou ověřovat, je senzor proudu (obr. 21). Senzor proudu má následující parametry: třída přesnosti 0,5, jmenovitý transformační převod 80 A/0,150 V. Rogowského cívku v senzoru proudu lze použít i pro jisticí účely, parametry jisticí třídy přesnosti jsou 5P/630-A2.



Obr. 21 Senzor proudu použitý pro laboratorním měření

Jak je ve schématu zobrazeno, byla pro měření použita měřicí karta (obr. 22), ta zaznamenává všechny výstupní signály z jednotlivých přístrojů proudu a odporového bočnicku. Jedná se o měřicí kartu NATIONAL INSTRUMENTS, která je připojena do počítače, ve kterém dochází ke zpracování změřených dat. Změřená data z přístrojů proudu jsou zaznamenána a porovnána s výstupním signálem z odporového bočnicku. Záznam a zpracování signálů probíhá v programu LabView.



Obr. 22 Měřicí karta použitá pro laboratorním měření

Jako poslední přístroj byl použit klešťový multimetr UNI-T UT200A. Tento měřicí přístroj je připojen na primární vodič a používá se pro orientační měření procházejícího primárního proudu.

### 3.2 Vytvoření břemene transformátoru proudu

Důvody vytvoření břemena transformátoru proudu jsou následující. Břemeno transformátoru má specifickou hodnotu odporu a bylo třeba vytvořit odbočky pro měření. Dalším důvodem je, že odporový drát má vysoký výkon oproti rezistorovému zapojení.

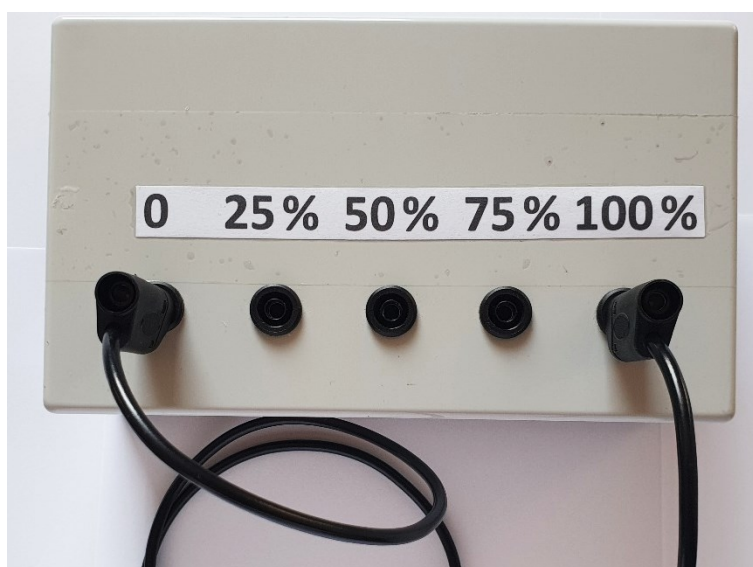
Pro vytvoření břemene bylo třeba následující parametry transformátoru proudu: jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru proudu a jmenovitý sekundární proud. Po úpravě rovnice a doplnění potřebných parametrů je vypočítána hodnota jmenovitého břemene. Konstrukci břemene tvoří odporový drát, instalační krabička, propojovací kabel a zdíčky, na které jsou připojeny odbočky odporového drátu, které mají požadovanou procentní hodnotu břemene. Pro výpočet břemene platí:

$$P_n = Z_n \cdot I^2 \Rightarrow Z_n = \frac{P_n}{I^2}$$

Pro náš případ má transformátor proudu jmenovitý zdánlivý výkon 5 VA a sekundární jmenovitý proud 5 A. Doplní-li se hodnoty do upravené rovnice:

$$Z_n = \frac{P_n}{I^2} = \frac{5}{5^2} = \frac{5}{25} = 0,2 \Omega$$

Jmenovité břemeno transformátoru proudu má hodnotu 0,2  $\Omega$ . Použitý materiál pro vytvoření břemene transformátoru je KANTAL A-1, který má následující parametry: délka odporového drátu 0,5 m, jmenovitý odpor drátu 0,46  $\Omega/\text{m}$ , přesnost odporu  $\pm 0,05 \Omega/\text{m}$ . Výrobce uvedený na balení ELCHEMCo spol. s. r. o.



Obr. 23 Břemeno přístrojového transformátoru proudu použité pro laboratorním měření

Nastavené hodnoty břemene respektují celkové zapojení břemene k přístrojovému transformátoru proudu. Tj. odpor přívodů k transformátoru proudu, přechodný odpor panelových zdírek, odpor propojovacího kabele, přechodný odpor svorkovnic odporových odboček a samotný odpor odporového drátu. Měření a nastavování hodnot odporových odboček probíhalo čtyř vodičovou metodou. Břemeno transformátoru proudu bylo připojeno na zdroj stejnosměrného proudu, kdy břemenem protékal proud o hodnotě 1 A. Úbytek napětí naměřený na vstupních svorkách břemene vyjadřuje skutečnou hodnotu odporu břemene. Vytvořené břemeno transformátoru je na obrázku obr. 23.

### 3.3 Vytvoření pomůcek pro měření na senzor proudu

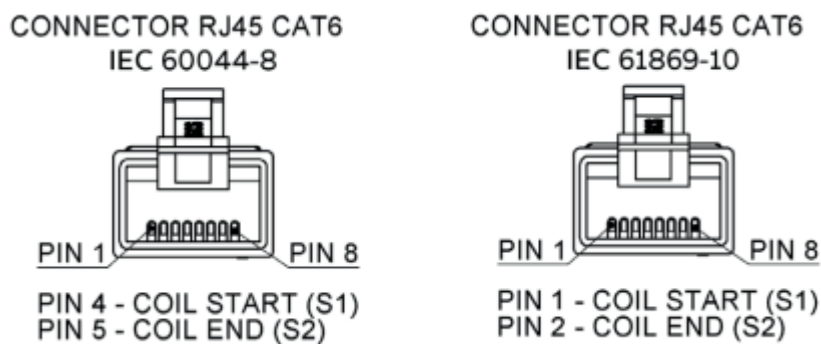
Výstupní kabel senzoru proudu má zakončení konektorem RJ 45. Toto řešení v praxi umožňuje rychlé připojení např. k elektrickým ochranám. Pro laboratorní měření je třeba vytvořit adaptér, který umožní připojit senzor proudu k měřicím zařízením. Pokud chceme senzor proudu otestovat, zda odpovídá dané třídě přesnosti, je třeba správného umístění primárního vodiče vůči oknu senzoru proudu. Toto správné umístění primárního vodiče je dosaženo nastavcem, který senzor proudu fixuje do požadované polohy.



### 3.3.1 Adaptér pro senzor proudu

Jak již bylo několikrát zmíněno, a lze si toho všimnout na obrázcích obr. 10 a) a obr. 10 b), výstupní signál senzoru proudu je veden v kabelu, který je zakončen konektorem RJ45. Pro měření je třeba vytvořit adaptér, který by umožnil připojení senzoru proudu na měřicí přístroj pomocí konektoru RJ45. Adaptér musí být použit hned z několika důvodů. Jedním z důvodů je, že výrobce senzorů nedoporučuje jakoukoliv úpravu výstupního kabelu, mohlo by dojít ke zkreslení měřených hodnot. Dalším a dost podstatným důvodem je použití senzoru proudu na jiné laboratorní úlohy. Např. odstraněním konektoru RJ45 by zamezilo jednoduchému připojení k elektrickým ochranám.

Adaptér pro připojení senzoru proudu tvoří zdířka RJ45, jejichž výstupní piny jsou připojeny na svorkovnici. Takové řešení umožňuje variabilitu připojení senzorů, např. u senzorů proudu se výstupní piny Rogowského cívky liší. Sensory proudu, které jsou označeny starou normou mají výstupní piny Rogowského cívky jiné, než senzory proudu označeny normou novou. Rozdílu si lze všimnout na obrázku obr. 24.

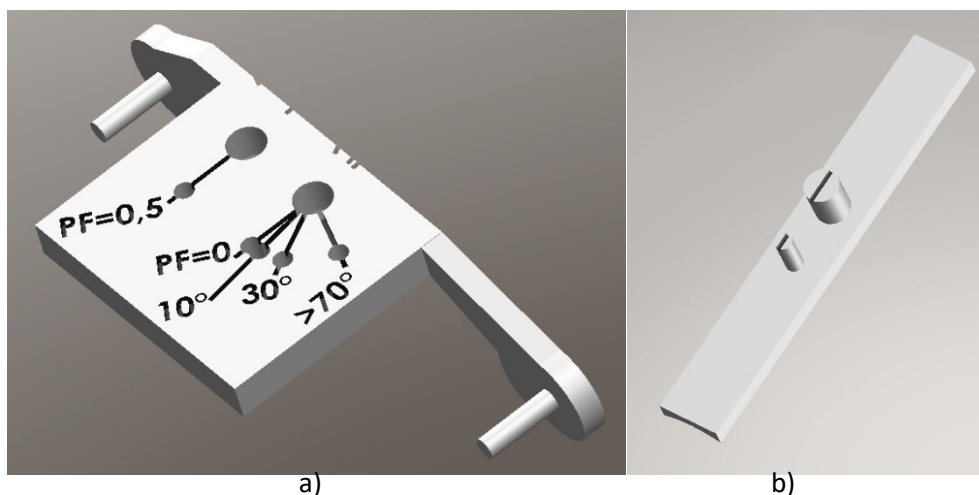


Obr. 24 Konektory senzorů proudu, vlevo konektor dle staré normy, vpravo konektor dle nové normy. [25]

Na obrázku obr. 24 jsou vyobrazeny výstupní piny ze senzorů proudu dle použité normy. Obrázek vlevo zobrazuje výstupní piny konektoru dle staré normy ČSN EN IEC 60044-8, na obrázku vpravo jsou výstupní piny konektoru dle nové normy ČSN EN IEC 61869-10. Na obrázku lze vidět popisek výstupních pinů obou variant, kdy COIL START značí začátek Rogowského cívky a COIL END značí konec Rogowského cívky.

### 3.3.2 Polohový nástavec pro uchycení primárního vodiče

Ověření třídy přesnosti senzoru proudu obsahuje senzor proudu testovat v daných polohách. Dle normy se bude senzor proudu testovat v několika polohách. První měření bude, když se bude měnit umístění primárního vodiče vůči oknu senzoru proudu. Druhé měření bude probíhat, když se bude měnit úhel mezi osou okna senzoru proudu a osou primárního vodiče.



Obr. 25 Ukázka polohového nastavce, a) nastavce na senzor proudu, b) nastavec na primární vodič

Proto, aby se měření dalo opakovat za stejných podmínek, bylo třeba vytvořit nastavec (obr. 25), který by senzor proudu fixoval v určité poloze po celou dobu měření. Umístění senzoru proudu vůči primárního vodiče je v normě označeno tzv. polohovým faktorem (position factor) PF. Polohový nastavec můžeme nastavit do několika poloh. První poloha je tehdy, když osa senzoru proudu a osa primárního vodiče splývá, označena jako PF = 0. Nastavení polohy na nastavci si můžeme všimnout na obrázku obr. 35 a).

Druhá poloha nastavce označena jako PF = 0,5 je tehdy, kdy umístění primárního vodiče není ve středu okna senzoru proudu. Přesné umístění senzoru proudu je vyznačeno na obrázku obr. 35 b). Pro tuto pozici je polohový faktor roven:

$$PF = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{max} + d_{min}} = \frac{63 - 21}{63 + 21} = 0,47 (-)$$

Třetí poloha nastavce, označená jako PF = 1 je tehdy, kdy se primární vodič dotýká okna senzoru proudu. Tato poloha je vyobrazena na obrázku obr. 35 c). Pro výpočet polohového faktoru:

$$PF = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{max} + d_{min}} = \frac{84 - 0}{84 + 0} = 1 (-)$$

U čtvrté polohy je primární vodič umístěn ve středu okna senzoru proudu a mění se úhel mezi osou okna senzoru proudu a osou primárního vodiče. Pro tuto polohu může být úhel do 10°, pro laboratorní úlohu byl úhel 9°. Zvolení úhlu je na obrázku obr. 36 a).

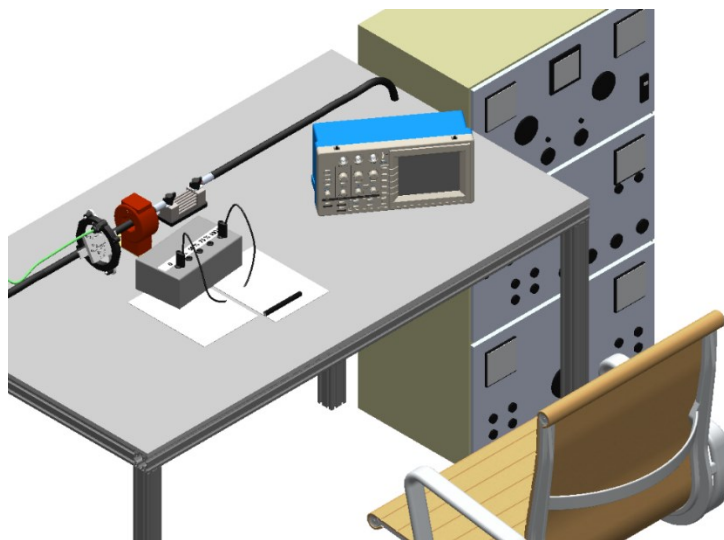
Pátá poloha mění úhel na 30°, tam je tedy měřena rozšířená třída přesnosti A3 (maximální úhel do 45°). Nastavení úhlu je na obrázku obr. 36 b).

Šestá, tedy poslední poloha mění úhel na 70°, tam je měřena závislost chyby na maximálním možném úhlu. Nastavení úhlu je na obrázku obr. 36 c).

Polohový nastavec byl vymodelován v programu SolidWorks a jako 3D model byl vytisknut pomocí 3D tiskárny. Použitý materiál pro tisk je PLA v bílé barvě od výrobce Filament PM. Tisk probíhal na 3D tiskárně ENDER 3 od výrobce Creality. Označení poloh a nápisy byly vybarveny černou barvou pro lepší viditelnost. Obrázky pro ukázkou byly vytvořeny z 3D modelu v programu SolidWorks, jedná se o detailnější pohled na polohový nastavec. Skutečný polohový nastavec je na obrázku obr. 18.

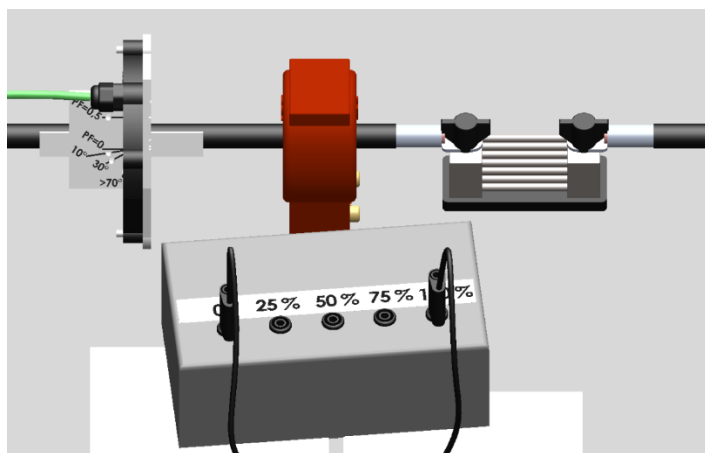
### 3.4 Návrh laboratorního stanoviště

Návrh laboratorního stanoviště ukazuje rozmístění přístrojů proudu spolu s jednofázovým proudovým zdrojem. Jedná se pouze o návrh, umístění samotných přístrojů proudu, měřicích přístrojů a jednofázového zdroje proudu není konečné. Rozmístění se bude měnit podle potřeb a praktičnosti obsluhy. Modely použity v obrázcích níže odpovídají své životní velikosti.



Obr. 26 Návrh laboratorního stanoviště

Na obrázcích níže (obr. 26 a obr. 27) v zapojení chybí klešťový multimetr, ten je součástí zapojení a do měřeného obvodu je při měření přidán, jeho umístění se může měnit dle potřeby. Na obrázcích je vyobrazen osciloskop místo měřicí karty s počítačem. Tento návrh počítá i se záměnou měřicí karty s osciloskopem.



Obr. 27 Detail laboratorního stanoviště (detail přístrojů proudu)

Na obrázku obr. 27 si lze všimnout zapojení přístrojů dle schématického zapojení (obr. 37). Zapojení obsahuje odporový bočník, přístrojový transformátor proudu spolu s nastavitelným břemenem a senzor proudu s polohovým nastavcem.

Pro vytvoření laboratorního stanoviště mohou být z modelu vytvořeny výkresy pro samotnou konstrukci. Výkres by obsahoval i soupis použitého materiálu. Pro vytvoření modelu laboratorního stanoviště byl použit program SolidWorks.

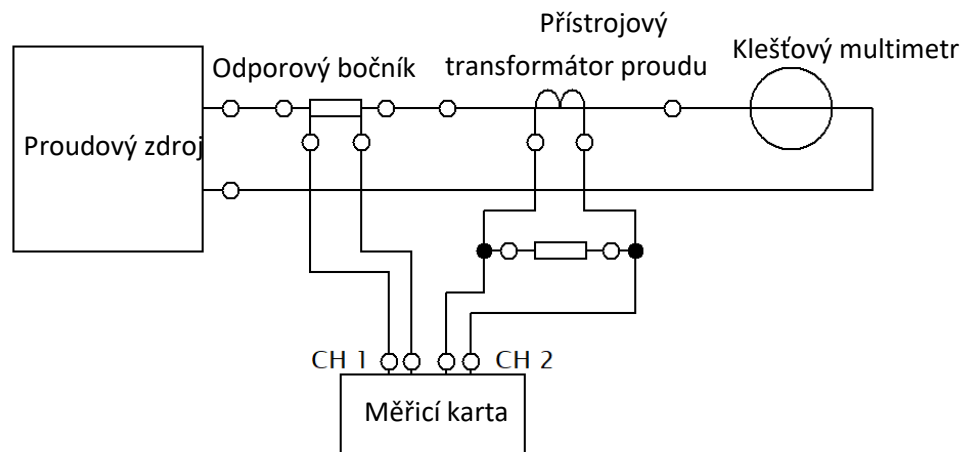
## 4 Praktická realizace laboratorní úlohy

Měření laboratorní úlohy a referenční měření probíhalo v laboratoři EB105 v budově Fakulty elektrotechniky a informatiky Vysoké školy Báňské. Ve zmíněné laboratoři se nachází proudový zdroj, který dokáže dodat požadovaný měřicí proud.

### 4.1 Referenční měření

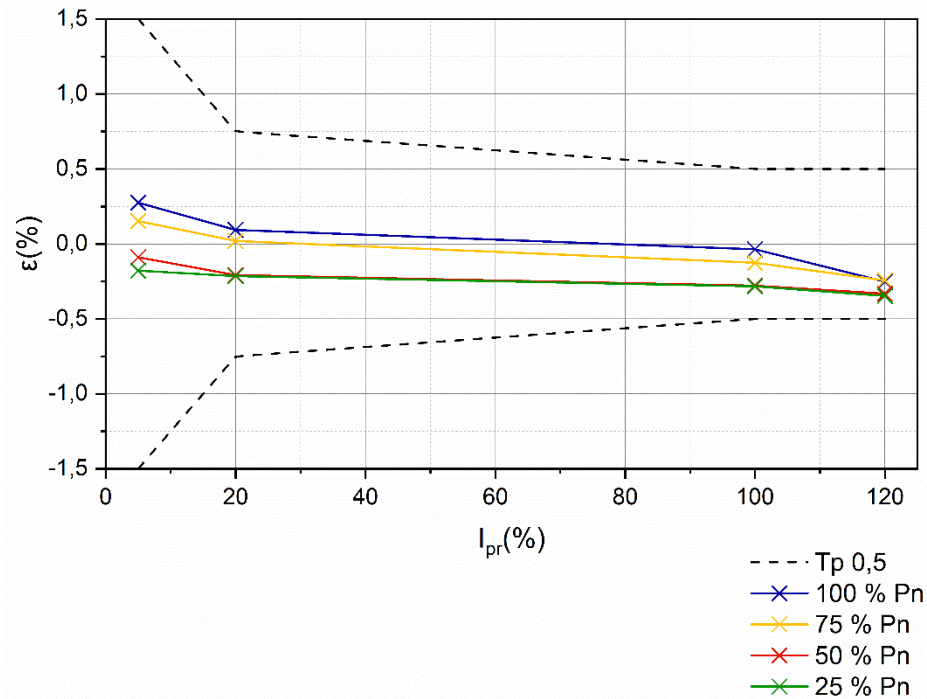
Referenční měření proběhlo dne 30.11.2021 za účelem odzkoušení proudového zdroje a všech vytvořených pomůcek pro následné laboratorní měření. Pro referenční měření se ověřoval přístrojový transformátor proudu s těmito parametry, třída přesnosti transformátoru 0,5 a transformačním převodem 1 A/1 A. Na sekundární/výstupní svorky transformátoru proudu je připojeno jmenovité břemeno, jmenovitý zdánlivý výkon je 0,5 VA. Lze si všimnout, že převod přístrojového transformátoru proudu je nestandardní, jedná se tedy o speciálně vyrobený transformátor proudu pro ukázkou funkcí ochran při nízkých primárních proudech.

Při referenčním měření byl použit proudový zdroj, odporový bočník, testovaný přístrojový transformátor proudu, vytvořené břemeno transformátoru a osciloskop pro záznam měření. Schéma zapojení referenčního měření je vyobrazeno na obrázku obr. 28.



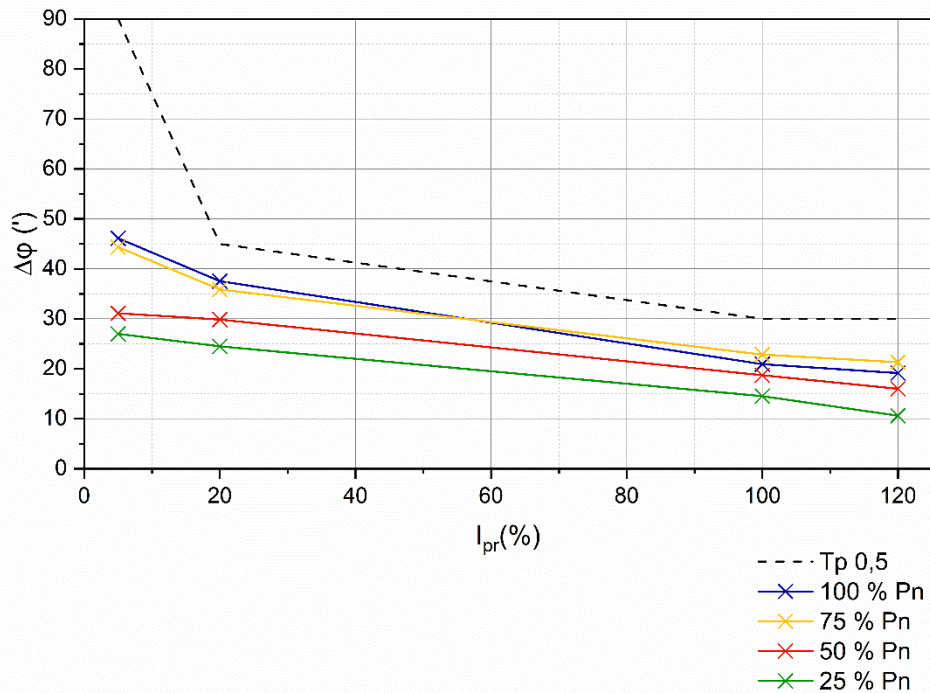
Obr. 28 Schéma zapojení referenčního měření

Přístrojový transformátor proudu použitý pro referenční měření podstoupil sérii měření, pro kontrolu třídy přesnosti, která je uvedena výrobcem. Dle normy ČSN EN 61869 – 2 bude testován 5 %, 20 %, 100 % a 120 % jmenovitého primárního proudu, kdy hodnota chyby převodu a chyby úhlu musí být v zadané toleranci viz. tabulka tab. 1. Na přístrojovém transformátoru proudu byla rovněž měřena závislost chyb na velikosti břemene. Výsledky měření jsou graficky znázorněny na obrázcích obr. 29 a obr. 30.



Obr. 29 Chyba převodu transformátoru proudu použitým při referenčního měření

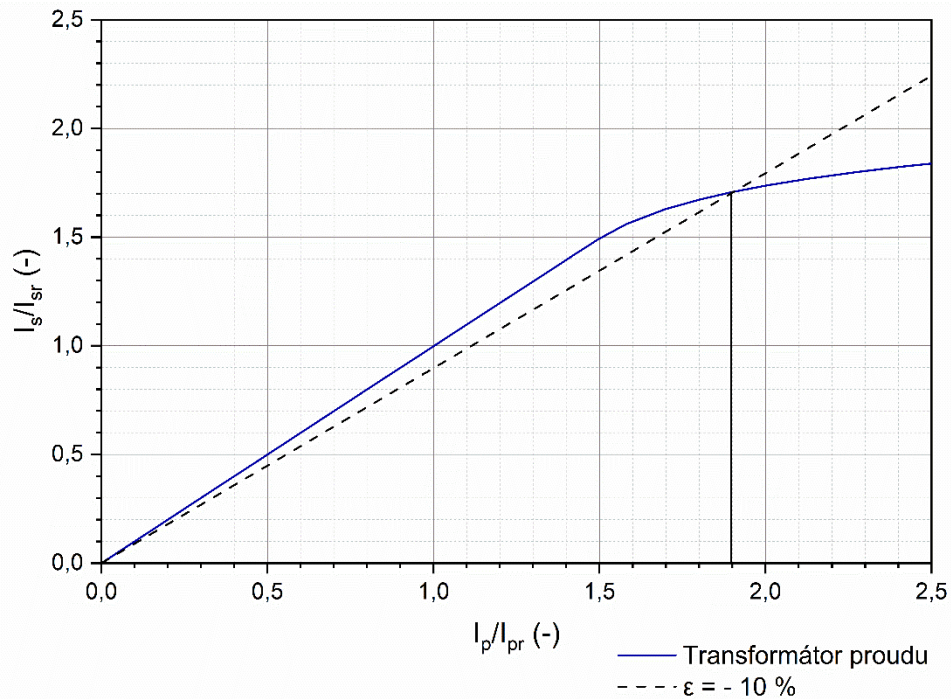
Na obrázku obr. 29 je grafické znázornění chyb převodu testovaného přístrojového transformátoru proudu. Meze třídy přesnosti 0,5 jsou vyznačeny černými přerušovanými čarami, mezi nimiž je pole dovolených chyb. Pokud by naměřená hodnota byla mimo pole dovolených chyb, přístrojový transformátor proudu by neodpovídal své třídě přesnosti. Meze dovolených chyb převodu jsou uvedeny v tabulce tab. 1. Tmavě modrá křivka označená jako 100 %  $P_n$  spojuje body, ve kterých byla změřena chyba převodu, kdy na výstupních/sekundárních svorkách transformátoru proudu bylo připojeno jmenovité břemeno. Ostatní křivky taktéž spojí body, ve kterých byly změřeny chyby převodu. Označení u jednotlivých křivek určuje procentní hodnotu jmenovitého břemena připojenou na výstupní svorky. Např. označení u červené křivky 50 %  $P_n$  uvádí, že tyto body (chyby převodu) byly změřeny tehdy, kdy na výstupní/sekundární svorky transformátoru proudu byla připojena poloviční hodnota jmenovitého břemene.



Obr. 30 Chyba úhlu přístrojového transformátoru proudu použitým při referenčního měření

Obrázek obr. 30 znázorňuje chyby úhlu testovaného přístrojového transformátoru proudu. Na obrázku je vyznačena jen kladná polovina pole dovolených chyb, a to z důvodu, že všechny změřené chyby úhlu měly kladnou hodnotu. Zobrazení záporného pole dovolených chyb by bylo zbytečné. Tak, jako na předešlém obrázku je černou čárkovanou čarou znázorněna mez třídy přesnosti 0,5. Označení křivek změřených chyb úhlu je pak stejné, jako na obrázku obr. 29.

Výsledky referenčního měření chyby převodu a chyby úhlu jsou zobrazeny na obrázcích obr. 29 a obr. 30. Ze změřených dat na obrázcích lze říci, že nejvyšší chyby převodu se dosáhlo, když testovaný proud dosahoval 120 % jmenovitého primárního proudu transformátoru a na výstupních svorkách byla připojena 25% hodnota jmenovitého břemena. Nejvyšší chyba převodu měla hodnotu  $\varepsilon_i = 0,347 \%$ . Nejvyšší chyba úhlu,  $\delta_i = 46,123'$  byla tehdy, když testovaný proud měl hodnotu 5% jmenovitého primárního proudu a na výstupní svorky byla připojena jmenovitá zátěž. Výsledky referenčního měření potvrdily, že testovaný přístrojový transformátor proudu splňuje všechny meze třídy přesnosti 0,5 (dle normy ČSN EN 61869-2, viz tabulka tab. 1).



Obr. 31 Nadproudová charakteristika přístrojového transformátoru použitým při referenčního měření

Na přístrojovém transformátoru proudu bylo také určeno nadproudové číslo. Nadproudové číslo definuje násobek jmenovitého primárního proudu, při němž chyba proudu dosáhne 10 %. Hodnota nadproudového čísla u měřicích transformátorů proudu je nejčastěji menší jak 5, a to z důvodu chránění měřicích přístrojů proti škodlivým účinkům nadproudu v síti. Hodnota nadproudového čísla testovaného transformátoru proudu je 1,9, jeho hodnota byla odečtena z grafu na obrázku obr. 31.

## 4.2 Laboratorní měření

Přístroje proudu budou podrobeny sérii měření. Jako první se bude ověřovat třída přesnosti uvedená na štítcích zařízení. Na přístrojovém transformátoru proudu bude rovněž měřen vliv velikosti připojeného břemene na chybu převodu. Na senzoru proudu, bude měřen vliv umístění senzoru proudu vůči měřenému vodiči na chybu převodu. Jako poslední měření bude určení nadproudového čísla obou přístrojů proudu.

Zapojení přístrojů pro měření třídy přesnosti je dle schématu na obrázku obr. 37. Nastavení přístrojů pro první měření je následující. Na výstupní svorky přístrojového transformátoru proudu je připojeno jmenovité břemeno. Senzor proudu je na vodič umístěn tak, aby jeho umístění odpovídalo polohovému faktoru,  $PF = 0$ . To je umístění vodiče do středu okna senzoru proudu (viz. obr. 35 a)). Testovací proud z proudového zdroje bude postupně zvyšován od 0 A až po hodnotu proudu, rovnající se 120 % jmenovitého primárního proudu přístrojového transformátoru proudu. Vybraná data změřená měřicí kartou jsou doplněna do tabulky tab. 8.

Tab. 8 Tabulka naměřených hodnot pro první měření

$I_{pr}$ (A)	Odporový bočník		Senzor proudu		Transformátor proudu	
	$\Delta U_R$ (mV)	$I_p$ (A)	Polohový faktor (-)	$U_{sp}$ (mV)	Procento jmenovitého břemene	$\Delta U_{R_{tp}}$ (mV)
$\sim 5 \% I_n$	1,168	5,840	PF = 0	11,032	100 %	60,41
$\sim 20 \% I_n$	4,183	20,915		39,412		217,76
$\sim 100 \% I_n$	20,173	100,865		189,882		1057,94
$\sim 120 \% I_n$	24,051	120,255		226,472		1086,62

**Příklad výpočtu:**

Zadané parametry:  $R_{ob} = 0,2 \text{ m}\Omega$ ,

$$I_p = \frac{\Delta U_R}{R_{ob}} = \frac{4,183 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 20,915 \text{ A}$$

Dalším měřením je, kdy na přístrojový transformátor proudu je připojena 75% hodnota jmenovitého břemene. Umístění senzoru proudu vůči primárnímu vodiči odpovídá polohovému faktoru PF = 0,5. Měření probíhá stejným postupem, tedy testovací proud z proudového zdroje je postupně zvyšován z 0 A do 120 % jmenovitého primárního proudu přístrojového transformátoru proudu. Změřená data jsou poté doplněna do tabulky tab. 9.

Tab. 9 Tabulka naměřených hodnot pro druhé měření

$I_{pr}$ (A)	Odporový bočník		Senzor proudu		Transformátor proudu	
	$\Delta U_R$ (mV)	$I_p$ (A)	Polohový faktor (-)	$U_{sp}$ (mV)	Procento jmenovitého břemene	$\Delta U_{R_{tp}}$ (mV)
$\sim 5 \% I_n$	1,148	5,740	PF = 0,5	10,712	75 %	44,806
$\sim 20 \% I_n$	4,443	22,215		41,807		176,677
$\sim 100 \% I_n$	20,194	100,970		190,044		808,430
$\sim 120 \% I_n$	24,153	120,765		227,410		967,230

**Příklad výpočtu:**

Zadané parametry:  $R_{ob} = 0,2 \text{ m}\Omega$ ,

$$I_p = \frac{\Delta U_R}{R_{ob}} = \frac{4,443 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 20,215 \text{ A}$$

Nastavení přístrojů proudu pro toto měření je: Na výstupní svorky přístrojového transformátoru proudu je připojena 50% hodnota jmenovitého břemena. Okno senzoru proudu a primární vodič se dotýkají, toto umístění odpovídá polohovému faktoru PF = 1. Průběh nastavování testovacího proudu je stejný jako v předešlém měření. Změřená data jsou doplněna do tabulky Tab. 10.



Tab. 10 Tabulka naměřených hodnot pro třetí měření

$I_{pr}$ (A)	Odporový bočník		Senzor proudu		Transformátor proudu	
	$\Delta U_R$ (mV)	$I_p$ (A)	Polohový faktor (-)	$U_{sp}$ (mV)	Procento jmenovitého břemene	$\Delta U_{R_{tp}}$ (mV)
$\sim 5\% I_n$	1,116	5,580	PF = 1	10,511	50 %	30,712
$\sim 20\% I_n$	4,289	21,445		38,528		112,759
$\sim 100\% I_n$	20,487	102,435		191,365		560,532
$\sim 120\% I_n$	24,269	121,345		226,815		663,873

**Příklad výpočtu:**

Zadané parametry:  $R_{ob} = 0,2 \text{ m}\Omega$ ,

$$I_p = \frac{\Delta U_R}{R_{ob}} = \frac{4,289 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 21,445 \text{ A}$$

Pro toto měření je na výstupní svorky přístrojového transformátoru proudu připojena 25% hodnota jmenovitého břemena. U senzoru proudu je primární vodič umístěn do středu okna, mění se jen tzv. maximální úhel (pro lepší znázornění obr. 36 a)). Maximální úhel, tedy úhel mezi osou okna senzoru a osou primárního vodiče je  $9^\circ$ . Na polohovém nastavci označena jako „ $10^\circ$ “. Průběh testovacího proudu je stejný jako v předešlých měřeních. Změřená data jsou doplněna do tabulky tab. 11.

Tab. 11 Tabulka naměřených hodnot pro čtvrté měření

$I_{pr}$ (A)	Odporový bočník		Senzor proudu		Transformátor proudu	
	$\Delta U_R$ (mV)	$I_p$ (A)	Maximální úhel ( $^\circ$ )	$U_{sp}$ (mV)	Procento jmenovitého břemene	$\Delta U_{R_{tp}}$ (mV)
$\sim 5\% I_n$	1,006	5,030	$10^\circ$	9,472	25 %	14,556
$\sim 20\% I_n$	3,657	18,285		34,074		52,011
$\sim 100\% I_n$	20,268	101,340		190,746		288,030
$\sim 120\% I_n$	24,573	122,865		231,235		349,035

**Příklad výpočtu:**

Zadané parametry:  $R_{ob} = 0,2 \text{ m}\Omega$ ,

$$I_p = \frac{\Delta U_R}{R_{ob}} = \frac{3,657 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 18,285 \text{ A}$$

Další měření se týká pouze senzoru proudu. Mění se maximální úhel z  $9^\circ$  na  $30^\circ$ , a potom na  $70^\circ$ , tomu odpovídá poloha na nastavci označena jako „ $30^\circ$ “ a „ $70^\circ$ “. Výstupní svorky přístrojového transformátoru proudu se během měření nerozpojují, nebo nejsou odpojeny. Vždy musí být na výstupních svorkách transformátoru proudu připojeno břemeno. Testovací proud se nastavuje stejně jako u předešlých měření. Změřená data jsou doplněna do tabulky tab. 12.

Tab. 12 Tabulka naměřených hodnot pro páté a šesté měření

$I_{pr}$ (A)	Odporový bočník		Senzor proudu		Odporový bočník		Senzor proudu	
	$\Delta U_R$ (mV)	$I_p$ (A)	Maximální úhel	$U_{sp}$ (mV)	$\Delta U_R$ (mV)	$I_p$ (A)	Maximální úhel	$U_{sp}$ (mV)
$\sim 5\% I_n$	1,147	5,735	30°	10,789	1,277	6,385	70°	11,900
$\sim 20\% I_n$	4,349	21,745		40,958	4,049	20,245		37,864
$\sim 100\% I_n$	20,018	100,090		188,592	19,969	99,845		187,111
$\sim 120\% I_n$	23,947	119,735		225,639	24,014	120,070		224,775

**Příklad výpočtu:**

Zadané parametry:  $R_{ob} = 0,2 \text{ m}\Omega$ ,

$$I_p = \frac{\Delta U_R}{R_{ob}} = \frac{4,349 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 21,745 \text{ A}$$

Jako poslední měření se určuje nadproudové číslo přístrojů proudu. Pro toto měření je na přístrojový transformátor proudu připojena 100% hodnota jmenovitého břemena. Senzor proudu je umístěn tak, aby jeho poloha odpovídala polohovému faktoru  $PF = 0$ . Testovací proud z proudového zdroje bude postupně zvyšován od 0 A až po 280 A. Změřená data jsou součástí přílohy (příloha č. 1) to je z důvodů vysokého objemu dat, který není možno vložit do tabulky.

## 5 Vypracování návodu měření a vzorového protokolu

Návod měření slouží pro správné měření navržené laboratorní úlohy. Obsahuje popis praktického zapojení laboratorní úlohy, návod na ovládání jednofázového zdroje proudu a nastavení pomůcek přístrojů proudu.

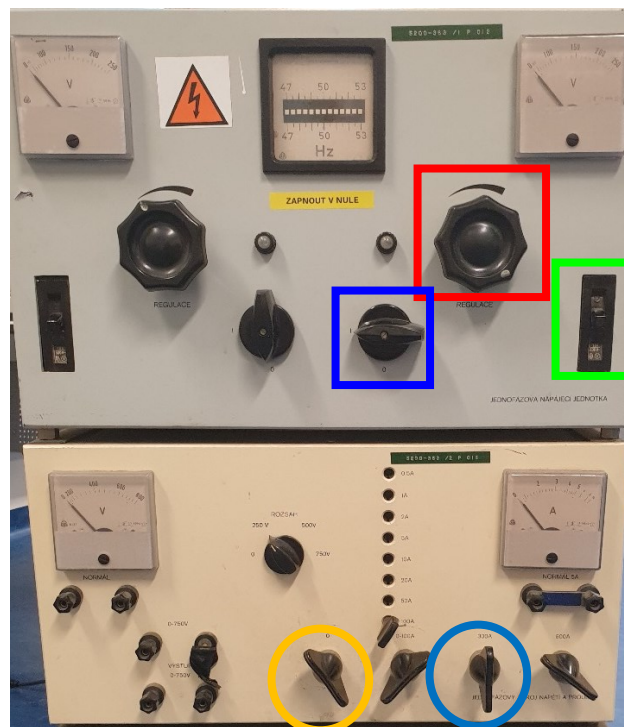
Vzorově vypracovaný protokol obsahuje zadání, schéma zapojení, tabulky s naměřenými a vypočtenými hodnotami, grafy, vypracované kontrolní otázky a závěr.

### 5.1 Návod k měření

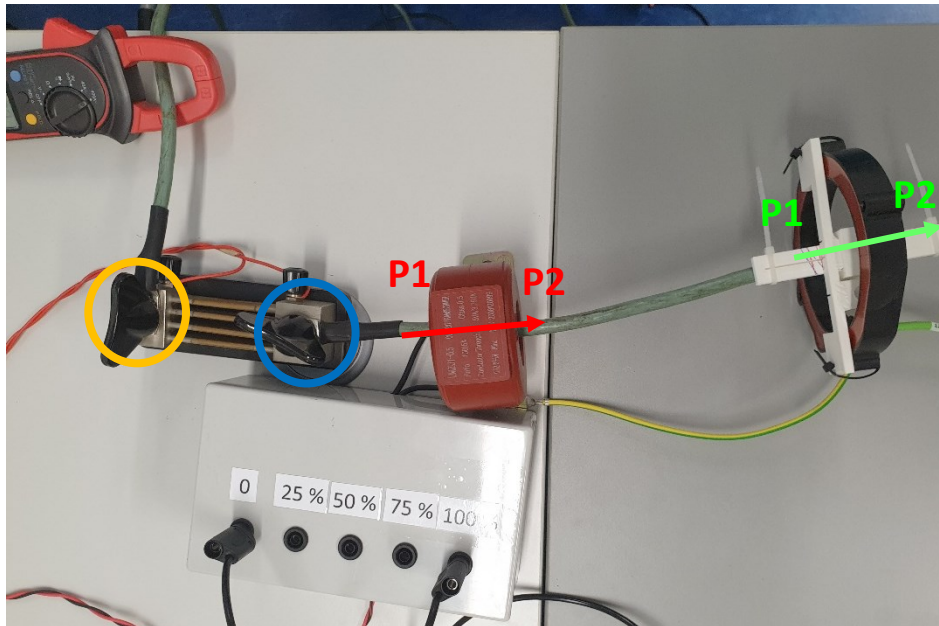
Níže uvedený návod měření obsahuje postup praktického zapojení laboratorní úlohy. Dále obsahuje popis jednofázového zdroje proudu a jeho uvedení do provozního stavu. Nastavení břemene přístrojového transformátoru proudu pro měření. Praktické nastavení poloh pro měření na senzoru proudu. V poslední části návodu k měření je podrobně vysvětlen postup měření.

#### 5.1.1 Zapojení laboratorní úlohy a ovládání proudového zdroje

Měření pro laboratorní úlohu je zapojeno dle schématu na obrázku obr. 37. Praktické zapojení laboratorní úlohy je na obrázku výše obr. 18, tato kapitola se zabývá návodem pro zapojení laboratorní úlohy a ovládání proudového zdroje.



Obr. 32 Popis jednofázového proudového zdroje napětí a proudu



Obr. 33 Popis zapojení přístrojů proudu

#### Postup zapojení laboratorní úlohy:

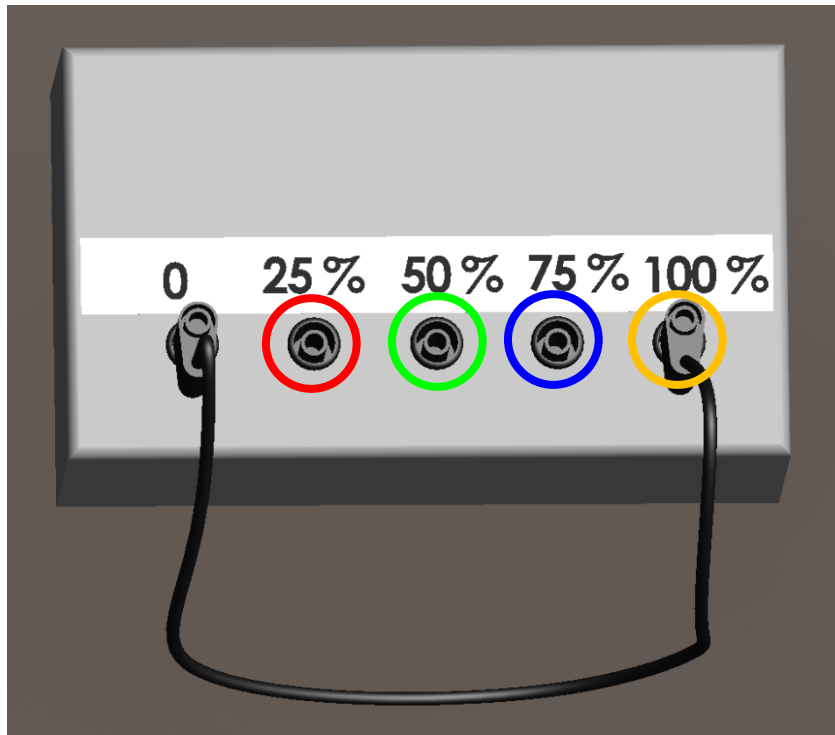
1. Na svorku, která se nachází na spodním panelu proudového zdroje připojíme jeden z konců primárního vodiče. Tato svorka je na panelu proudového zdroje označena jako „0“, na obrázku obr. 32 je svorka označena žlutým kružkem.
2. Druhý konec primárního vodiče je připojen na svorku odporového bočnicku. Použitá svorka odporové bočnicku je na obrázku obr. 33 označena žlutým kružkem.
3. Druhým primárním vodičem propojíme svorku odporového bočnicku (světle modrý kružek na obrázku obr. 33) a svorku proudového zdroje označenou jako „300 A“. Svorka proudového zdroje je označena na obrázku obr. 32 světle modrým kružkem.
4. Šipky a popisek na obrázku obr. 33 označují směr průchodu primárního proudu a primární svorky přístrojů proudu.

#### Popis ovládání jednofázového zdroje proudu a napětí:

1. Jako první je třeba zjistit stav zabudované jisticí ochrany proudového zdroje, elektrický jistič je označen zeleným čtvercem na obrázku obr. 32. Pokud se nachází v poloze vypnuto, je třeba jej zapnout.
2. Samotné zapnutí jednofázového proudového zdroje probíhá otočným vypínačem, který je vyznačený modrým čtvercem na obrázku obr. 32. Proudový zdroj se zapne otočením vypínače do polohy označené jako „1“ (viz. obr. 32) a vypne otočením vypínače do polohy „0“. Zapnutí proudového zdroje indikuje rozsvícená doutnavka nad otočným vypínačem.
3. Nastavení testovacího proudu primárního vodiče se nastavuje pomocí otočného knoflíku. Otočný knoflík je vyznačen červeným čtvercem na obrázku obr. 32.
4. Procházející proud je orientačně kontrolován na klešťovém multimetru UNI-T UT202.

### 5.1.2 Nastavení břemene přístrojového transformátoru proudu

Nastavení potřebné hodnoty břemene probíhá pomocí propojovacího vodiče. Při měření přístrojového transformátoru proudu musí být vždy na výstupní svorky připojeno břemeno, nebo musejí být výstupní svorky transformátoru proudu připojeny nakrátko. Panelová zdířka označená jako „0“ musí být vždy při měření s břemenem připojena k jednomu z konců propojovacího vodiče. Druhým koncem propojovacího vodiče se nastavuje potřebná hodnota břemene přístrojového transformátoru proudu.



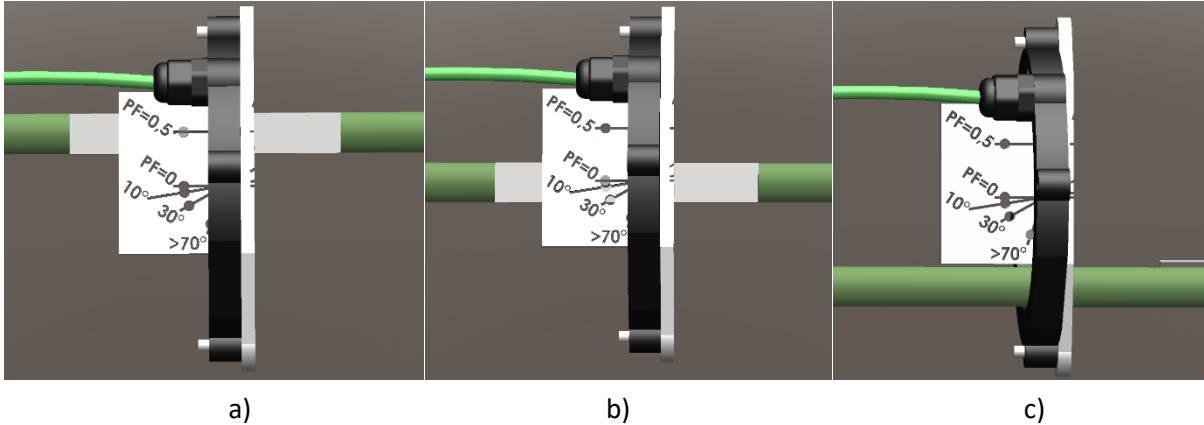
Obr. 34 3D model břemene přístrojového transformátoru proudu

#### Popis nastavení jednotlivých hodnot břemene:

1. Nastavení 100 % břemene. Jeden z konců propojovacího vodiče připojíme na panelovou zdířku označenou jako „0“, druhý konec propojovacího vodiče připojíme na panelovou zdířku označenou jako „100 %“, na obrázku obr. 34 označeno žlutým kroužkem.
2. Nastavení 75 % břemene. Jeden z konců propojovacího vodiče připojíme na panelovou zdířku označenou jako „0“, druhý konec propojovacího vodiče připojíme na panelovou zdířku označenou jako „75 %“, na obrázku obr. 34 označeno modrým kroužkem.
3. Nastavení 50 % břemene. Jeden z konců propojovacího vodiče připojíme na panelovou zdířku označenou jako „0“, druhý konec propojovacího vodiče připojíme na panelovou zdířku označenou jako „50 %“, na obrázku obr. 34 označeno zeleným kroužkem.
4. Nastavení 25 % břemene. Jeden z konců propojovacího vodiče připojíme na panelovou zdířku označenou jako „0“, druhý konec propojovacího vodiče připojíme na panelovou zdířku označenou jako „25 %“, na obrázku obr. 34 označeno červeným kroužkem.

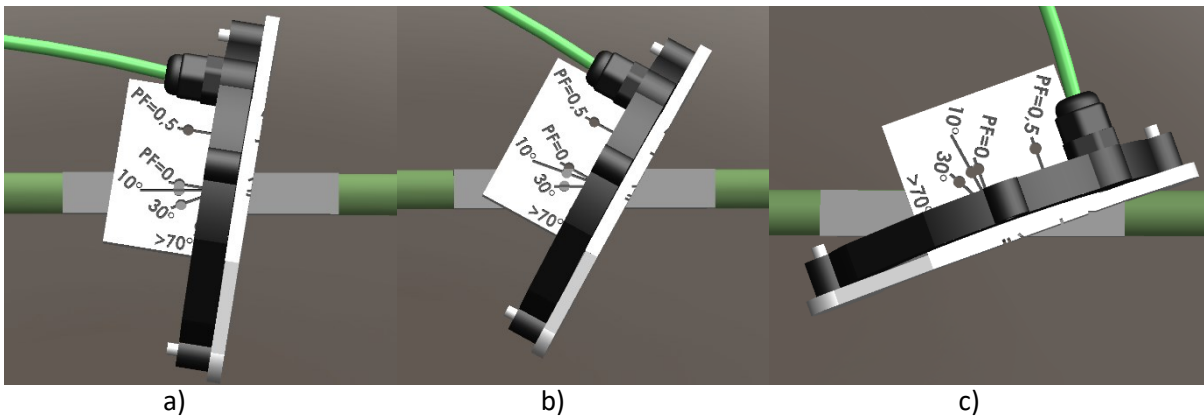
### 5.1.3 Nastavení polohového nastavce senzoru proudu

Polohový nastavec se skládá ze dvou částí: první část je připevněna na primární vodič a druhá je připevněna na senzoru proudu. Nastavování polohy senzoru proudu vůči primárnímu vodiči se děje pomocí kolíčků na nastavci primárního vodiče a děr na nastavci připevněného na senzoru proudu.



Obr. 35 Umístění senzoru proudu a primárního vodiče pro a)  $PF = 0$  b)  $PF = 0,5$  c)  $PF = 1$

Na obrázku obr. 35 jsou zobrazeny všechny polohy senzoru proudu pro  $PF = 0$ ,  $PF = 0,5$  a  $PF = 1$ . Poloha senzoru proudu vůči primárnímu vodiči  $PF = 1$  není na nastavci nijak vyznačena. Jedná se o polohu, kdy se senzor proudu a primární vodič dotýkají. Tato poloha je vyznačena na obrázku obr. 35 c).



Obr. 36 Umístění senzoru proudu a primárního vodiče pro a) úhel =  $10^\circ$  b) úhel =  $30^\circ$  c) úhel =  $70^\circ$

Pro úhlové nastavení senzoru proudu vůči primárnímu vodiči jsou na nastavci označeny tyto polohy: „ $10^\circ$ “, „ $30^\circ$ “ a „ $70^\circ$ “. Jednotlivé polohy jsou vyobrazeny na obrázku obr. 36.

### 5.1.4 Podrobný postup měření

1. Na proudovém zdroji dejte kolečko na „0“ polohu, kdy na klešťovém multimetru není zobrazen žádný protékající proud primárním vodičem.
2. Nastavení přístrojů pro **ověření třídy přesnosti** je následující. Na břemeni přístrojového transformátoru proudu připojte zdířku, která je označena „100 %“. Nástavec senzoru proudu umístěte do polohy označené jako „PF = 0“. Zapněte nahrávání měřených dat na měřicí kartě, či osciloskopu.
3. Ověřte, zda je zapojení dle schématu a přístrojový transformátor proudu má připojenou potřebnou hodnotu břemene. Poté pomalu zvyšujte hodnotu proudu otočným knoflíkem na proudovém zdroji obr. 32. Primární proud (testovací proud z proudového zdroje) povolna (po 5 A) s krátkými přestávkami (1s) zvyšujte, až do hodnoty 120 A. Hodnotu procházejícího proudu ověřujte na klešťovém multimetru, připojeném na primárním vodiči. Po dosažení požadované hodnoty proudu, snižujte proud otočným knoflíkem na proudovém zdroji až hodnota procházejícího proudu bude téměř nulová (hodnotu proudu ověřujte na klešťovém multimetru). Následně vypněte nahrávání měřených dat.
4. Změňte nastavení přístrojů. Na břemeni přístrojového transformátoru proudu připojte zdířku, která je označena „75 %“. Nástavec senzoru proudu umístěte do polohy označené jako „PF = 0,5“ a zapněte nahrávání měřených dat na měřicí kartě, či osciloskopu.
5. Znovu ověřte, zda je na přístrojovém transformátoru proudu připojena správná hodnota břemene. Měření opakujte podle 3. bodu.
6. Změňte nastavení přístrojů. Na břemeni přístrojového transformátoru proudu připojte zdířku, která je označena „50 %“. Senzor proudu umístěte tak, aby se primární vodič přímo dotýkal těla senzoru proudu (PF = 1) obr. 35 c). Zapněte nahrávání měřených dat na měřicí kartě, či osciloskopu.
7. Znovu ověřte, zda je na přístrojovém transformátoru proudu připojena správná hodnota břemene. Měření opakujte podle 3. bodu.
8. Změňte nastavení přístrojů. Na břemeni přístrojového transformátoru proudu připojte zdířku, která je označena „25 %“. Nástavec senzoru proudu umístěte do polohy označené jako „10“ a zapněte nahrávání měřených dat na měřicí kartě, či osciloskopu.
9. Znovu ověřte, zda je na přístrojovém transformátoru proudu připojena správná hodnota břemene. Měření opakujte podle 3. bodu.
10. Změňte nastavení přístrojů. Na břemeni přístrojového transformátoru proudu připojte zdířku, která je označena „25 %“. Nástavec senzoru proudu umístěte do polohy označené jako „30“ a zapněte nahrávání měřených dat na měřicí kartě, či osciloskopu.
11. Znovu ověřte, zda je na přístrojovém transformátoru proudu připojena správná hodnota břemene. Měření opakujte podle 3. bodu.
12. Změňte nastavení přístrojů. Na břemeni přístrojového transformátoru proudu připojte zdířku, která je označena „25 %“. Nástavec senzoru proudu umístěte do polohy označené jako „70“ a zapněte nahrávání měřených dat na měřicí kartě, či osciloskopu.
13. Znovu ověřte, zda je na přístrojovém transformátoru proudu připojena správná hodnota břemene. Měření opakujte podle 3. bodu.
14. Nastavení přístrojů proudu pro **určení nadproudového čísla** je následující. Na břemeni přístrojového transformátoru proudu připojte zdířku, která je označena „100 %“.

Nástavec senzoru proudu umístěte do polohy označené jako „PF = 0“ a zapněte nahrávání měřených dat na měřicí kartě, či osciloskopu.

15. Ověřte, zda je zapojení dle schématu a přístrojový transformátor proudu má připojenou potřebnou hodnotu břemene. Poté pomalu zvyšujte hodnotu proudu otočným knoflíkem na proudovém zdroji obr. 32. Primární proud pozvolna (po 5 A) s krátkými přestávkami (1s) zvyšujte, až do hodnoty 280 A. Hodnotu procházejícího proudu ověřte na klešťovém multimetru, připojeném na primárním vodiči. Po dosažení požadované hodnoty proudu, snižte proud otočným knoflíkem na proudovém zdroji až hodnota procházejícího proudu bude téměř nulová (hodnotu proudu ověřte na klešťovém multimetru). Následně vypněte nahrávání měřených dat.

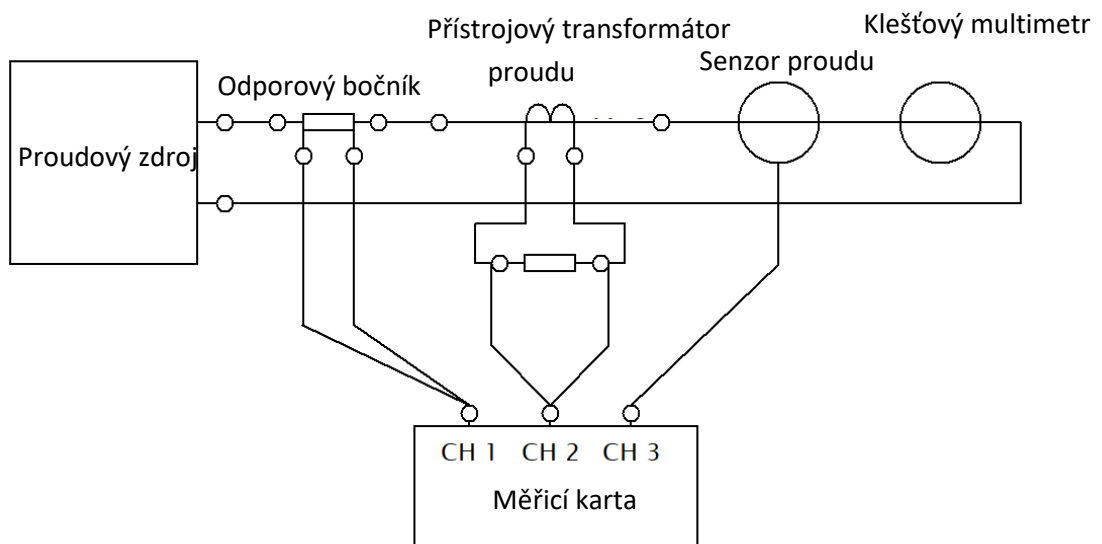


## 5.2 Vzorový protokol

### 5.2.1 Zadání

1. Zapojte laboratorní úlohu podle schématu na obrázku obr. 37.
2. Ověřte, zda přístroje proudu odpovídají své třídě přesnosti a výsledky vykreslete v grafu.
3. Změřte a vypočtete chyby přístrojového transformátoru proudu v zadaných hodnotách břemene a výsledky vynesete do grafu.
4. Změřte a vypočtete chyby senzoru proudu v zadaných polohách vůči primárnímu vodiči a výsledky vynesete do grafu.
5. Určete nadproudivé číslo měřených přístrojů proudu a výsledky vynesete do grafu.
6. Vyhodnoťte výsledky měření.

### 5.2.2 Schéma zapojení



Obr. 37 Schéma zapojení laboratorní úlohy

### 5.2.3 Postup měření

Laboratorní úloha má několik dílčích měření, které probíhají zároveň. Prvním měřením se ověřuje třída přesnosti přístrojů proudu, druhé měření je pro určení chyb převodu přístrojového transformátoru proudu v zadaných hodnotách břemene, další měření určuje chyby převodu senzoru proudu v zadaných polohách vůči primárnímu vodiči. Poslední měření je proto, aby se určilo nadproudové číslo použitých přístrojů proudu.

První měření, ověření třídy přesnosti přístrojů proudu:

- Připojené břemeno transformátoru proudu: **100 %**
- Poloha senzoru proudu vůči primárnímu vodiči: **PF = 0**
- Rozsah testovacího proudu: **0 – 120 A** (proud zvyšovat po 5 A s krátkými přestávkami 1s)

Druhé měření, určení závislosti chyb přístrojů proudu:

- Připojené břemeno transformátoru proudu: **75 %**
- Poloha senzoru proudu vůči primárnímu vodiči: **PF = 0,5**
- Rozsah testovacího proudu: **0 – 120 A** (proud zvyšovat po 5 A s krátkými přestávkami 1s)

Třetí měření, určení závislosti chyb přístrojů proudu:

- Připojené břemeno transformátoru proudu: **50 %**
- Poloha senzoru proudu vůči primárnímu vodiči: **PF = 1**
- Rozsah testovacího proudu: **0 – 120 A** (proud zvyšovat po 5 A s krátkými přestávkami 1s)

Čtvrté měření, určení závislosti chyb přístrojů proudu:

- Připojené břemeno transformátoru proudu: **25 %**
- Poloha senzoru proudu vůči primárnímu vodiči: **Maximální úhel 10°**
- Rozsah testovacího proudu: **0 – 120 A** (proud zvyšovat po 5 A s krátkými přestávkami 1s)

Páté měření, určení závislosti chyb přístrojů proudu:

- Připojené břemeno transformátoru proudu: **50 %**
- Poloha senzoru proudu vůči primárnímu vodiči: **Maximální úhel 30°**
- Rozsah testovacího proudu: **0 – 120 A** (proud zvyšovat po 5 A s krátkými přestávkami 1s)

Šesté měření, určení závislosti chyb přístrojů proudu:

- Připojené břemeno transformátoru proudu: **75 %**
- Poloha senzoru proudu vůči primárnímu vodiči: **Maximální úhel 70°**
- Rozsah testovacího proudu: **0 – 120 A** (proud zvyšovat po 5 A s krátkými přestávkami 1s)

Sedmé měření, určení nadproudového čísla přístrojů proudu:

- Připojené břemeno transformátoru proudu: **100 %**
- Poloha senzoru proudu vůči primárnímu vodiči: **PF = 0**
- Rozsah testovacího proudu: **0 – 280 A** (proud zvyšovat po 5 A s krátkými přestávkami 1s)

## 5.2.4 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot

V tabulkách jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty primárních a sekundárních proudů. Tabulky také zobrazují, v jakém nastavení či poloze přístrojů proudu byla data naměřena.

Tab. 13 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot přístrojového transformátoru proudu

	Odporový bočník	Přístrojový transformátoru proudu			
	$I_p$ (A)	Procentní hodnota jmenovitého břemene	$\Delta U_{R_{tp}}$ (mV)	$I_s$ (A)	$\varepsilon_i$ (%)
~ 5 % $I_n$	5,840	100 %	60,411	0,289	-1,027
~ 20 % $I_n$	20,915		217,763	1,042	-0,359
~ 100 % $I_n$	100,865		1057,938	5,062	0,372
~ 120 % $I_n$	120,255		1086,624	6,037	0,403
~ 5 % $I_n$	5,740	75 %	44,806	0,281	-0,871
~ 20 % $I_n$	22,215		176,677	1,106	-0,428
~ 100 % $I_n$	100,970		808,430	5,060	0,228
~ 120 % $I_n$	120,765		967,230	6,054	0,261
~ 5 % $I_n$	5,580	50 %	30,712	0,282	-0,868
~ 20 % $I_n$	21,445		112,759	1,034	-0,553
~ 100 % $I_n$	102,435		560,532	5,142	0,395
~ 120 % $I_n$	121,345		663,873	6,091	0,391
~ 5 % $I_n$	5,030	25 %	14,556	0,255	-0,747
~ 20 % $I_n$	18,285		52,011	0,912	-0,246
~ 100 % $I_n$	101,340		288,030	5,053	-0,276
~ 120 % $I_n$	122,865		349,035	6,123	-0,262

### Příklad výpočtu:

Zadané parametry břemene:  $R_{tr100\%} = 0,209 \Omega$ ,  $R_{tr75\%} = 0,163 \Omega$ ,  $R_{tr50\%} = 0,109 \Omega$ ,  $R_{tr25\%} = 0,057 \Omega$

Výpočet sekundárního proudu přístrojového transformátoru proudu:

$$I_s = \frac{\Delta U_{R_{tp}}}{R_{tr100\%}} = \frac{60,41 \cdot 10^{-3}}{0,209} = 0,289 \text{ A}$$

Jmenovitý převod transformátoru:

$$k_r = \frac{I_{pr}}{I_{sr}} = \frac{100}{5} = 20 \text{ (-)}$$

Výpočet chyby převodu u přístrojového transformátoru proudu:

$$\varepsilon = \frac{k_r \cdot I_s - I_p}{I_p} \cdot 100 = \frac{20 \cdot 0,289 - 5,84}{5,84} \cdot 100 = -1,027 \%$$

Tab. 14 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot senzoru proudu

	Odporový bočník	Senzor proudu			Odporový bočník	Senzor proudu		
	$I_p$ (A)	PF (-)	$U_{sp}$ (mV)	$\varepsilon_i$ (%)	$I_p$ (A)	Maximální úhel (°)	$U_{sp}$ (mV)	$\varepsilon_i$ (%)
~ 5 % In	5,840	0	11,032	0,753	5,030	10°	9,472	0,437
~ 20 % In	20,915		39,412	0,502	18,285		34,074	0,566
~ 100 % In	100,865		189,882	0,402	101,340		190,746	0,386
~ 120 % In	120,255		226,472	0,441	122,865		231,235	0,374
~ 5 % In	5,740	0,5	10,712	-0,470	5,735	30°	10,789	0,331
~ 20 % In	22,215		41,807	0,369	21,745		40,958	0,455
~ 100 % In	100,970		190,044	0,383	100,090		188,592	0,403
~ 120 % In	120,765		227,410	0,431	119,735		225,639	0,422
~ 5 % In	5,580	1	10,511	-0,516	6,385	70°	11,900	-0,595
~ 20 % In	21,445		38,528	-0,527	20,245		37,864	-0,252
~ 100 % In	102,435		191,365	-0,365	99,845		187,111	-0,052
~ 120 % In	121,345		226,815	-0,311	120,070		224,775	-0,158

**Příklad výpočtu:**

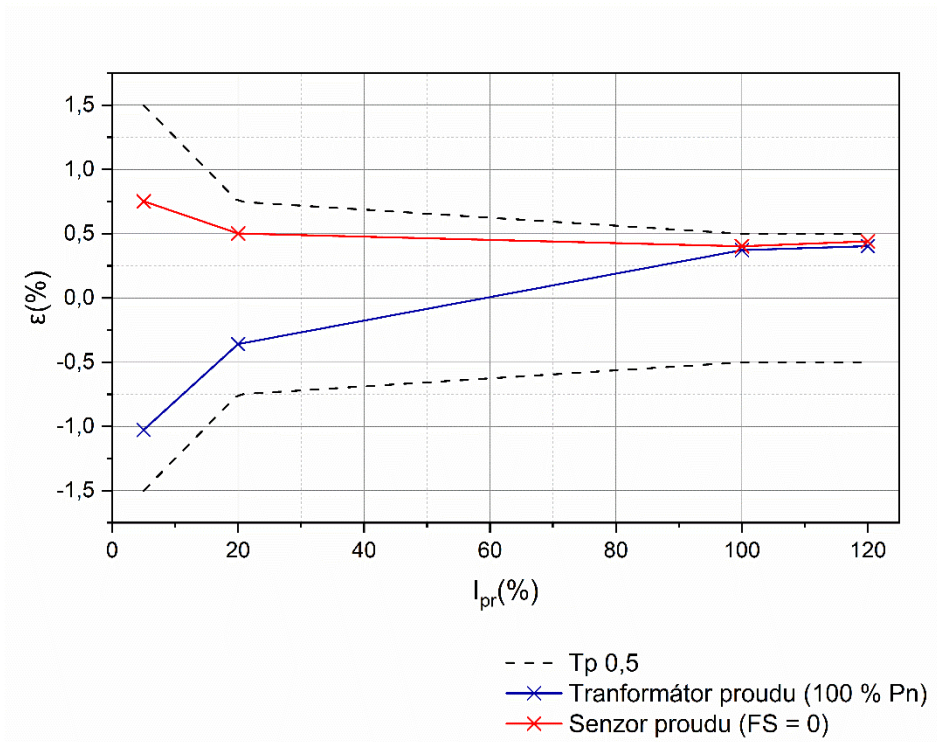
Jmenovitý převod senzoru proudu:

$$K_r = 80 \text{ A}/150 \text{ mV} = \frac{80}{0,150 \cdot 10^{-3}} = 533,333 \text{ (-)}$$

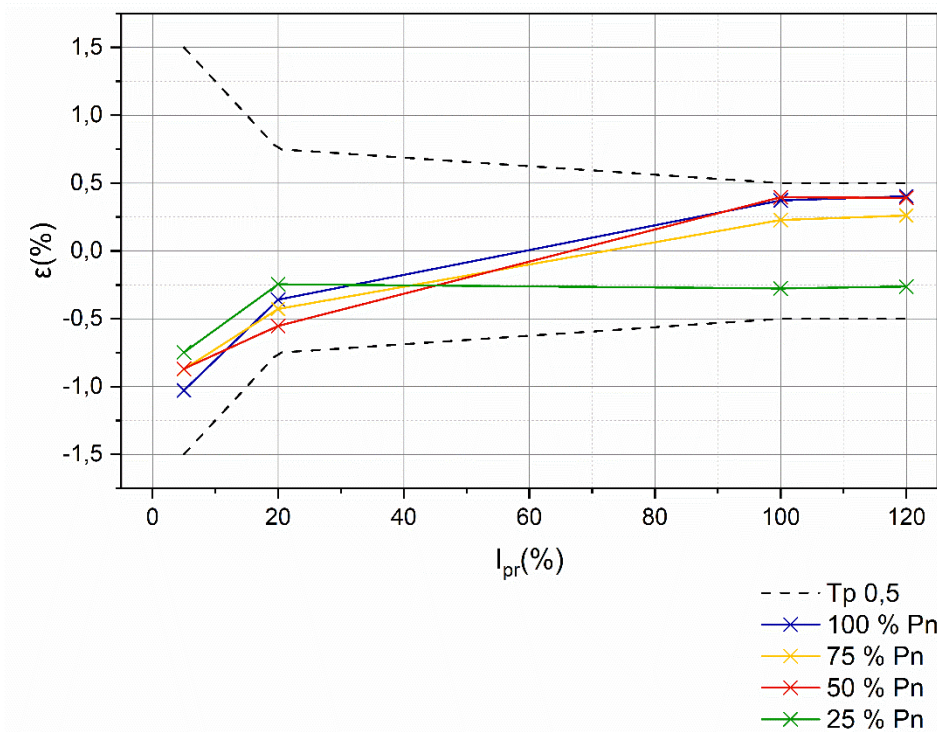
Výpočet chyby převodu senzoru proudu:

$$\varepsilon = \frac{K_r Y_s - X_p}{X_p} \cdot 100 = \frac{K_r U_{sp} - I_p}{I_p} \cdot 100 = \frac{533,333 \cdot 39,412 - 20,915}{20,915} \cdot 100 = 0,502 \%$$

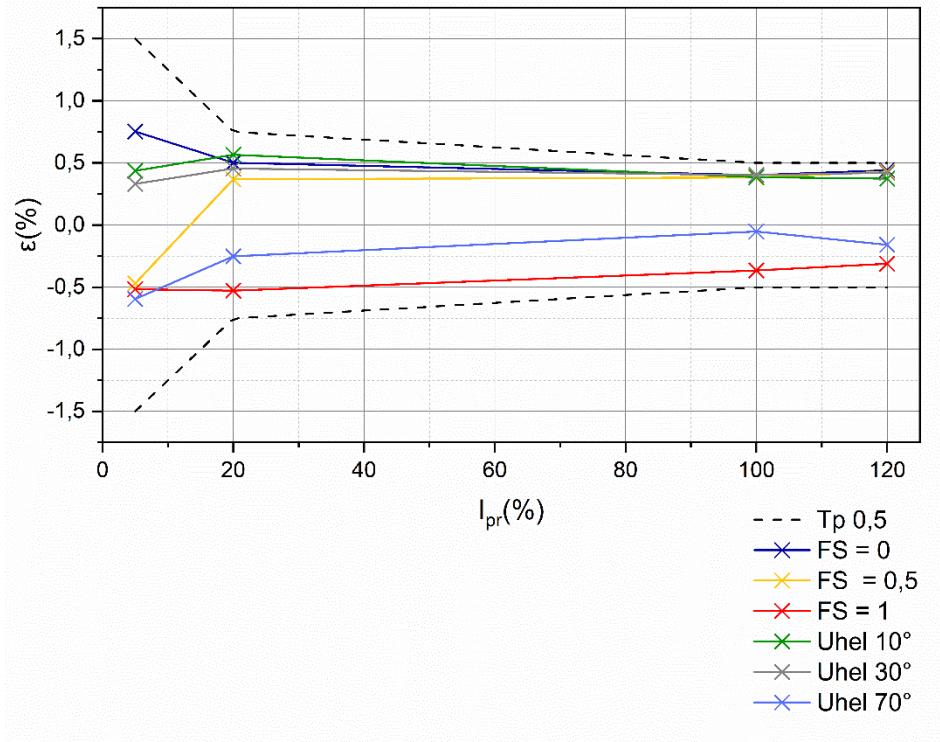
### 5.2.5 Grafické vyhodnocení



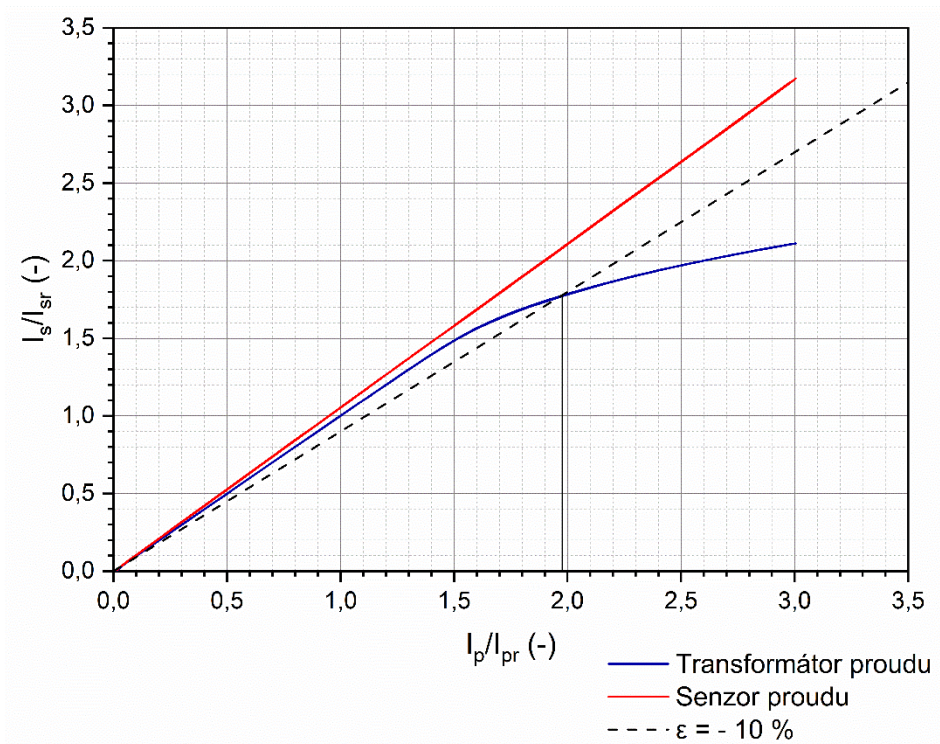
Obr. 38 Grafické porovnání chyb převodu transformátoru proudu a senzoru proudu



Obr. 39 Grafické porovnání chyb převodu transformátoru proudu pro zadané hodnoty břemene



Obr. 40 Grafické porovnání chyb převodu pro zadané polohy senzoru proudu vůči primárnímu vodiči



Obr. 41 Nadproudová charakteristika transformátoru proudu a senzoru proudu

### 5.2.6 Seznam použitých přístrojů

- jednofázový zdroj napětí a proudu	S/N: 206830,2
- odporový bočník 300 A/60 mV, přesnost 0,1%	S/N: 2509231
- přístrojový transformátor proudu LMZJ1-0,5	S/N: 2008120099
- modul břemene transformátoru proudu	S/N: nemá
- senzor proudu KECA 80 C85	S/N: 1VLT5421033047
- měřicí karta NATIONAL INSTRUMENT 195724D-01L	S/N: 1D26AE7
- klešťový multimetr UNI-T UT202	

### 5.2.7 Kontrolní otázky

- 1) Co je třída přesnosti přístrojů proudu?

Třída přesnosti určuje meze chyb převodu a chyb úhlu pro přístroje proudu.

- 2) Co je to nadproudové číslo?

Násobek jmenovitého primárního proudu, při němž chyba převodu dosáhne hodnoty 10 % (u měřicích transformátorů proudu)

- 3) Z jakého důvodu nesmí být přístrojový transformátor proud provozován bez připojené zátěže?

Na sekundárních svorkách by se objevilo nebezpečné napětí pro obsluhu i pro transformátor proudu. Provoz transformátoru proudu bez připojené zátěže by měl za následek jeho nadměrné namáhání.

- 4) Proč u senzoru proudu nedochází ke zkreslování hodnot, i při dvojnásobném nadproudovém čísle?

Senzor proudu je v podstatě vzduchová cívka, proto nedojde k přesycení „jádra“ cívky.

- 5) Jaký má vliv hodnota břemene na chybu převodu přístrojového transformátoru proudu?

Celková chyba  $\Delta I$  s rostoucím břemenem roste.

- 6) Co má největší vliv na přesnost senzoru proudu?

Vliv blízkých vodičů přenášející velké proudy má největší podíl na nepřesnost senzoru proudu.

### 5.2.8 Vyhodnocení laboratorní úlohy

Cílem této úlohy bylo změřit přístroje proudu a ověřit, jestli vyhovují své třídě přesnosti, změřit a vyhodnotit vliv chyby převodu pro zadané nastavení přístrojů proudu. Dalším cílem bylo určení nadproudového čísla přístrojů proudu.

Pokud porovnáme chyby převodu dle připojeného břemena, tak přístrojový transformátor proudu s připojeným 25% břemenem měl nejvíce nejmenších chyb převodu. Nejmenší chyba převodu byla u přístrojového transformátoru s připojeným 75% břemenem, chyba převodu měla hodnotu  $\varepsilon_i = 0,228 \%$ . Největší chyba převodu je u přístrojového transformátor s připojeným 100% břemenem. Nejhorší výsledek zřejmě ovlivnila vyšší hodnota odporu břemen. Pro 100% břemeno měla být hodnota břemen  $0,2 \Omega$ , zatím co skutečná hodnota dosahovala hodnoty  $0,209 \Omega$ . Z vypočtených hodnot na obrázku obr. 39 lze usoudit, že testovaný přístrojový transformátor proudu splňuje všechny meze chyb převodu a splňuje tak třídu přesnosti 0,5.

Změřené a vypočtené chyby převodu u senzoru proudu měly téměř stejné hodnoty. Chyby převodu se lišily u primárního proudu 5 A a v polohách, kdy se primární vodič dotýkal okna senzoru proudu ( $PF = 1$ , maximální úhel  $70^\circ$ ). Rozptyl chyb převodu, kdy primární proud dosahoval hodnotě 5 A, mohl být způsoben zarušením testovacího proudu ze zdroje. Záporné chyby senzoru proudu v polohách  $PF = 1$  a maximální úhel  $70^\circ$ , mohlo také způsobit zarušení testovacího proudu. Z vypočtených hodnot na obrázku obr. 40 lze říci, že testovaný senzor proudu splňuje všechny meze chyb převodu a splňuje tak třídu přesnosti 0,5.

Hodnota nadproudového čísla testovaného transformátoru proudu je 1,99, jeho hodnota byla odečtena z grafu na obrázku obr. 41. Senzoru proudu má lineární nadproudovou charakteristiku, proto z grafu na obrázku obr. 41 nelze určit nadproudové číslo.



## Závěr

Diplomová práce se zabývá porovnáním odlišných vlastností měření proudu přístrojového transformátoru proudu a senzoru proudu na principu Rogowského cívky. Dále se zabývá tvorbou laboratorní úlohy a návrhem laboratorního pracoviště pro studenty. Pro návrh laboratorní úlohy byl využit jednofázový zdroj proudu, přístrojový transformátor proudu a senzor proudu od firmy ABB.

Diplomová práce je členěna do pěti hlavních kapitol. První kapitola diplomové práce se věnuje přístrojovým transformátorům proudu, jejich rozdělení, základními parametry užívanými v technických i učebních dokumentech, nebo na výrobních štítcích přístrojů proudu. Dále jsou rozepsány třídy přesnosti s dovolenými poli chyb dle platných norem. Jako poslední jsou popsány vlastnosti přístrojových transformátorů proudu.

Druhá kapitola se zabývá senzory proudu na principu Rogowského cívky a třídami přesnosti s dovolenými poli chyb dle platných norem. Další podkapitoly se věnují provedení senzorů proudu a analýzou vlastností tohoto způsobu měření.

Ve třetí kapitole se řeší samotná realizace měřicího pracoviště. Řeší se zde praktické zapojení laboratorního pracoviště spolu s použitými přístroji. Další podkapitoly se zabývají vytvářením potřebných pomůcek pro měření, jejich konstrukci a význam. Poslední podkapitola se věnuje modelovému návrhu laboratorního pracoviště.

Ve čtvrté kapitole je praktická realizace měření. První měření bylo za účelem ověření navrhovaného zapojení tzv. referenčním měřením. Toto měření ukázalo několik nedostatků. Jeden z nedostatků byl ve vytvořeném břemeni transformátoru proudu. Pro referenční měření se používalo sérioparalelních kombinací rezistorů. Rezistory byly značně tepelně namáhány. V závislosti s tepelným namáháním nemohlo měření probíhat dlouhodobě a po dobu měření se v závislosti na teplotě měnil i elektrický odpor rezistorů. To je pro správné nastavení břemene nevyhovující. Některé z opakujících se měření byla tímto nedostatkem postižena a data nebyla použitelná pro vyhodnocení. Rovněž připojování kombinací rezistoru bylo namáhavé a zdlouhavé.

Laboratorní měření probíhalo s nově vytvořeným břemenem přístrojového transformátoru proudu a senzorem proudu. Vytvořením břemene a použitým odporovým materiálem se zabývá kapitola 3.2. Všechny předešlé nedostatky byly odstraněny, i při dlouhodobějším měření nebylo břemeno tepelně namáháno a neměnilo svůj elektrický odpor. Jediným nedostatkem je méně přesné nastavení hodnot odporových odboček. Měření na senzoru proudu muselo probíhat za určitého nastavení polohy primárního vodiče vůči oknu senzoru proudu. Proto bylo třeba vytvořit polohový nástavec, který by senzor proudu v zadaných polohách fixoval. Polohový nástavec byl vymodelován v programu SolidWorks a následně vytisknut pomocí 3D tiskárny. Vytvořením polohového nástavce se blíže věnuje kapitola 3.3.2. Aby bylo možné vystupující signál ze senzoru proudu zpracovat, bylo třeba zapojení doplnit o adaptér (kapitola 3.3.1). Důvod vytvoření adaptéru je, že výstupní kabel ze senzoru proudu byl zakončen koncovkou RJ45. Všechny vytvořené pomůcky byly odzkoušeny a projevíly se jako užitečné pro laboratorní měření.

Pátá kapitola se zabývá vypracováním návodu měření pro praktické měření laboratorní úlohy. Návod obsahuje podrobný popis zapojení na pořízených fotografiích. Návod měření také obsahuje popis ovládní jednofázového zdroje proudu, aby seznámení s laboratorními úkony bylo co nejjednodušší. Dále je v návodu popsána manipulace s vytvořenými pomůckami, byly vytvořeny

3D modely pomůcek, které např. ukazují potřebné nastavení polohového nástavce. Jako poslední je v návodu podrobný popis pracovního postupu měření.

Jak již bylo zmíněno, laboratorní měření se uskutečnilo, aby byla zadaná úloha odzkoušena a nachystána pro studenty. Ze změřených dat byl následně vytvořen vzorově vyplněný protokol o měření. Měřicí úloha má studenty seznámit s odlišnými vlastnostmi obou způsobů měření. Dále má studenty seznámit s klasickými přístroji proudu, jako jsou přístrojové transformátory proudu, ale i novými přístroji proudu, jakými jsou senzory proudu. Dále jsou studenti seznámeni s měřením a vyhodnocováním chyb přístrojů proudu. Navržená laboratorní práce může být aplikována do předmětu „Elektrické přístroje III“ jako ověření teoretických poznatků laboratorní úlohy: „Návrh měřicího transformátoru proudu“ o praktické měření spolu s měřením na senzoru proudu.

Pro uskutečnění měření bylo třeba navrhnou celé zapojení laboratorní úlohy, uskutečnit testovací měření, aby byly odhaleny nedostatky. Odhalené nedostatky z tzv. referenčního měření napravit tak, aby měření probíhalo plynule. Pro přístroje proudu bylo vytvořeno několik pomůcek. Pro přístrojový transformátor proudu bylo vytvořeno nastavitelné břemeno, které umožňuje snadno nastavit požadovanou hodnotu břemene. Senzor proudu byl vybaven adaptérem a byl vymodelován a následně vytvořen polohový nástavec, který umožňuje fixovat primární vodič do zadané polohy. Pro aplikaci laboratorního měření do výuky byly vytvořeny dokumenty jako: návod měření, vzorově vypracovaný laboratorní protokol a laboratorní protokol určený pro studenty. Všechny potřebné materiály jsou k dispozici v příloze.

Návrhy pro vylepšení nebo rozšíření laboratorní úlohy jsou následující. V odstavci výše byl zmíněn nedostatek vytvořeného břemene přístrojového transformátoru proudu. Jednalo se o méně přesné nastavení hodnot odporu břemene. Správné hodnoty odporu břemene již byly nastaveny, je třeba je znovu otestovat v laboratorním měření. Laboratorní měření by se dalo rozšířit o měření chyb úhlů jednotlivých přístrojů proudu nebo o vytvoření nové laboratorní úlohy na téma: Vliv blízkých vodičů přenášející velké proudy na přesnost senzoru proudu.

## Literatura

- [1] HAPL, Josef a Karel NOSEK. Stavba transformátorů. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1971.
- [2] KRÁL, Josef a Jaromír VANĚK. Elektromagnetické přístroje. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1984.
- [3] ČSN EN 61869-1 Přístrojové transformátory - Část 1: Všeobecné požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [4] ČSN EN 61869-2 Přístrojové transformátory - Část 2: Dodatečné požadavky na transformátory proudu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [5] KOPEČEK, Jan a Miloš DVORÁK. Přístrojové transformátory (měřicí a jisticí). Vyd. 1. Praha: Academia, 1966.
- [6] CSANYI, Edvard. Learn how to specify current transformers. Electrical engineering portal [online]. 2015 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://electrical-engineering-portal.com/learn-how-to-specify-current-transformers>
- [7] ČSN EN 60044-1, Přístrojové transformátory - Část 1: Transformátory proudu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004.
- [8] Třídy přesnosti přístrojových transformátorů proudu [online]. [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <http://www.eshop.elektrokomponenty.cz/novinky/tridy-presnosti-pristrojovych-transformatoru-proudu/>
- [9] JANÍČEK, František. Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2004.
- [10] JEZERSKI, Eugeniusz. Transformátory: teoretické základy. Vyd. 1. Praha: Academia, 1973.
- [11] CIGÁNEK, Ladislav a Miroslav BAUER. Elektrické stroje a přístroje. První vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955.
- [12] ŠUMBERÁK, David. Přístrojový transformátor proudu 12kV, 4000//5/5A [online]. Brno, 2014 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/31866>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Lukáš Dostál.
- [13] RAJCHMAN, Zbyněk. Srovnání přístrojových transformátorů proudu a proudových senzorů s ohledem na funkci rozdílové ochrany [online]. Brno, 2012 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/3565>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jaroslava Orságová.
- [14] POPEK, Jiří. Porovnání vlastností přístrojových transformátorů proudu a proudových senzorů [online]. Brno, 2010 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/18685>.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce David Topolánek.

- [15] KOJOVIC, Ljubomir. PCB Rogowski coils benefit relay protection [online]. IEEE [cit. 2022-02-14]. Dostupné z:  
[https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1018823?casa\\_token=hiHR9MUw5RsAAAAA:oueF7uwVfXH3AYVCfxubsJXLAn\\_ZdPj\\_-Hsk-08spAGu-WqFiLPSytbVDdIL766I26F8sflgFA](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1018823?casa_token=hiHR9MUw5RsAAAAA:oueF7uwVfXH3AYVCfxubsJXLAn_ZdPj_-Hsk-08spAGu-WqFiLPSytbVDdIL766I26F8sflgFA)
- [16] PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [17] JUŘÍK, VLADIMÍR. METODIKY A METODY SNÍMÁNÍ JEDNORÁZOVÝCH DĚJŮ. BRNO, 2008. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [18] POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU A PROUDOVÝCH SENZORŮ. Brno, 2010. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [19] Integrátory pro Rogowského cívky. ENcentrum [online]. 2017 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z:  
<https://www.encentrum.cz/products/integratory-pro-rogowskeho-civky/>
- [20] Rogowski Coil: What is it & How Does it Work?. Electrical4U [online]. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/rogowski-coil/>
- [21] MINGOTTI, Alessandro, Lorenzo PERETTO a Roberto TINARELLI. Effect of the Conductor Positioning on Low-Power Current Transformers: Inputs for the Next IEC 61869-10 [online]. 2021 [cit. 2022-03-03]. ISSN 26734826. Dostupné z: doi:10.3390/electricity2010001
- [22] ČSN EN IEC 61869-10 Přístrojové transformátory - Část 10: Dodatečné požadavky pro pasivní transformátory proudu nízkého výkonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [23] ČSN EN 60044-8, Přístrojové transformátory - Část 8: Elektronické transformátory proudu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004.
- [24] ČSN EN 61869-6 Přístrojové transformátory - Část 6: Dodatečné obecné požadavky na přístrojové transformátory nízkého výkonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [25] Medium voltage product: KECA 80 D85 Indoor current sensor (split core type) [online]. [cit. 2022-02-28]. Dostupné z:  
<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VLC000722&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [26] MEDIUM VOLTAGE PRODUCT KECA 80 C85 Current Sensor [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z:  
[https://library.e.abb.com/public/90e06f4399ea49eaa89dc84a899d882f/KECA%2080%20C85\\_1VLM000806%20Rev.3,%20en.pdf](https://library.e.abb.com/public/90e06f4399ea49eaa89dc84a899d882f/KECA%2080%20C85_1VLM000806%20Rev.3,%20en.pdf)
- [27] FASK - Flexibilní proudové senzory (Rogowského cívky) s děleným jádrem pro primární proudy do 100 kA [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z:

<https://www.ghvtrading.cz/rozvadecove-pristroje/transformatory-proudu/specialni/fask.html>

- [28] MEDIUM VOLTAGE PRODUC T KECA 80 D85 Indoor current sensor (split core type) [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: [https://library.e.abb.com/public/fbbdb22388e44eba89e7650021dd2b1c/KECA%2080%20D85\\_1VLC000722%20Rev.2,%20en.pdf](https://library.e.abb.com/public/fbbdb22388e44eba89e7650021dd2b1c/KECA%2080%20D85_1VLC000722%20Rev.2,%20en.pdf)
- [29] The Rogowski Coil Sensor in High Current Application: A Review. IOPscience [online]. IOP Publishing Ltd, 2018 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/318/1/012054/pdf>
- [30] KOJOVIC, L. PCB Rogowski coils benefit relay protection. IEEE Computer Applications in Power, Computer Applications in Power, IEEE, IEEE Comput. Appl. Power [online]. 2002, 15(3), 50-53 [cit. 2022-02-18]. ISSN 08950156. Dostupné z: doi:10.1109/MCAP.2002.1018823
- [31] POSPÍCHAL, Aleš. Charakterizace reaktivního plazmatu s využitím vysokofrekvenční sondy [online]. Č. Budějovice, 2020 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: [https://theses.cz/id/l3eycv/BP\\_Ales\\_Pospichal.pdf](https://theses.cz/id/l3eycv/BP_Ales_Pospichal.pdf). Bakalářská práce (Bc.). JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH.
- [32] IEC 61869 compliant Rogowski coil for volume production [online]. 2016 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/309442062\\_IEC\\_61869\\_compliant\\_Rogowski\\_coil\\_for\\_volume\\_production](https://www.researchgate.net/publication/309442062_IEC_61869_compliant_Rogowski_coil_for_volume_production)
- [33] ARTERO, J.A. Influence of External Currents in Sensors Based on PCB Rogowski Coils [online]. 2005 [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://icrepq.com/full-paper-icrep/274-artero.pdf>
- [34] XIAO, Chucheng, Lingyin ZHAO, T. ASADA, W.G. ODENDAAL a J.D. VAN WYK. An overview of integratable current sensor technologies. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003., Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the, Industry applications conference [online]. 2003, 2, 1251-1258 [cit. 2022-02-22]. ISBN 0780378830. ISSN edsee.IEEEConferenc. Dostupné z: doi:10.1109/IAS.2003.1257710
- [35] HRYCÍK, T. Porovnání použití přístrojových transformátorů a senzorů v aplikacích s ochranou REF 542plus [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/14432/final-thesis.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
- [36] DJOKIĆ, Branislav. The Design and Calibration of Rogowski Coils. NCSLI Measure [online]. 2016, 4(2), 62-75 [cit. 2022-04-12]. ISSN 1931-5775. Dostupné z: doi:10.1080/19315775.2009.11721474
- [37] SUTTNER, Christian, Stefan TENBOHLEN a Werner EBBINGHAUS. Impact of Rogowski sensors on the EMC performance of medium voltage power substations. 2015 IEEE International

Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC [online]. 2015 [cit. 2022-02-28]. ISSN edsbas. Dostupné z: doi:10.1109/isemc.2015.7256159

[38] Proudový transformátor 100A/5A~ LMZJ1-0.5. Hadex [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/r007-proudovy-transformator-100a5a~lmzj1-05/>

[39] JIAO, Chaoqun, Juan ZHANG, Zhibin ZHAO, Zuoming ZHANG a Yuanliang FAN. Research on Small Square PCB Rogowski Coil Measuring Transient Current in the Power Electronics Devices. Sensors [online]. 2019, 19(19) [cit. 2022-04-12]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s19194176

## **Seznam příloh**

Příloha č. 1 Změřená data při měření nadproudového čísla

Příloha č. 2 Vypracovaný návod měření

Příloha č. 3 Vzorově vypracovaný laboratorní protokol

Příloha č. 4 Laboratorní protokol určený pro studenty