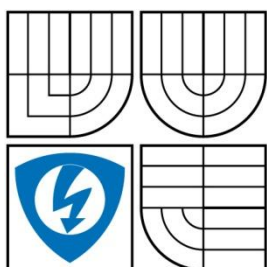


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

# POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU A PROUDOVÝCH SENZORŮ

CURRENT TRANSFORMERS AND CURRENT SENSORS CONFRONTATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Jiří Popek

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. David Topolánek

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Jiří Popěk

**Ročník:** 3

**ID:** 106725

**Akademický rok:** 2009/10

**NÁZEV TÉMATU:**

## Porovnání vlastností přístrojových transformátorů proudu a proudových senzorů

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Popis konstrukce a vlastností přístrojových transformátorů proudu a proudových senzorů.
2. Návrh testovacího měření PTP a proudových senzorů.
3. Porovnání vlastností a zhodnocení PTP a proudových senzorů.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 31.5.2010

**Vedoucí práce:** Ing. David Topolánek

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.**

*předseda oborové rady*



**UPOZORNĚNÍ:**

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

Bibliografická citace práce:

POPEK, J. *Porovnání vlastností přístrojových transformátorů proudu a proudových senzorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Topolánek.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**

**Ústav elektroenergetiky**

**Bakalářská práce**

# **Porovnání vlastností přístrojových transformátorů proudu a proudových senzorů**

**Jiří Popek**

**vedoucí: Ing. David Topolánek**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2010**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**Faculty of Electrical Engineering and Communication**

**Department of Electrical Power Engineering**

**Bachelor's Thesis**

# **Current Transformers and Current Sensors Confrontation**

**by**

**Jiří Popek**

**Supervisor: Ing. David Topolánek**

**Brno University of Technology, 2010**

**Brno**

**ABSTRAKT**

Přístrojové transformátory proudu a proudové senzory jsou přístroje, které nejčastěji slouží k měření proudů v soustavách vysokého napětí. Jejich úkolem je převádět měřené proudy na hodnoty, které jsou zpracovatelné měřicími a jisticími přístroji. Přístrojové transformátory se pro měření proudů využívají již od počátku budování elektrizační soustavy, zatímco proudové senzory našly své uplatnění při měření proudů až po zavedení digitálních přístrojů do jejich sekundárních obvodů.

Teoretická část práce zahrnuje čtvrtou a pátou kapitolu, které jsou věnovány rozboru konstrukce a popisu charakteristických vlastností obou přístrojů. Praktická část práce je obsažena v šesté kapitole. Ta popisuje průběh laboratorního měření, které má za cíl ověřit teoretické poznatky práce. U předložených přístrojů byly ověřeny udávané třídy přesnosti ve jmenovitém rozsahu a vývoj chyby měření v nadproudové oblasti. Závěr práce je věnován vzájemnému porovnání vlastností a shrnutí výsledků laboratorního měření.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** měření proudu; přístrojový transformátor proudu; proudový senzor; Rogowského cívka; třída přesnosti;

**ABSTRACT**

Current transformers and current sensors are devices which are mostly used for current measurement in high voltage systems. These devices transform measured currents to a range which is workable for measurement and protection devices. Current transformers have been used for current measurement since the electric system was built. Current sensors are used for measurement after applying digital devices in their secondary circuits.

Theoretical part includes fourth and fifth chapter. These chapters contain construction analysis and characteristic points for both devices. Practical part is in chapter six. This chapter consists of results from laboratory measurement. Results are used for verification with the theoretical part of the thesis. Accuracy class in nominal range and progress for measurement error in overcurrent range was verified for tested devices. Conclusion of this thesis compares properties and summarises results from laboratory measurement.

**KEY WORDS:** Current Measurement; Current Transformer; Current Sensor; Rogowski Coil; Accuracy Class;

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>12</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>13</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>16</b>
<b>3 CÍLE PRÁCE.....</b>	<b>18</b>
<b>4 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1 DEFINICE DŮLEŽITÝCH POJMŮ .....</b>	<b>19</b>
4.1.1 VŠEOBECNÉ DEFINICE PRO PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY .....	19
4.1.2 DODATEČNÉ DEFINICE PRO MĚŘICÍ TRANSFORMÁTORY PROUDU.....	20
4.1.3 DODATEČNÉ DEFINICE PRO JISTÍCÍ TRANSFORMÁTORY PROUDU.....	21
4.1.4 NORMALIZOVANÉ HODNOTY .....	21
<b>4.2 PRINCIP ČINNOSTI PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU.....</b>	<b>22</b>
<b>4.3 VLASTNOSTI PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU.....</b>	<b>23</b>
4.3.1 CHYBA PROUDU A CHYBA ÚHLU .....	23
4.3.2 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI JÁDRA .....	24
<b>4.4 PROVEDENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU .....</b>	<b>25</b>
4.4.1 PODPĚRNÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU .....	25
4.4.2 TYČOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU.....	26
4.4.3 NÁSUVNÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU.....	26
4.4.4 PRŮCHODKOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU.....	27
<b>4.5 ELEKTRONICKÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU MALÉHO VÝKONU (LPCT).....</b>	<b>27</b>
4.5.1 PRINCIP ELEKTRONICKÝCH TRANSFORMÁTORŮ MALÉHO VÝKONU .....	28
<b>5 PROUDOVÉ SENZORY .....</b>	<b>29</b>
<b>5.1 DEFINICE DŮLEŽITÝCH POJMŮ .....</b>	<b>29</b>
<b>5.2 PRINCIP ČINNOSTI PROUDOVÝCH SENZORŮ .....</b>	<b>31</b>
<b>5.3 PROVEDENÍ ROGOWSKÉHO CÍVKY .....</b>	<b>32</b>
5.3.1 PROVEDENÍ PCB ROGOWSKÉHO CÍVKY .....	33
<b>5.4 VLASTNOSTI PROUDOVÝCH SENZORŮ .....</b>	<b>35</b>
<b>5.5 POUŽITÍ PROUDOVÝCH SENZORŮ .....</b>	<b>36</b>
<b>5.6 PROVEDENÍ PROUDOVÝCH SENZORŮ.....</b>	<b>37</b>
<b>6 LABORATORNÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>39</b>
<b>6.1 TESTOVACÍ SYSTÉM CPC 100.....</b>	<b>39</b>
<b>6.2 MĚŘENÍ PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU PROUDU.....</b>	<b>41</b>
6.2.1 MĚŘENÍ PŘESNOSTI PTP.....	41
6.2.2 CHYBY PROUDU A ÚHLU MĚŘICÍHO VINUTÍ.....	42
6.2.3 CHYBY PROUDU A ÚHLU JISTÍCÍHO VINUTÍ PTP .....	44
6.2.4 MĚŘENÍ MAGNETIZAČNÍ CHARAKTERISTIKY PTP .....	46



---

6.2.5 MAGNETIZAČNÍ CHARAKTERISTIKA DVOUJÁDROVÉHO PTP.....	46
<b>6.3 MĚŘENÍ PROUDOVÝCH SENZORŮ.....</b>	<b>47</b>
6.3.1 MĚŘENÍ PŘESNOSTI SENZORU KEVCD .....	48
6.3.2 CHYBY PROUDU A ÚHLU KOMBINOVANÉHO SENZORU TYPU KEVCD.....	48
<b>6.4 POROVNÁNÍ PŘESNOSTI PTP A SENZORU KEVCD.....</b>	<b>49</b>
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>52</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>54</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>56</b>
<b>PŘÍLOHA 1 NAMĚŘENÉ HODNOTY MĚŘICÍHO VINUTÍ PTP .....</b>	<b>56</b>
<b>PŘÍLOHA 2 NAMĚŘENÉ HODNOTY JISTÍHO VINUTÍ PTP .....</b>	<b>58</b>
<b>PŘÍLOHA 3 NAMĚŘENÉ HODNOTY SENZORU KEVCD .....</b>	<b>60</b>
<b>PŘÍLOHA 4 NAMĚŘENÉ HODNOTY MAGNETIZAČNÍCH CHARAKTERISTIK .....</b>	<b>62</b>

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 4.1: Zapojení transformátoru proudu do obvodu [1].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4.2: Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu [13].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4.3: Magnetizační charakteristika feromagnetika a vzduchu [19] .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4.4: Provedení podpěrného transformátoru proudu [18] .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4.5: Provedení tyčového transformátoru proudu [18].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4.6: Provedení násuvného transformátoru proudu [18] .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4.7: Provedení průchodkového transformátoru proudu [18].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4.8: Princip funkce elektronického transformátoru malého výkonu [16] .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 5.1: Princip měření proudu pomocí Rogowského cívky [18] .....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 5.2: Náhradní schéma Rogowského cívky [16].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 5.3: Výstupní napětí Rogowského cívky pro a) vodič vně, b) uvnitř cívky [9].....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5.4: Rogowského cívka se smyčkou tvořenou vracejícím se vodičem [10] .....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5.5: Princip PCB Rogowského cívky [9].....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5.6: Princip Rogowského cívky využívající dvou PCB cívek [9] a její provedení [6] .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 5.7: PCB Rogowského cívka s děleným jádrem [10] .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 5.8: Princip konstrukce PCB cívek pro měření fázových a rozdílových proudů [8] .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5.9: Provedení proudových senzorů pro vnitřní použití [18] .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5.10: Schéma a provedení kombinovaného senzoru [18].....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5.11: Proudový senzor pro měření na primáru transformátoru obloukové pece [7].....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5.12: Proudové senzory pro měření na sekundární straně a), a jejich umístění b) [7] .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 6.1: Čelní panel testovacího systému CPC 100 [17] .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 6.2: Detail napěťových a proudových vstupů a výstupů [17] .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 6.3: Zapojení zesilovače na rozsah 1000 A [17].....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 6.4: Zapojení zesilovače na rozsah 2000 A [17].....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 6.5: Schéma zapojení pro nastavení jmenovité zátěže [17].....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6.6: Schéma zapojení pro měření přesnosti PTP [17] .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6.7: Průběh chyby proudu měřicího vinutí .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 6.8: Průběh chyby úhlu měřicího vinutí .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 6.9: Určení nadproudového čísla měřicího vinutí .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 6.10: Průběh chyby proudu jistícího vinutí ve jmenovitém rozsahu .....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 6.11: Průběh chyby úhlu jistícího vinutí ve jmenovitém rozsahu.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 6.12: Průběh chyby proudu jistícího vinutí při nadproudech.....</i>	<i>45</i>

---

<i>Obr. 6.13: Průběh chyby úhlu jistícího vinutí při nadproudech .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 6.14: Schéma zapojení pro měření magnetizačních charakteristik PTP.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 6.15: Měřicí karta pro měření magnetizačních charakteristik PTP .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 6.16: Magnetizační charakteristika dvoujádrového PTP .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 6.17: Schéma zapojení pro měření přesnosti proudového senzoru.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 6.18: Průběh chyby proudu proudového senzoru .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 6.19: Průběh chyby úhlu proudového senzoru.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 6.20: Porovnání chyb proudu PTP a proudového senzoru ve jmenovitém rozsahu .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 6.21: Porovnání chyb úhlu PTP a proudového senzoru ve jmenovitém rozsahu .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 6.22: Porovnání chyb proudu PTP a proudového senzoru v nadproudové oblasti .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 6.23: Porovnání chyb úhlu PTP a proudového senzoru v nadproudové oblasti .....</i>	<i>51</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 4.1: Dovolené chyby proudu a úhlu pro měřicí transformátory proudu [15] .....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 4.2: Dovolené chyby proudu a úhlu pro jistící transformátory proudu [15].....</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 6.1: Souřadnice bodů nasycení jader měřených vinutí.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 7.1: Porovnání vlastností transformátorů proudu a proudových senzorů.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. P.1: Naměřené hodnoty měřicího vinutí PTP .....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. P.2: Naměřené hodnoty jistícího vinutí PTP.....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. P.3: Naměřené hodnoty senzoru KEVCD .....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. P.4: Naměřené hodnoty magnetizačních charakteristik .....</i>	<i>62</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\vec{B}$	magnetická indukce	[T]
$\vec{H}$	intenzita magnetického pole	[A · m <sup>-1</sup> ]
$\vec{M}$	magnetizace	[A · m <sup>-1</sup> ]
$\mu_0$	permeabilita vakua	[H · m <sup>-1</sup> ]
$\Phi$	magnetický tok	[Wb]
$\mu_r$	relativní permeabilita látky	[-]
$\kappa_M$	magnetická susceptibilita	[-]
$K_n$	jmenovitý převod	[-]
$I_1$	jmenovitý primární proud	[A]
$I_1$	jmenovitý sekundární proud	[A]
$I_p, I_{pr}$	skutečný primární proud	[A]
$I_s$	skutečný sekundární proud	[A]
$i_p$	okamžitá hodnota primárního proudu	[A]
$i_s$	okamžitá hodnota sekundárního proudu	[A]
$T$	doba periody	[s]
$N_1, N_p$	počet závitů primárního vinutí	[-]
$N_2, N_s$	počet závitů sekundárního vinutí	[-]
$n$	počet závitů	[-]
$U_1$	napětí na primárním vinutí	[V]
$U_2$	napětí na sekundárním vinutí	[V]
$U_s$	sekundární napětí	[V]
$u_{(t)}$	výstupní napětí cívky bez jádra	[V]
$Z_2$	impedance sekundárního vinutí	[Ω]
$Z_b$	impedance břemene	[Ω]
$R_m$	magnetický odpor jádra	[H <sup>-1</sup> ]
$L_m$	magnetizační indukčnost	[H]
$L_s$	rozptylová indukčnost	[H]
$M$	vzájemná indukčnost	[H]
$R_t$	celkový odpor sekundárního vinutí a kabeláže	[Ω]
$R_a$	kalibrační odpor	[Ω]

---

$R_b$	hodnota zatěžovací impedance s účíníkem 1	[ $\Omega$ ]
$R_{sh}$	odpor bočníku (převodník proud/napětí)	[ $\Omega$ ]
$C_c$	ekvivalentní kapacita kabelu	[F]
$S$	průřez jádra	[ $m^2$ ]
$f$	kmitočet	[Hz]
LPCT	Low Power Current Transformer	
PCB	Printed Circuit Boards	
PTP	Přístrojový transformátor proudu	
$P_1 P_2$	primární svorky	
$S_1 S_2$	sekundární svorky	

# 1 ÚVOD

Rozsah elektrických veličin v elektrizačních soustavách je velmi široký, proto je nutné přizpůsobovat příslušné proudy a napětí standardním hodnotám, které jsou vhodné pro měřicí, jistící a regulační přístroje. Tento požadavek je dán technickými a ekonomickými hledisky. Tyto přístroje se do elektrických obvodů nezapojují přímo, ale připojují se do sekundárních obvodů přístrojových transformátorů proudu a proudových senzorů. Transformace proudů na standardizované hodnoty pak umožňuje navrhovat a hospodárně vyrábět velké série měřicích, jistících a regulačních přístrojů. Další důležitou vlastností proudových transformátorů a senzorů je schopnost galvanického oddělení měřených obvodů vysokého napětí od obvodů měřicích a jistících, což vede ke zvýšení bezpečnosti obsluhy. Měřicí přístroje jsou pak přehledně umístěny ve velínech mimo rozvodny.

## 2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Přístrojové transformátory proudu jsou nejrozšířenější převodníky pro měření velkých střídavých proudů. Jejich nespornou výhodou je galvanické oddělení měřeného a měřicího obvodu. Aby však na svém výstupu poskytovaly signál zpracovatelný s dostatečnou přesností, musela být magnetická vazba mezi primárním a sekundárním vinutím podpořena feromagnetickým jádrem. Kvůli malé citlivosti klasických měřicích přístrojů, které vyžadují vysokou úroveň vstupního signálu, provází přístrojové transformátory proudu po celou svou dlouhou historii řada podstatných nedostatků daných jejich konstrukcí. Nejvýznamnější je nelinearita magnetizační charakteristiky (tzn. závislost magnetické indukce  $\vec{B}$  na intenzitě magnetického pole  $\vec{H}$ ) feromagnetických materiálů, které se používají pro výrobu magnetických obvodů transformátorů. Při určité úrovni intenzity magnetického pole a tedy při určité velikosti měřeného proudu dojde ke stavu nasycení. To znamená, že dojde k zásadní změně vlastnosti feromagnetického jádra a magnetizační charakteristika se od svého původního lineárního průběhu výrazně odkloní [19].

Pro zajištění potřebného rozsahu linearit magnetizační charakteristiky je nutné dostatečně dimenzovat průřez magnetického obvodu proudového transformátoru. Tím však značně rostou jeho rozměry a hmotnost. Dalšími nevýhodami magnetického obvodu jsou hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy. Pro omezení jejich vzniku se jádro vyrábí složením z jednotlivých plechů, které jsou od sebe navzájem odděleny tenkou izolační vrstvou. Tím se komplikuje a prodražuje výroba transformátoru.

Všechny uvedené nevýhody přístrojových transformátorů proudu se při jejich použití v jisticích přístrojích projevují zvláště nepříjemně. Z hlediska jistění je problematické, že k nasycení feromagnetického jádra transformátoru dochází právě v oblasti poruchových proudů, jejichž velikost by měla být měřena a vyhodnocována s dostatečnou přesností. Také velká hmotnost a rozměry nepříjemně ovlivňují rozměry celého jisticího zařízení. Ani přídatné oteplení transformátoru způsobené hysterezními ztrátami a vířivými proudy nemusí být vždy zanedbatelné [19].

Z předcházejícího textu vyplývá, že všechny nevýhodné vlastnosti transformátorů proudu jsou dány jejich principem a konstrukcí.

Modernějším řešením měření proudu v elektrických soustavách se staly proudové senzory, založené na principu Rogowského cívky. Rogowského cívka je známa již od roku 1912, kdy byla použita k měření magnetických polí. V té době ještě nemohla být použita pro měření proudu, protože výstupní výkon nebyl dostatečný pro měřicí přístroje. Pro měření proudu se Rogowského cívka stala využitelnou po zavedení digitálních přístrojů do sekundárního obvodu. Digitální přístroje nepotřebují výkonný vstupní signál, a tak se mohly v praxi uplatnit proudové senzory s Rogowského cívkou [12].



Na rozdíl od transformátorů proudu je Rogowského cívka navinuta na jádře z nemagnetického materiálu a je umístěna okolo vodiče, kterým protéká měřený proud.

Princip proudového senzoru se neliší od transformátoru, vazba mezi měřeným a měřicím obvodem zůstává stále induktivní. Zásadně se však liší vlastnosti obou převodníků. Díky absenci magnetického jádra nemá proudový senzor žádnou z nevýhod proudových transformátorů. Protože proudové senzory nemají magnetické jádro, které by mohlo být nasyceno, zůstává měřicí rozsah lineární pro libovolně velké proudy. Rozměry proudového senzoru jsou několikanásobně menší než rozměry odpovídajícího proudového transformátoru. Také hmotnosti obou převodníků jsou nesrovnatelné.

### **3 CÍLE PRÁCE**

Cílem práce je teoretický rozbor konstrukce přístrojových transformátorů proudu a proudových senzorů. Popis jejich charakteristických vlastností, vzájemné porovnání výhod a nevýhod plynoucí ze zcela odlišných konstrukcí. V laboratorních podmínkách budou ověřeny třídy přesnosti obou přístrojů deklarované výrobcem a teoretické poznatky práce.

## 4 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU

Podle typu přístroje, který bude v sekundárním obvodu připojen, se dělí transformátory na měřicí a jistící. Na oba typy se kladou většinou rozdílné požadavky. V některých případech mohou plnit transformátory obě požadované funkce.

Měřicí transformátory proudu se používají ke zvýšení rozsahu měřicích přístrojů, protože v elektrických sítích se běžně vyskytují proudy o velikosti stovek a tisíců ampér. Pro měření je nutné tyto vysoké hodnoty transformovat na hodnoty měřitelné přístroji. Měřicí transformátory musí být přesné především v okolí jmenovité hodnoty. V přechodných stavech není velká přesnost vyžadována [4].

Jistící transformátory proudu se používají pro napájení ochran, které slouží k ochraně elektrického obvodu. Jistící transformátory musí být přesné při nadproudech a zkratech. Obvykle jsou na ně kladeny velké požadavky na rychlost přenosu, aby se zabránilo poškození chráněného obvodu [4].

### 4.1 Definice důležitých pojmů

Pro další popis přístrojových transformátorů proudu je nutné definovat pojmy, které charakterizují základní veličiny a vlastnosti [15].

#### 4.1.1 Všeobecné definice pro přístrojové transformátory

**Přístrojový transformátor:** transformátor určený k převodu měřené veličiny do měřicích přístrojů, elektroměrů, ochran, a jiných podobných zařízení

**Transformátor proudu:** přístrojový transformátor, u něhož je za normálních provozních podmínek sekundární proud v podstatě úměrný primárnímu proudu; rozdíl fáze mezi vektory primárního a sekundárního proudu se při vhodném způsobu zapojení blíží nule

**Primární vinutí:** vinutí, kterým protéká proud, který má být transformován

**Sekundární vinutí:** vinutí, které napájí proudové obvody měřicích přístrojů, elektroměrů, ochran, nebo ovládacích zařízení

**Sekundární obvod:** vnější obvod, který získává informační signály ze sekundárního vinutí přístrojového transformátoru

**Jmenovitý primární proud  $I_p$ :** hodnota primárního proudu, která je uvedena na štítku transformátoru proudu a na které je založena jeho činnost

**Jmenovitý sekundární proud  $I_s$ :** hodnota sekundárního proudu, která je uvedena na štítku transformátoru proudu a na které je založena jeho činnost

**Jmenovitý převod transformátoru proudu  $K_n$ :** poměr jmenovitého primárního proudu ke jmenovitému sekundárnímu proudu transformátoru proudu

**Skutečný převod transformátoru proudu  $K_s$ :** poměr skutečného primárního proudu ke skutečnému sekundárnímu proudu transformátoru proudu

**Chyba proudu** (chyba převodu)  $\varepsilon_{\%}$ : je chyba, kterou transformátor vnáší do měření proudu a která vyplývá ze skutečnosti, že skutečný převod není roven jmenovitému převodu

Tato chyba proudu, vyjádřená v procentech je dána vzorcem:

$$\varepsilon_{\%} = \frac{(K_n \cdot I_s - I_p)}{I_p} \cdot 100 \quad (1)$$

**Chyba úhlu  $\varphi$** : rozdíl fáze mezi fázory primárního a sekundárního proudu; Chyba úhlu se považuje za kladnou, jestliže fázor sekundárního proudu předchází fázor primárního proudu. Obvykle bývá vyjádřena v úhlových minutách nebo centiradiánech.

**Třída přesnosti**: označení přiřazené transformátoru proudu, jehož chyba proudu a chyba úhlu nepřekročí dovolené hodnoty v předepsaných provozních podmínkách

**Břemeno**: impedance sekundárního obvodu, vyjádřená v ohmech, při daném účinníku; Břemeno je obvykle vyjádřeno jako zdánlivý výkon ve voltampérech spotřebovaný při stanoveném účinníku a při jmenovitém sekundárním proudu.

**Jmenovité břemeno  $R_{br}$** : hodnota zátěže, na které jsou založeny požadavky na předepsanou přesnost

**Jmenovitá zátěž  $S_n$** : hodnota zátěže ve voltampérech při daném účinníku, kterou transformátor přenáší do sekundárního obvodu při jmenovitém sekundárním proudu a připojeném jmenovitém břemenu

**Jmenovitý kmitočet  $f$** : hodnota kmitočtu, ze které jsou odvozeny požadavky norem

**Celková chyba  $\varepsilon_c$** : je to efektivní hodnota rozdílu mezi okamžitými hodnotami primárního proudu a okamžitými hodnotami skutečného sekundárního proudu násobenými jmenovitým převodem

$$\varepsilon_c = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n \cdot i_s - i_p)^2 dt} \quad (2)$$

#### 4.1.2 Dodatečné definice pro měřicí transformátory proudu

**Měřicí transformátor proudu**: transformátor proudu určený k přenosu informačního signálu k měřicím přístrojům nebo elektroměrům

**Jmenovitý primární nadproud**: hodnota minimálního primárního proudu, při které je celková chyba měřicího transformátoru proudu rovna nebo větší než 10 % při jmenovitém sekundárním břemenu

**Nadproudové číslo  $FS$** : poměr jmenovitého primárního nadproudu ke jmenovitému primárnímu proudu; V případě, že primárním vinutím transformátoru proudu bude protékat zkratový proud, bude bezpečnost pro napájené přístroje největší, pokud nadproudové číslo bude malé.

### 4.1.3 Dodatečné definice pro jistící transformátory proudu

**Jistící transformátor proudu:** transformátor proudu určený k přenášení měřených signálů do ochranných a ovládacích zařízení

**Jmenovitý primární nadproud při dané třídě přesnosti:** hodnota primárního proudu, do které transformátor proudu vyhovuje požadavkům na celkovou chybu

**Nadproudový činitel:** poměr jmenovitého primárního nadproudu při dané přesnosti a jmenovitého primárního proudu

### 4.1.4 Normalizované hodnoty

**Jmenovitých sekundárních proudů  $I_s$  jsou:** 1 A, 2 A a 5 A. Přednostní hodnotou je 5 A. V případě dlouhé vzdálenosti mezi PTP a měřicím přístrojem se volí výstupní hodnota 1 A za účelem použití menšího průřezu vodiče.

**Jmenovité zátěže do 30 VA jsou:** 2,5 – 5 – 10 – 15 – 30 VA. Hodnoty nad 30 VA mohou být zvoleny podle potřeby.

**Třídy přesnosti pro měřicí transformátory proudu** jsou: 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3 – 5. Pro měřicí transformátory proudu je třída přesnosti určena nejvyšší dovolenou chybou proudu vyjádřenou v procentech při jmenovitém proudu, předepsanou pro příslušnou třídu přesnosti. Dovolené chyby proudu a chyby úhlu pro měřicí transformátory proudu jsou uvedeny v **Tab. 4.1**.

Tab. 4.1: Dovolené chyby proudu a úhlu pro měřicí transformátory proudu [15]

Třída přesnosti	$I_n$ [%]	± Chyba proudu v procentech jmenovitého proudu				± Chyba úhlu v procentech jmenovitého proudu							
						Minuty				Centiradiány			
		5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1		0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,1
0,2		0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5		1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1,0		3	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

**Nadproudových čísel** jsou: 5 – 10 – 15 – 20 – 30

**Třídy přesnosti pro jistící transformátory proudu** jsou: 5P a 10P. Pro jistící transformátory proudu je stanovena třída přesnosti nejvyšším přípustným procentem celkové chyby při krajním primárním proudu předepsaném pro příslušnou třídu přesnosti. Tento údaj je doplněn písmenem P (z anglického protection – ochrana). Dovolené chyby pro jistící transformátory proudu jsou uvedeny v **Tab. 4.2**.

Tab. 4.2: Dovolené chyby proudu a úhlu pro jistící transformátory proudu [15]

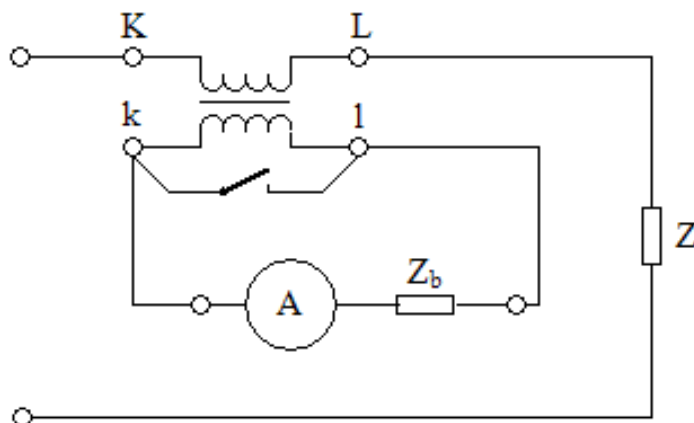
Třída přesnosti	± Chyba proudu v % při jmenovitém primárním proudu	± Chyba úhlu při jmenovitém primárním proudu		Celková chyba v % při jmenovitém primárním nadproudu
		Minuty	Centiradiány	
5P	1	60	1,8	5
10P	3	-	-	10

## 4.2 Princip činnosti přístrojových transformátorů proudu

Činnost transformátoru je založena na principu elektromagnetické indukce. Průchodem proudu primárním vinutím se v jádře transformátoru vybudí magnetický tok  $\Phi$ , který indukuje proud v sekundárním vinutí. Napětí se transformují v přímém poměru k počtu závitů. Proudy se transformují v převráceném poměru [5].

$$K_n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3)$$

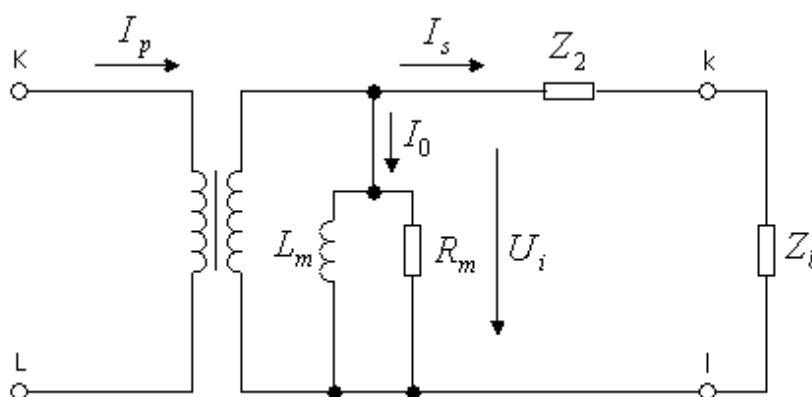
Základní zapojení měřicího transformátoru proudu je na **Obr. 4.1**. Primární vinutí je zapojeno v sérii s měřeným obvodem. Primární vinutí je obvykle tvořeno jediným závitem. K sekundárnímu vinutí jsou připojeny měřicí a jistící přístroje. Součet impedancí připojených přístrojů nesmí překročit štítkovou hodnotu impedance přístrojového transformátoru. Sekundární vinutí je doplněno zkratovačem, kterým je nutné zkratovat sekundární vinutí v případě nutnosti rozpojení sekundárního obvodu. To je nezbytné, protože sekundární vinutí nesmí být rozpojeno, protéká-li primárním vinutím proud. Na sekundární straně by se naindukovalo napětí, které by mohlo prorazit izolaci a ohrozit bezpečnost obsluhy. Primární svorky se standardně označují velkými písmeny, sekundární svorky malými písmeny [2].



Obr. 4.1: Zapojení transformátoru proudu do obvodu [1]

### 4.3 Vlastnosti přístrojových transformátorů proudu

Aby bylo možné dosáhnout potřebné úrovně výstupního signálu z transformátoru proudu, bylo nutné posílit magnetickou vazbu mezi primárním a sekundárním obvodem feromagnetickým jádrem. Toto jádro je však příčinou několika negativních vlastností, které je nutné respektovat během používání transformátoru. V běžném provozu se vhodnou konstrukcí dají některé vlastnosti eliminovat, avšak při poruchových stavech může jejich vlivem dojít ke značným nepřesnostem. To je zvláště nebezpečné při napájení ochranných zařízení, které mají na starost odpojení poškozeného obvodu. Pro popis chování transformátoru proudu používáme náhradní obvodové schéma uvedené na **Obr. 4.2**.



Obr. 4.2: Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu [13]

V náhradním schématu zanedbáváme impedanci primárního vinutí, protože je tvořeno měděným vodičem velkého průřezu a malé délky. *Násuvné* transformátory proudu nemají žádný primární vodič.

#### 4.3.1 Chyba proudu a chyba úhlu

Z náhradního schématu vyplývá, že transformátor proudu je zatížen chybou proudu, která je způsobena magnetizačním proudem  $I_0$ . Chyba proudu je definována podle vzorce (1). Aby byla chyba měřicího transformátoru co nejmenší, je nutné, aby byl co nejmenší magnetizační proud. Proto musí mít impedance sekundárního obvodu co nejnižší hodnotu, aby při daném sekundárním proudu bylo nutné co nejmenší indukované napětí  $U_i$ . Malému indukovanému napětí odpovídá malý magnetický tok jádra. Aby magnetizační proud vytvořil potřebný magnetický tok, musí být magnetický odpor jádra co nejmenší. Z toho důvodu je nutný dostatečný průřez magnetického jádra z kvalitního feromagnetického materiálu bez vzduchových mezer. Transformátor proudu je dále zatížen chybou úhlu, která je rovněž způsobena velikostí magnetizačního proudu. Maximální dovolené chyby proudu a úhlu jsou uvedeny v **Tab. 4.1** [2].

U transformátoru proudu je tedy klíčová velikost magnetizačního proudu, která kromě uvedených vlastností závisí také na velikostech úbytků na impedanci sekundárního vinutí a na impedanci připojených přístrojů.

Proto je důležité, aby celková spotřeba všech přístrojů připojených do sekundárního obvodu transformátoru nepřekročila dovolené zatížení. Pokud tuto hodnotu překročíme, přestane transformátor pracovat v blízkosti stavu nakrátko. Dojde ke změně jeho skutečného převodu a při měření proudu vznikne značná chyba [1].

### 4.3.2 Magnetické vlastnosti jádra

Základní vlastností feromagnetických materiálů je možnost vybudit v nich i poměrně slabým magnetickým polem velmi silnou magnetizaci. Tu jsou si schopny udržet i po odstranění vnějšího magnetického pole.

Feromagnetismus je vlastností pevných kovových i nekovových látek. Feromagnetismus vykazuje železo, kobalt, nikl, oxidy železa a některé slitiny. Všechny feromagnetické látky obsahují tzv. domény, což jsou mikroskopické oblasti, v nichž jsou magnetické momenty jednotlivých částic souhlasně orientovány [3].

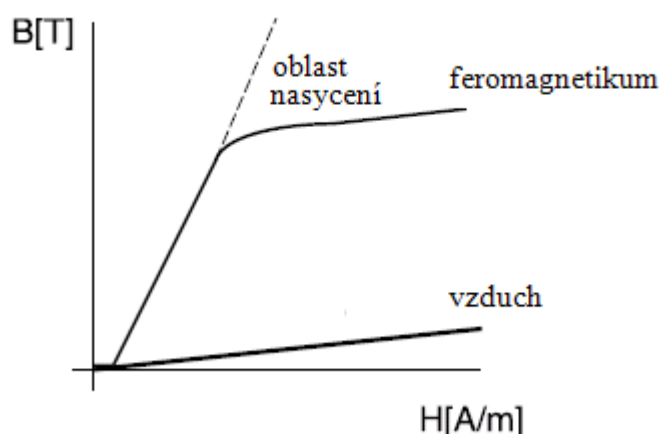
V nezmagnetovaných materiálech jsou domény orientovány nahodile, proto je výsledná magnetizace nulová. Působením vnějšího magnetického pole dojde k orientaci domén a k jeho zesílení. Tím je původní slabé magnetické pole vybuzené primárním vodičem v transformátoru zesíleno a je schopné v sekundárním vinutí indukovat potřebný proud. Je-li magnetická indukce vnějšího magnetického pole  $\vec{B}_0$ , feromagnetikum ji po vložení do magnetického pole ovlivní svým příspěvkem  $\vec{B}_m$  a výsledná magnetická indukce je pak [3]:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m \quad (4)$$

Magnetické vlastnosti látky charakterizuje magnetická susceptibilita  $\kappa_M = \mu_r - 1$ , pak výsledná magnetická indukce bude [3]:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1 + \kappa_M)\vec{H} = \mu_0\mu_r \cdot \vec{H} \quad (5)$$

Když sledujeme magnetizaci materiálu, který nebyl dosud zmagnetován, můžeme sledovat rychlý růst magnetizace do okamžiku nasycení (saturace). Časový úsek od počátku magnetizace do stavu nasycení nazýváme doba nasycení (time to saturation). Při dalším zvyšování intenzity magnetického pole narůstá magnetizace jen pomalu a v okamžiku, kdy dojde k orientaci všech domén, se její nárůst úplně zastaví [3]. Tím je způsoben nelineární průběh magnetizační charakteristiky feromagnetika, který je zobrazen na **Obr. 4.3**.



Obr. 4.3: Magnetizační charakteristika feromagnetika a vzduchu [19]

Transformátory proudu jsou konstruovány tak, aby do hodnoty jmenovitého primárního proudu zůstaly lineární a měly zaručenou přesnost. Vlivem saturace dochází ke zkreslení výstupních hodnot, což je příčinou chyby měření nebo nesprávné funkce ochranných zařízení.



K saturaci jádra dochází při nadproudech a především při zkratech, kdy je jádro přetíženo velkým magnetickým tokem vybuzeným poruchovým proudem. Problémy s přesycením jádra vznikají také vlivem remanentní indukce (zbytkové magnetické indukce), která je další nezanedbatelnou vlastností feromagnetických materiálů.

Remanentní indukce zkrátí dobu nasycení jádra transformátoru, jestliže poruchový proud vytvoří magnetické pole ve stejném směru jako remanentní indukce. Pokud však poruchový proud vytvoří magnetické pole v opačném směru než remanentní indukce, dojde naopak k prodloužení doby nasycení [11].

Velikost remanentní indukce vyjadřuje kvalitu magnetického obvodu. Ta je ovlivněna materiálem feromagnetika a konstrukcí magnetického obvodu, zvláště pak velikostí vzduchových mezer. Při nulovém magnetizačním proudu bude každý transformátor proudu s feromagnetickým jádrem obsahovat zbytkový (remanentní) magnetický tok, který se přičte k magnetickému toku jádra při opětovném zmagnetování. Když se hodnota remanentní indukce ustálí na určité hodnotě, zůstává tato hodnota v jádře takřka beze změn, dokud nedojde k jeho odmagnetování. V praxi se hodnota remanentní indukce pohybuje v rozmezí 0 až 80 % saturační hodnoty [13].

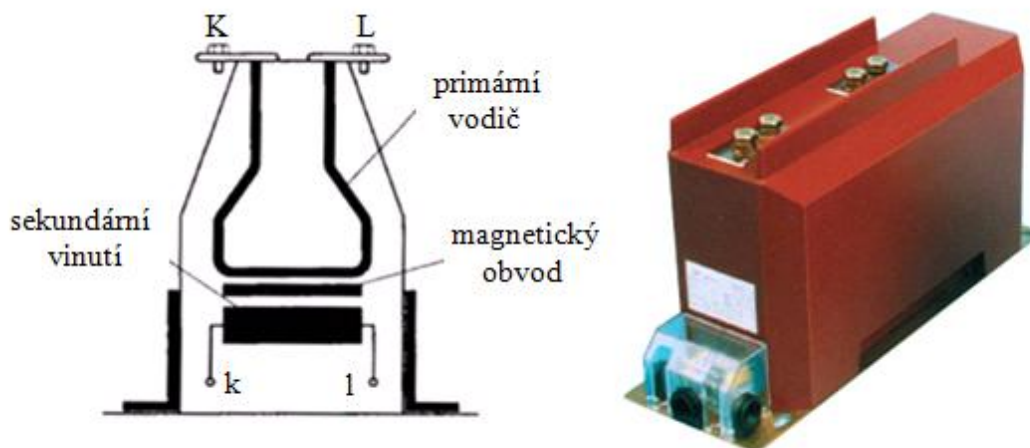
Možností jak omezit velikost remanentní indukce v přístrojových transformátorech proudu je použití jader se vzduchovými mezerami. Vzduchové mezery velikosti 0,0001 až 0,0003 délky magnetické cesty sníží hodnotu remanentní indukce na přijatelnou úroveň. Hlavní výhodou těchto transformátorů jsou menší rozměry a menší průřez jádra potřebný k zabránění stavu nasycení. Nevýhodou je nárůst chyby úhlu při transformaci [11].

## 4.4 Provedení přístrojových transformátorů proudu

Přístrojové transformátory proudu jsou zalévané do epoxidové pryskyřice, která tvoří izolaci pro různé hodnoty napětí. Počet sekundárních vinutí se pohybuje od 1 do 6 a závisí na kombinaci technických parametrů, jako je třída přesnosti, impedance zátěže, velikost zkratového proudu, nadproudový činitel, rozměry transformátoru a jiné. Sekundární vinutí jsou používána pro měřicí nebo jistící účely, případně pro zvláštní použití. Během provozu musí být jedna svorka každého použitého vinutí uzemněna. Nepoužitá vinutí musí být zkratována a uzemněna [18].

### 4.4.1 Podpěrné transformátory proudu

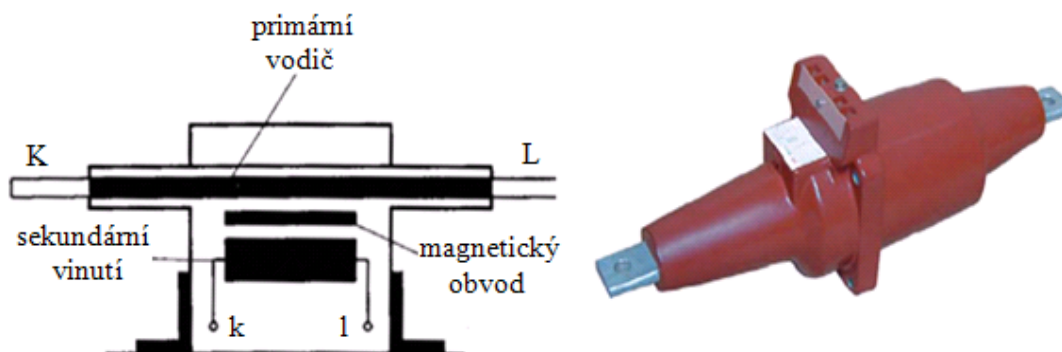
*Podpěrné* transformátory mají primární svorky umístěné na temeni tělesa. Sekundární svorky jsou umístěny na čelní straně. Spodní část tělesa je uchycena šrouby k rámu rozváděče, případně k podlaze kobky. Transformátory jsou navrženy buď jako jednozávitové pro jmenovité proudy od 400 A do 3200 A, nebo s větším počtem závitů na primární straně pro jmenovité proudy od 10 A do 600 A. Mohou mít až dva převody s možností přepínání na primární, nebo sekundární straně. Na **Obr. 4.4** je znázorněno schéma a skutečné provedení *podpěrného* transformátoru proudu.



Obr. 4.4: Provedení podpěrného transformátoru proudu [18]

#### 4.4.2 Tyčové transformátory proudu

Tento typ transformátoru má vestavěný vodič ve tvaru pásu, který představuje primární vinutí. Tyčové transformátory mohou mít více převodů s přepínáním na sekundární straně. Při instalaci do rozváděče jsou tyto transformátory využívány jako průchodky. Jmenovité primární proudy jsou v rozmezí od 100 A do 2500 A. Na **Obr. 4.5** je znázorněno schéma a skutečné provedení tyčového transformátoru proudu.



Obr. 4.5: Provedení tyčového transformátoru proudu [18]

#### 4.4.3 Násuvné transformátory proudu

Násuvné transformátory proudu se liší od předchozích transformátorů tím, že nemají vestavěné primární vinutí, které je v tomto případě tvořeno rovnou přípojnici. Takový transformátor je vybaven pouze magnetickým obvodem s navinutým sekundárním vinutím. Na přípojnicí, ve které chceme měřit proud, se nasouvá. Tyto transformátory se používají pro měření proudů do hodnoty 6000 A. Při proudech větších než 4000 A jsou jádra transformátoru chráněna před působením magnetických polí sousedních přípojníc.

Prakticky stejným způsobem funguje prstencové provedení s tím rozdílem, že jádro nemá čtvercový, ale prstencový tvar a sekundární vinutí je rovnoměrně rozloženo po celém obvodu. Na **Obr. 4.6** je znázorněno schéma a skutečné provedení násuvného transformátoru proudu.



Obr. 4.6: Provedení násuvného transformátoru proudu [18]

#### 4.4.4 Průchodkové transformátory proudu

Tyto transformátory pracují na stejném principu jako transformátory *násuvné*. Svou konstrukcí jsou uzpůsobené jako *průchodky*. Transformátory tohoto typu se používají v rozvodných zařízeních vysokého napětí se jmenovitými proudy do 5000 A. Transformátory mají *násuvnou* konstrukci s jedním až třemi sekundárními vinutími podle typu použití. Vnitřní otvor je opatřen polovodivým nátěrem, který je vyveden na čelní plochu tělesa a za provozu je propojen s primárním vodičem. Provedení takového transformátoru proudu je na **Obr. 4.7**.



Obr. 4.7: Provedení průchodkového transformátoru proudu [18]

### 4.5 Elektronické transformátory proudu malého výkonu (LPCT)

Transformátory proudu malého výkonu založené na cívkách se železným jádrem představují další vývoj klasických induktivních transformátorů proudu. Protože moderní elektrické přístroje vyžadují malý vstupní výkon, mohou být LPCT dimenzovány pro velké impedance  $R_b$ . Důsledkem toho je omezení vlivu saturace jádra, což je hlavní nevýhoda klasických transformátorů proudu, a tím je značně rozšířen měřicí rozsah.

Snížením celkové spotřeby je umožněno měření nadproudů i zkratových proudů s vysokou přesností. Přes široký měřicí rozsah mohou být LPCT konstruovány s menšími rozměry než klasické transformátory srovnatelných parametrů. S rozšířením měřicího rozsahu odpadá dělení

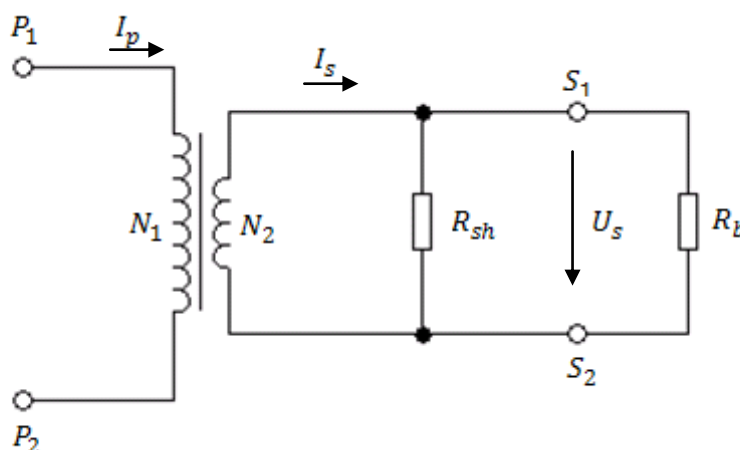
klasických transformátorů na měřicí a jisticí, protože pro oba účely lze použít jediný elektronický transformátor malého výkonu [16].

#### 4.5.1 Princip elektronických transformátorů malého výkonu

LPCT se skládají z transformátoru proudu s primárním vinutím, malým magnetickým jádrem a sekundárním vinutím s minimalizovanými ztrátami. Sekundární obvod je uzavřen bočником  $R_{sh}$ . Tento bočník je součástí LPCT a je velmi důležitý pro funkci a kalibraci transformátoru.

Odpor bočníku je navržen tak, aby spotřeba výkonu pro transformátor byla blízká nule. Sekundární proud  $I_s$  způsobuje úbytek napětí  $U_s$  na bočniku, který je úměrný primárnímu proudu v amplitudě a fázi. Výstupním signálem z LPCT je úbytek napětí na bočniku  $R_{sh}$ . LPCT se tak stává ideálním z hlediska měřicího rozsahu, přesnosti a menších vnitřních ztrát. Princip funkce je znázorněn na **Obr. 4.8**. Výstupní napětí je určeno vztahem [16]:

$$U_s = R_{sh} \cdot \frac{N_p}{N_s} \cdot I_p \quad (6)$$



Obr. 4.8: Princip funkce elektronického transformátoru malého výkonu [16]

## 5 PROUDOVÉ SENZORY

Modernějším řešením měření proudů a napětí pro jištění a monitorování v energetických systémech vysokého napětí se staly proudové senzory. Proudové senzory byly zavedeny jako následovníci klasických transformátorů proudu. Hnací silou v jejich vývoji byla nutnost standardizovat a optimalizovat výrobu rozváděčů vysokého napětí, ve kterých jsou alternativou ke klasickým přístrojovým transformátorům proudu.

Proudové senzory jsou založeny na principu Rogowského cívky, která je známa již dlouhou dobu, ale uplatnila se až zavedením digitálních přístrojů do sekundárních obvodů, díky kterým je možné využít její výhodné vlastnosti. Tyto nové senzory zužitkují výhody moderních sekundárních zařízení lépe než klasické přístrojové transformátory. Digitální ochrany potřebují pouze informace týkající se primárního proudu a napětí a mají nezbytné informace ke zpracování měřených dat [12].

### 5.1 Definice důležitých pojmů

Pro další popis proudových senzorů je nutné definovat pojmy, které charakterizují základní veličiny a vlastnosti [16].

**Elektronický přístrojový transformátor:** uspořádání jednoho nebo více proudových senzorů, které mohou být zapojeny do přenosového systému a sekundárních převodníků; toto uspořádání je určeno k převodu měřené veličiny pro měřicí přístroje, elektroměry a ochrany nebo řídicí zařízení

**Elektronický transformátor proudu:** elektronický transformátor proudu, u něhož je výstup ze sekundárního převodníku za normálních podmínek použit prakticky úměrný primárnímu proudu a liší se od něj ve fázi o známý úhel pro příslušné zapojení

**Primární svorky:** jsou svorky, kterými prochází měřený proud

**Primární proudový senzor:** elektrické, optické nebo jiné zařízení určené k přenosu signálu odpovídajícímu proudu, který protéká přes primární svorky do sekundárního převodníku přímo, nebo přes primární převodník

**Primární převodník:** uspořádání, které přeměňuje signál, přicházející z jednoho nebo více primárních senzorů na signál vhodný pro přenosový systém

**Přenosový systém:** vazební uspořádání na vzdálenost mezi primárními a sekundárními částmi určenými k přenosu systému

**Sekundární převodník:** uspořádání, které mění signál vyslaný přes vysílací systém na veličinu úměrnou proudu mezi primárními svorkami pro napájení měřicích přístrojů, elektroměrů, jisticích nebo řídicích zařízení

**Sekundární obvod:** vnější obvod, který získává informační signály ze sekundárního převodníku elektronického přístrojového transformátoru

**Jmenovitý kmitočet:** hodnota základního kmitočtu, na které jsou založeny požadavky normy

**Jmenovitý primární proud  $I_{pr}$ :** efektivní hodnota složky primárního proudu při jmenovitém kmitočtu, na kterém je založeno provedení elektronického transformátoru proudu

**Jmenovitý sekundární výstup  $U_{sr}$ :** pro analogový výstup je to efektivní hodnota sekundárního napětí při jmenovitém kmitočtu, na které je založena činnost elektronického transformátoru proudu

**Jmenovitý převod elektronického transformátoru  $K_{ra}$ :** jmenovitá hodnota převodu

**Skutečný převod elektronického transformátoru  $K_a$ :** pro analogový výstup je to poměr skutečné efektivní hodnoty primárního proudu ke skutečné efektivní hodnotě sekundárního výstupu elektronického transformátoru proudu

**Chyba převodu  $\varepsilon_{\%}$ :** je chyba, kterou elektronický transformátor proudu vnáší do měření proudu, a která vyplývá ze skutečnosti, že skutečný převod se liší od jmenovitého

Pro analogový výstup bude chyba proudu v procentech dána vztahem:

$$\varepsilon_{\%} = \frac{K_{ra} \cdot U_s - I_p}{I_p} \cdot 100 \quad (7)$$

**Chyba úhlu  $\varphi$ :** pro analogový výstup je to rozdíl fáze mezi fázory primárního a sekundárního proudu; orientace fázorů je zvolena tak, aby úhel se rovnal jeho jmenovité hodnotě při jmenovitém kmitočtu u ideálního elektronického transformátoru; chyba úhlu se považuje za kladnou, když fázor sekundárního výstupu předchází fázor primárního proudu; chyba úhlu se vyjadřuje v minutách nebo centiradiánech

**Třída přesnosti:** označení přiřazené elektronickému transformátoru proudu, jehož chyba proudu a úhlu nepřekročí povolené mezní hodnoty v předepsaných provozních podmínkách

**Nejvyšší napětí pro zařízení  $U_m$ :** nejvyšší efektivní hodnota sdruženého napětí pro které je elektronický transformátor proudu konstruován s ohledem na jeho izolaci

**Jmenovitá izolační hladina:** kombinace hodnot napětí, která charakterizuje izolaci z hlediska jeho schopnosti odolávat elektrickému namáhání

**Proud pro vybavení:** nejmenší efektivní hodnota primárního proudu nezbytná pro vybavení elektronického transformátoru proudu

**Břemeno:** impedance sekundárního obvodu vyjádřená v ohmech při  $\cos \varphi = 1$

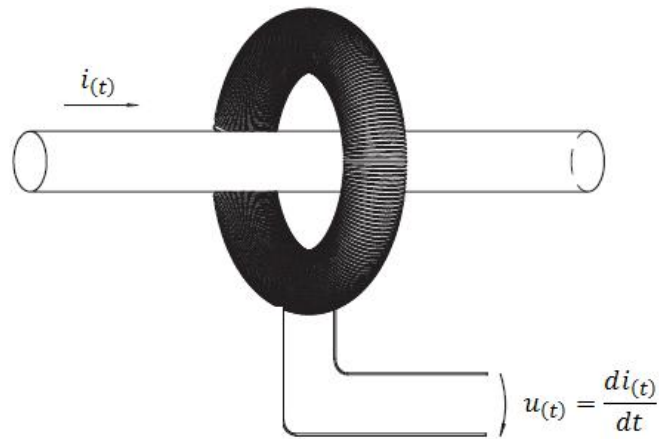
**Jmenovité břemeno  $R_{br}$ :** hodnota břemena, na kterou jsou založeny požadavky na předepsanou přesnost

**Jmenovité zpoždění  $t_{dr}$ :** jmenovitá hodnota času, který je potřebný pro zpracování údajů a jejich přenos

**Korekční činitel:** Amplitudová chyba proudového senzoru je v celém rozsahu konstantní, a proto ji můžeme korigovat korekčním činitelem. Korekční činitel je měřen pro každý senzor samostatně při kusových zkouškách.

## 5.2 Princip činnosti proudových senzorů

Jak již bylo zmíněno, proudové senzory jsou založeny na principu Rogowského cívky. Rogowského cívka je speciálně vinutá cívka na nemagnetickém jádře, která je umístěna okolo vodiče, kterým protéká měřený proud, jak je znázorněno na **Obr. 5.1**.



Obr. 5.1: Princip měření proudu pomocí Rogowského cívky [18]

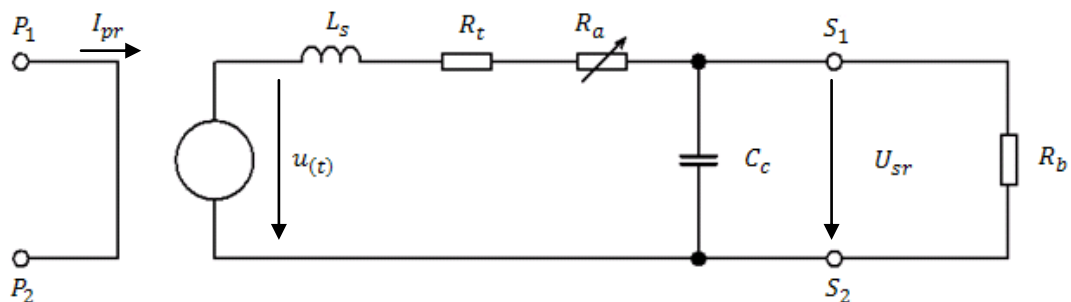
Jestliže má jádro konstantní průřez a závitů jsou navinuty kolmo k průřezu jádra s konstantní hustotou, pak je výstupní napětí definováno rovnicí [11]:

$$u(t) = -\mu_0 \cdot n \cdot S \cdot \frac{di(t)}{dt} = -M \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (8)$$

Pro napětí  $u(t) = U_{sr} \cos \omega t$  získáme integrací průběh primárního proudu podle [10]:

$$i(t) = -\frac{1}{M \cdot \omega} \cdot U_{sr} \sin \omega t \quad (9)$$

Výstupní napětí je úměrné derivaci okamžité hodnoty měřeného proudu. V případě sinusového proudu je výstupní napětí fázově posunuto o 90 stupňů [10]. Výsledný neintegrováný signál je odlišný od průběhu měřeného proudu, avšak integrací tohoto signálu získáme přesný časový průběh měřeného proudu. Integrace výstupního signálu se provádí pomocí pasivních RC (rezistor-kondenzátor) integrátorů nebo operačních zesilovačů. V sítích vysokého napětí integrace výstupního signálu není vždy prováděna v samotné cívce, ale v připojených zařízeních, což vede ke snížení nákladů na výrobu. Na **Obr. 5.2** je náhradní schéma Rogowského cívky.



Obr. 5.2: Náhradní schéma Rogowského cívky [16]

Vinutí cívky je nahrazeno rozptylovou indukčností  $L_s$  a odporem  $R_t$ , který zahrnuje také odpor připojeného kabelu. Odpor  $R_a$  je volitelný, je používám pro potřeby kalibrace. Tento odpor kompenzuje výrobní tolerance v rozměrech vinutí a v hodnotách počtu závitů. Kapacita  $C_c$  odpovídá kapacitě připojeného kabelu. Hodnota zatěžovací impedance  $R_b$  musí být velká, ideálně nekonečná, aby nevznikaly chyby měření vlivem úbytků napětí na vinutí a připojeném kabelu. Pro výstupní napětí platí [16]:

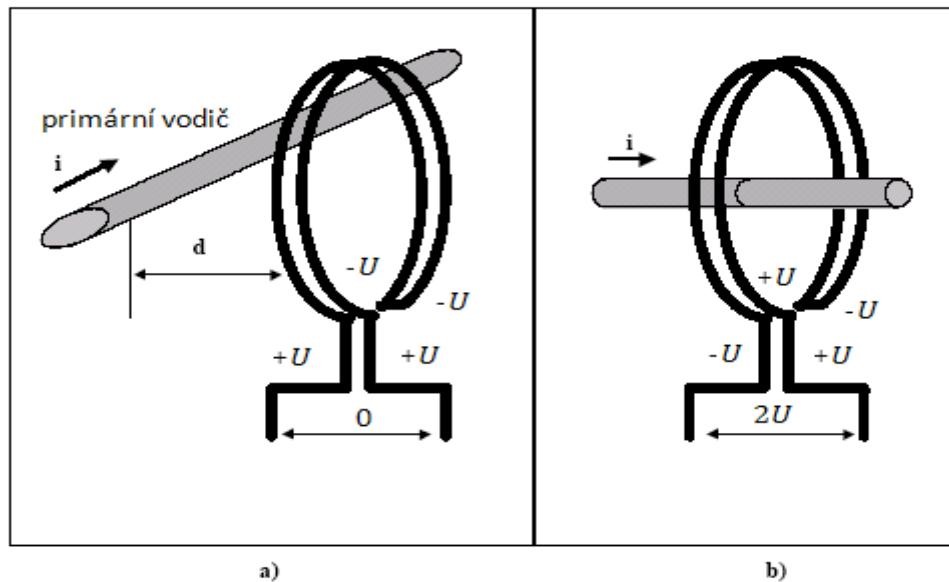
$$U_{sr} = \frac{R_b}{R_t + R_a + R_b + j\omega L_s} \cdot j\omega \cdot M \cdot I_{pr} \quad (10)$$

Pro  $R_b \rightarrow \infty$  pak platí [16]:

$$U_{sr} = j\omega \cdot M \cdot I_{pr} \quad (11)$$

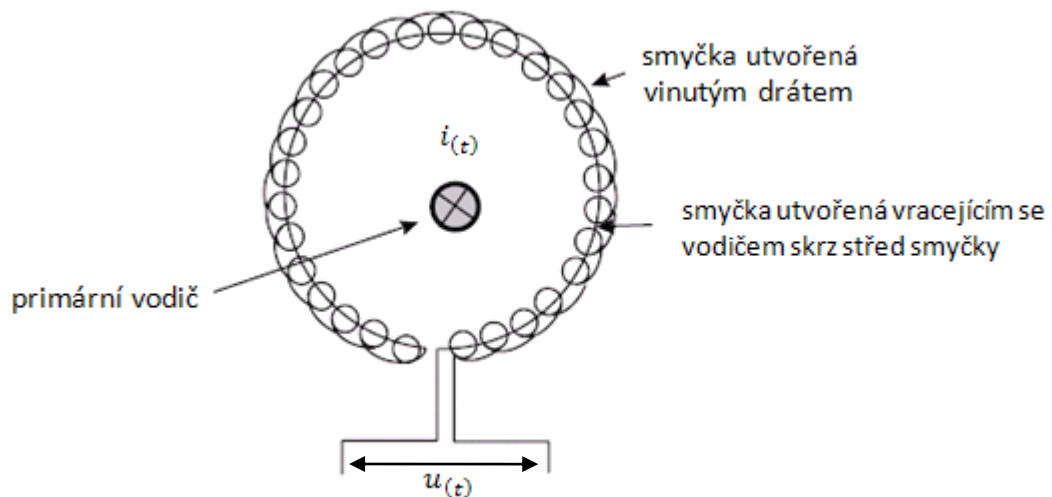
### 5.3 Provedení Rogowského cívky

Pro ideální Rogowského cívku je vzájemná indukčnost  $M$  nezávislá na umístění vodiče uvnitř cívky. K zabránění vlivu blízkých vodičů, kterými tečou velké proudy, musí být Rogowského cívka zkonstruována ze dvou vodičových smyček spojených v elektricky opačných směrech. Tento způsob odstranění vlivu všech vnějších elektrických polí působících na Rogowského cívku je zobrazen na **Obr. 5.3a**. Obě smyčky mohou být utvořeny navinutím na nemagnetické jádro, nebo druhá smyčka může být utvořena vracejícím se drátem skrz střed vinutí první smyčky. Tento způsob je zobrazen na **Obr. 5.4**. Jestliže jsou obě smyčky z vinutého drátu, musí být druhé vinutí vinuto v opačném směru. V tomto případě napětí indukované v cívce je dvojnásobné, jak ukazuje **Obr. 5.3b** [9].



Obr. 5.3: Výstupní napětí Rogowského cívky pro a) vodič vně, b) uvnitř cívky [9]



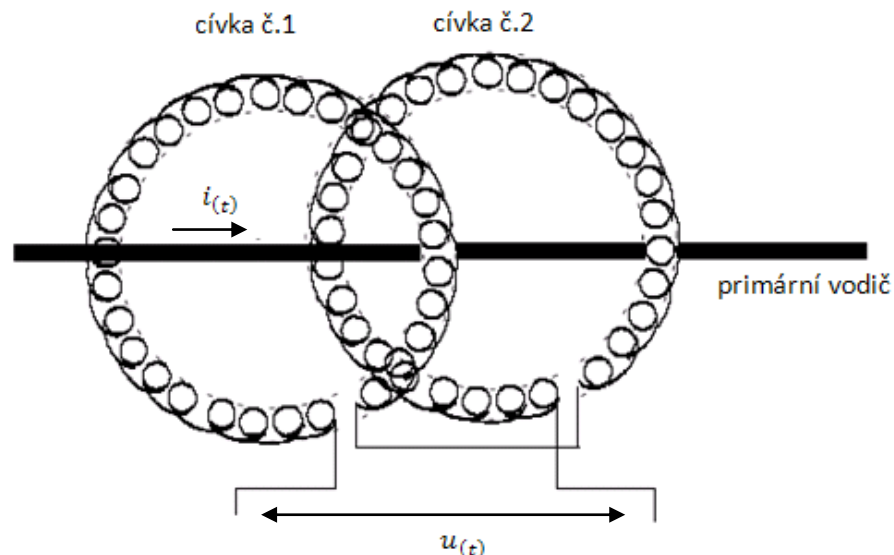


Obr. 5.4: Rogovského cívka se smyčkou tvořenou vracejícím se vodičem [10]

Novou metodou výroby velmi přesných Rogovského cívek různých tvarů je použití desek plošných spojů (PCB).

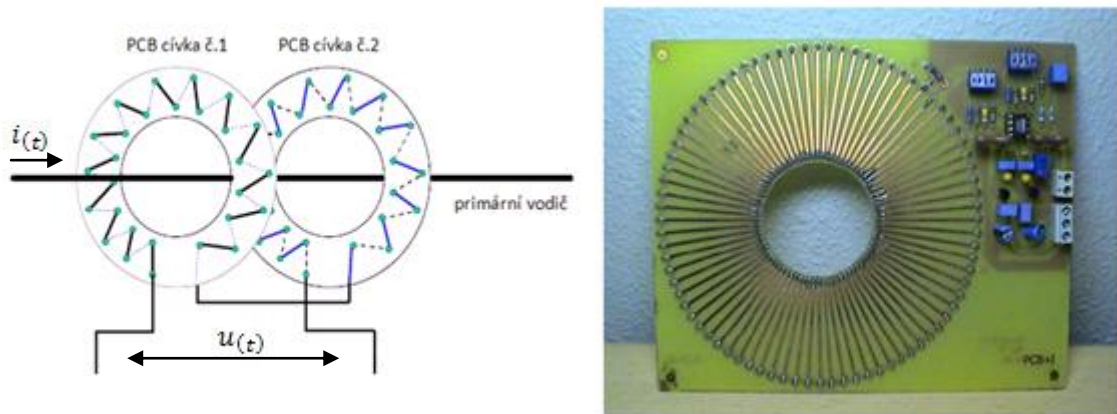
### 5.3.1 Provedení PCB Rogovského cívky

Tradičně se Rogovského cívky skládají ze dvou vrstev vinutí umístěných na sobě. Nově patentovaný způsob konstrukce Rogovského cívky se skládá ze dvou vzájemně propojených cívek umístěných blízko sebe, viz Obr. 5.5. Druhá cívka je vinuta v opačném směru než první cívka.



Obr. 5.5: Princip PCB Rogovského cívky [9]

K dosažení ještě větší přesnosti bylo dosaženo použitím dvou samostatných PCB cívek umístěných blízko sebe, viz Obr. 5.6. Cívky jsou vinuty v opačných směrech (pravotočivě a levotočivě). Vrchní a spodní strana desky plošných spojů je vtisknuta do formy. První cívka má pravotočivý smysl a pokračuje ve směru hodinových ručiček okolo středu desky. Druhá cívka je umístěna stejným způsobem s rozdílem levotočivého vinutí [9].

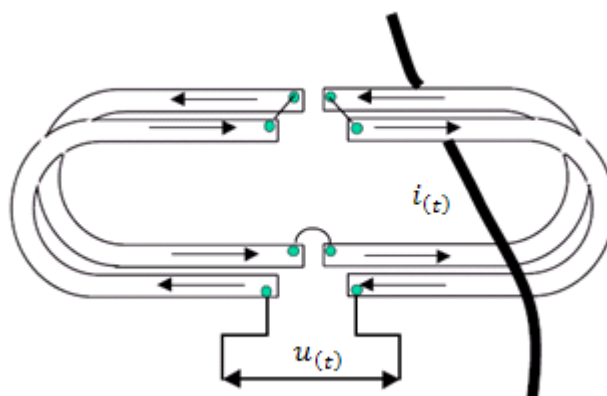


Obr. 5.6: Princip Rogowského cívky využívající dvou PCB cívek [9] a její provedení [6]

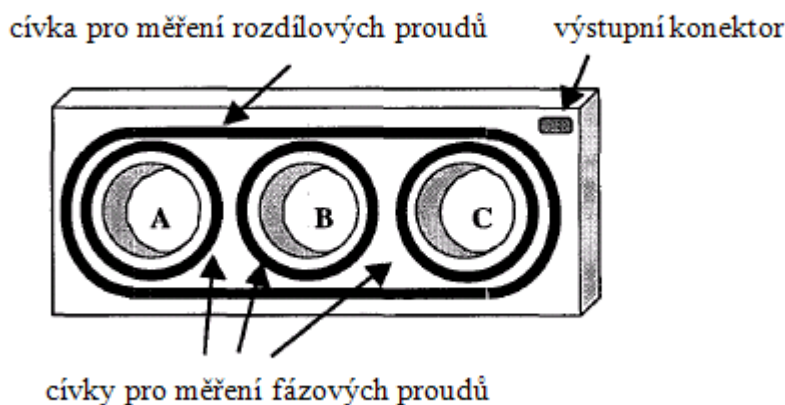
Vysoké přesnosti je dosaženo řízením výrobního procesu počítači, díky kterým je zaručena přesná geometrie cívek. Nové způsoby konstrukce Rogowského cívek používají vícevrstvé PCB cívky, které poskytují větší přesnost a zdokonalují výrobu.

PCB Rogowského cívky mohou být provedeny v různých tvarech, aby se mohly přizpůsobit konkrétnímu použití. Mohou být také vyrobeny s děleným jádrem pro instalaci bez nutnosti přerušení měřeného vodiče. Na **Obr. 5.7** je znázorněn oválný tvar Rogowského cívky s děleným jádrem, které umožňuje obejmout trojfázové vodiče pro měření rozdílových proudů, nebo více paralelních vodičů. V tomto případě je jádro rozděleno na čtyři části. První dvě části jsou zkonstruovány se dvěma PCB cívkami s vinutými navinutými v opačném směru [10].

Konstrukce PCB Rogowského cívek k měření fázových a zemních proudů je znázorněna na **Obr. 5.8**. Jedná se o čtyři samostatné cívky zabudované v jednom rámu. Tři cívky měří fázové proudy tekoucí jednotlivými vodiči a čtvrtá cívka pro měření rozdílových proudů, které vznikají v případě poruchy některé fáze [8].



Obr. 5.7: PCB Rogowského cívka s děleným jádrem [10]



Obr. 5.8: Princip konstrukce PCB cívek pro měření fázových a rozdílových proudů [8]

## 5.4 Vlastnosti proudových senzorů

Použitím Rogovského cívek získávají proudové senzory řadu výhodných vlastností, díky kterým nacházejí nové možnosti využití.

Následující technická data jsou založena na přehledu komerčně používaných proudových senzorů. Ve většině případů použití se proudový senzor skládá z měřicí hlavy a přípojovacího kabelu, případně i zabudovaného integrátoru. Druh a délka použitého kabelu mají vliv na celkovou přesnost proudového senzoru. Z tohoto důvodu musí být přesnost každého senzoru zkoušena společně s daným kabelem, který nesmí být nahrazen jiným typem kabelu.

Proudové senzory mají tyto typické vlastnosti [14]:

- **Lineární proudový rozsah:** Proudové senzory mají velmi široký rozsah proudů, které jsou schopny změřit. V současnosti jsou k dispozici senzory s rozsahy od 30 A do 100 kA. Maximální hodnota proudového rozsahu je ovlivněna frekvencí a amplitudou měřeného proudu. Nejnižší a nevyšší hodnota závisí především na použité měřicí technice.

Díky absenci magnetického jádra je zaručena linearita měření v celém proudovém rozsahu. Chyba proudového senzoru je v celém rozsahu lineární a je způsobena reaktancí vinutí, výrobními odchylkami ve vinutí a průřezu jádra a také velikostí zesílení integrátoru.

- **Přesnost měření:** Pokud je jádro a vinutí vyrobeno pečlivě, celková přesnost proudového senzoru může dosáhnout 0,5% pro rozváděče vysokého napětí. Největšími zdroji nepřesností jsou teplotní změny, výrobní tolerance a vliv ostatních vodičů. Výrobní tolerance v rozměrech vinutí a počtu závitů mohou být kompenzovány kalibračními rezistory, nebo použitím korekčního činitele, který je uveden na štítku senzoru. Korekční činitel je měřen pro každý senzor samostatně při kusových zkouškách.

Dále projevují senzory závislost přesnosti na umístění měřeného vodiče uvnitř měřicí hlavy. Senzory s děleným jádrem vykazují maximální chybu v místě rozdělení jádra. Tato chyba může dosáhnout hodnot od  $\pm 1\%$  do  $\pm 4\%$ . Závislost přesnosti na umístění vodiče uvnitř měřicí hlavy může být minimalizována pečlivým návrhem a použitou technologií výroby.

- **Kmitočtový rozsah:** Pro praktické účely jsou proudové senzory vyráběny pro kmitočty 50 Hz a 60 Hz. Jsou však použitelné pro kmitočty od jednotek Hz po stovky kHz.
- **Výstupní signál:** Běžně používané proudové senzory poskytují bezpečné výstupní napětí, které je typicky vyjádřeno jako citlivost v rozmezí od 0,01 mV/A do 200 mV/A. Rozsah výstupního napětí se pohybuje od 200 mV do 10 V podle typu senzoru.
- **Teplotní závislost:** Většina používaných senzorů má vymezený teplotní rozsah zvláště pro měřicí hlavu a integrační elektroniku. Pro použití mimo uvedený teplotní rozsah se používá speciálních úprav měřicí hlavy nebo speciální kalibrace. Teplotní závislost měřicí hlavy je způsobena roztažností závitů, roztažností jádra cívky a teplotní závislostí vinutí cívky.
- **Elektromagnetická kompatibilita:** Velký vliv na přesnost proudových senzorů mají vnější magnetická pole, která pocházejí od ostatních vodičů v blízkosti umístění senzoru. Vliv těchto vodičů je závislý na vzdálenosti od senzoru a také na velikosti proudu, který protéká vodičem. Problémy mohou nastat v prostředích rozváděčů vysokého napětí, pokud není vliv vnějších magnetických polí zahrnut do návrhu a provedení proudových senzorů.

## 5.5 Použití proudových senzorů

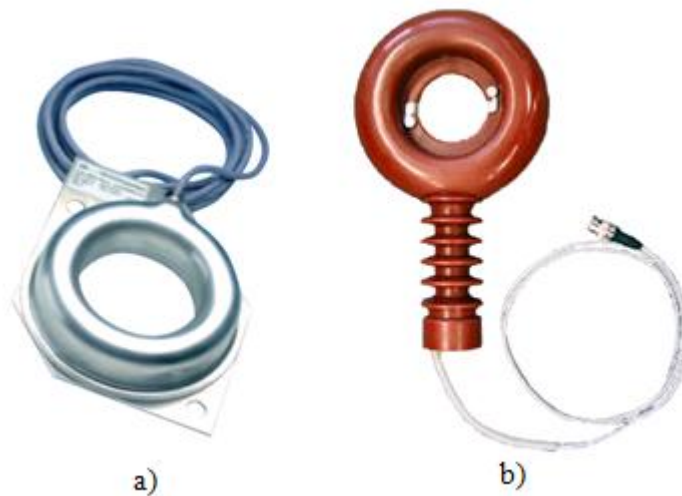
Velké množství různých tvarů a velikostí umožňuje použití proudových senzorů v řadě různých aplikací. Jejich kompaktní rozměry a nízká hmotnost umožňují snadnou manipulaci a instalaci v místě potřeby. Proudové senzory našly své využití pro měření a jištění zařízení, ve kterých není možné použít klasické proudové transformátory. Proudové senzory mohou nahrazovat rozměrné klasické transformátory proudu v rozváděčích vysokého napětí. S velkou výhodou se používají s diferenciálními ochranami strojů, kterými tečou značné proudy.

Typickým příkladem takového použití je chránění transformátorů obloukových pecí, velkých generátorů a motorů. Případným poškozením takového stroje vlivem špatného působení ochrany vznikají značné finanční náklady. U transformátorů obloukových pecí je obvykle nadproudová ochrana použita na primární straně, protože měření proudů na sekundární straně je značně obtížné. Hodnoty proudu na sekundární straně běžně dosahují hodnot desítek kiloampér, což vyžaduje značné průřezy několika vodičů, které bývají chlazeny vodou. Případná porucha na sekundární straně nebývá ochranou zachycena a obvykle se vypíná manuálně obsluhou pece. Použitím ochrany, které jsou napájeny proudovými senzory na primární i sekundární straně můžeme dosáhnout spolehlivého chránění drahých transformátorů [11].

## 5.6 Provedení proudových senzorů

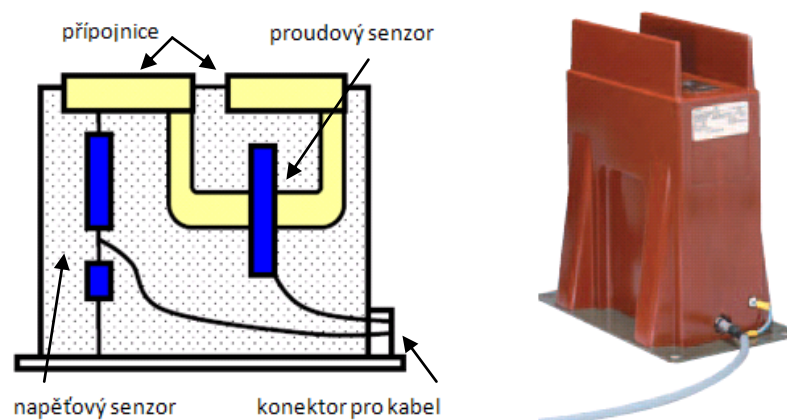
Jak již bylo uvedeno, proudové senzory se vyrábějí pro velice rozličné aplikace. To má za následek množství různých konstrukcí senzorů, aby bylo dosaženo optimálních vlastností pro jednotlivá použití.

Jako první se proudové senzory začaly vyrábět pro běžné měřicí a jistící použití. Jedná se o senzory vyráběné firmou ABB. Provedení takového senzoru je na **Obr. 5.9a**. Dalším vývojem byly senzory přizpůsobené pro použití v rozváděčích vysokého napětí, ve kterých jsou složité podmínky z hlediska ovlivňování vnějšími magnetickými poli. Tento typ senzoru je zobrazen na **Obr. 5.9b**. Tyto senzory pro vnitřní použití mají malé rozměry a hmotnost jen několik kilogramů.



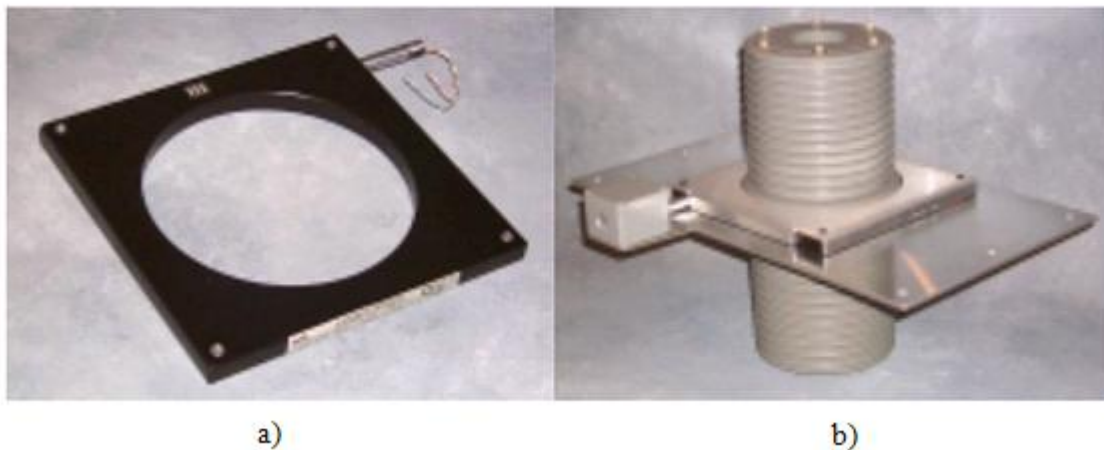
Obr. 5.9: Provedení proudových senzorů pro vnitřní použití [18]

Dále vyráběnými senzory jsou kombinované senzory proudu a napětí. Tyto senzory jsou rovněž pro vysoké napětí vnitřního použití. Provedení tohoto transformátoru je na **Obr. 5.10**. Na první pohled, je svým provedením velmi podobný klasickému transformátoru proudu *podpěrného* provedení viz **Obr. 4.4**. Liší se však připojeným kabelem, se kterým je proudový senzor podroben zkouškám přesnosti.



Obr. 5.10: Schéma a provedení kombinovaného senzoru [18]

Příklad provedení proudových senzorů typicky používané pro ochranu zmíněných transformátorů obloukových pecí je znázorněno na následujících obrázcích. Na **Obr. 5.11a** je proudový senzor pro měření na primární straně transformátoru. Senzor je umístěn okolo průchodky vodiče, jak je vidět na **Obr. 5.11b**.



*Obr. 5.11: Proudový senzor pro měření na primáru transformátoru obloukové pece [7]*

Na sekundární straně transformátoru je měření proudu složitější. Pro každou fázi se používá více paralelních vodičů trubkového průřezu, které jsou chlazené vodou. Senzor tak musí být dostatečně velký. Příklad takových senzorů je na **Obr. 5.12a**. Jejich umístění okolo fázových vodičů pak na **Obr. 5.12b**.



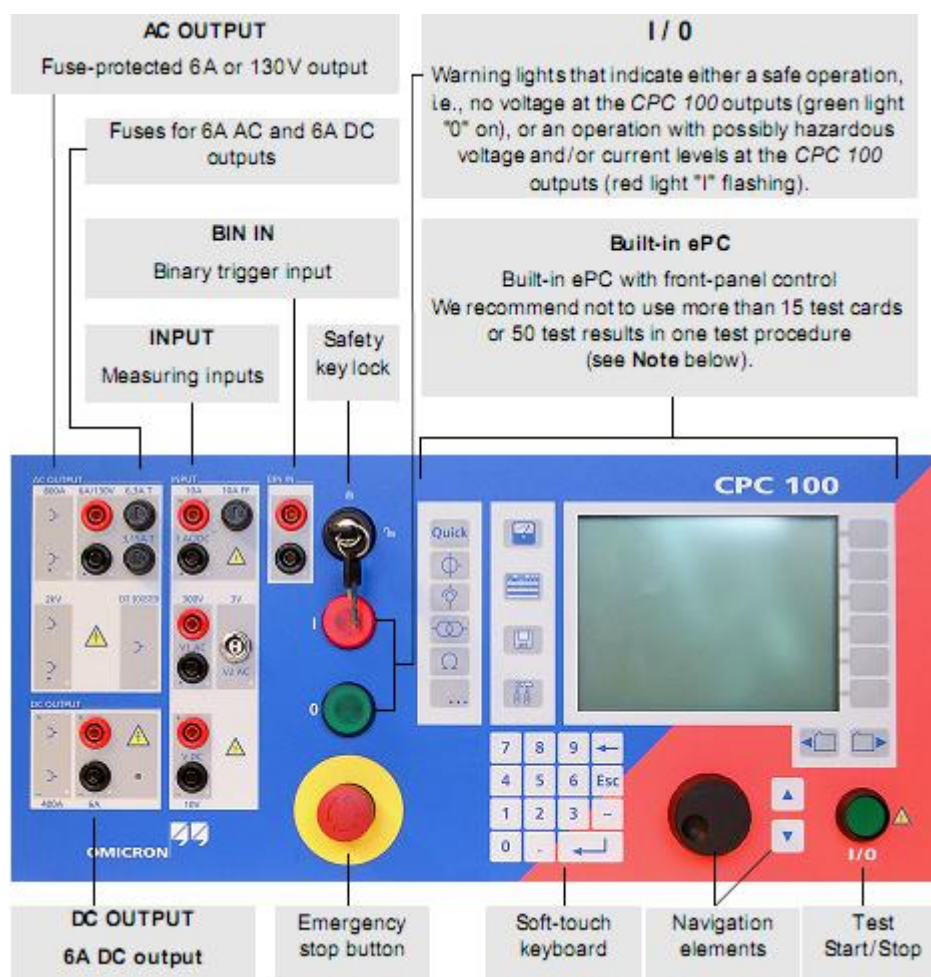
*Obr. 5.12: Proudové senzory pro měření na sekundární straně a), a jejich umístění b) [7]*

## 6 LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Praktická část bakalářské práce spočívá v ověření teoretických poznatků v laboratorních podmínkách. Pro měření jsme používali testovací systém *CPC 100* od firmy *OMICRON electronics* [20].

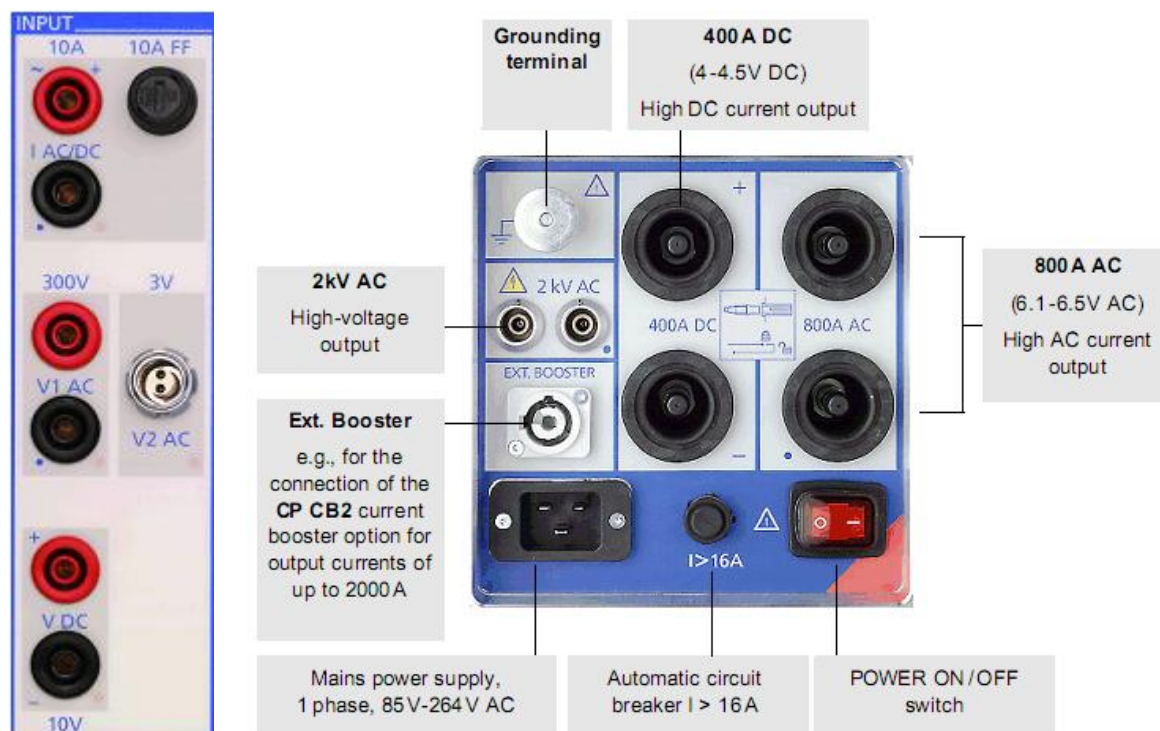
### 6.1 Testovací systém CPC 100

CPC 100 je multifunkční testovací systém, který slouží pro automatizované testování výkonových transformátorů, přístrojových transformátorů proudu a napětí a proudových senzorů. Měření se provádí vkládáním měřicích karet, ve kterých se nastavují použité vstupy a výstupy. Do měřicích karet se postupně navolí požadované hodnoty výstupního proudu a spustí se měření. Naměřené hodnoty se ukládají do karet a po skončení měření je lze uložit na externí médium pomocí USB rozhraní. Na **Obr. 6.1** je zobrazen čelní panel testovacího systému CPC 100, kterým se ovládá celé měření.



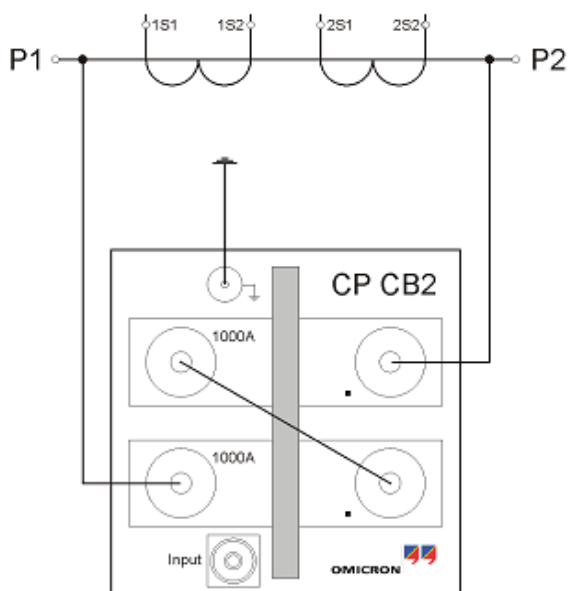
Obr. 6.1: Čelní panel testovacího systému CPC 100 [17]

Tento systém je vybaven výstupem vysokého napětí o velikosti 2 kV AC, proudovými výstupy 400 A DC a 800 A AC. Po připojení externího zesilovače je možné dosáhnout hodnoty výstupního proudu až 2000 A AC. Měřicí proudový vstup má rozsah 10 A AC/DC. Napěťový vstup V1 má rozsah 300 V AC, vstup V2 má rozsah 3 V AC. Stejnoseměrný napěťový vstup má rozsah 10 V DC. Detail vstupů a výstupů je na **Obr. 6.2**.

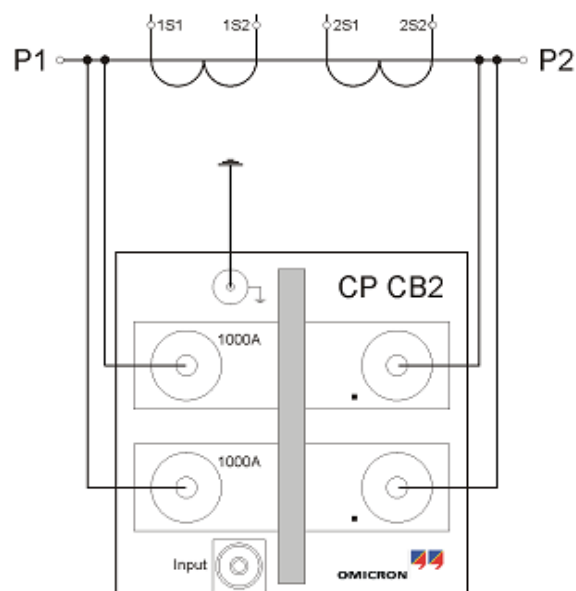


Obr. 6.2: Detail napětových a proudových vstupů a výstupů [17]

Proudové výstupy z CPC 100 jsou s měřeným přístrojem propojeny kabely o průřezu  $70 \text{ mm}^2$ , které jsou na jednom konci vybaveny speciálními konektory a na druhém konci kleštěmi. Pro zvýšení rozsahu měření použijeme externí zesilovač proudu CP CB2. Ten nám umožní nastavovat proudy až do hodnoty 2000 A. Zesilovač proudu se propojí s CPC 100 kabelem  $3 \times 2,5 \text{ mm}^2$  speciálními koncovkami. Proudový výstup je pak tvořen kabely o průřezu  $95 \text{ mm}^2$ , jak je zobrazeno na **Obr. 6.3** a **Obr. 6.4**.



Obr. 6.3: Zapojení zesilovače na rozsah 1000 A [17]



Obr. 6.4: Zapojení zesilovače na rozsah 2000 A [17]



## 6.2 Měření přístrojového transformátoru proudu

K dispozici jsme měli přístrojový transformátor proudu firmy ABB, pro který jsme určili chyby proudu a úhlu obou vinutí a dále naměřili magnetizační charakteristiku obou jader. Měřený transformátor proudu má tyto štítkové parametry:

TPU 40.13

S/N: 1VLT5106019176

80//5/5 A ext. 120%, 50 Hz

1S1-1S2: 5 VA cl.0,5 FS10

2S1-2S2: 10 VA cl.5P 10

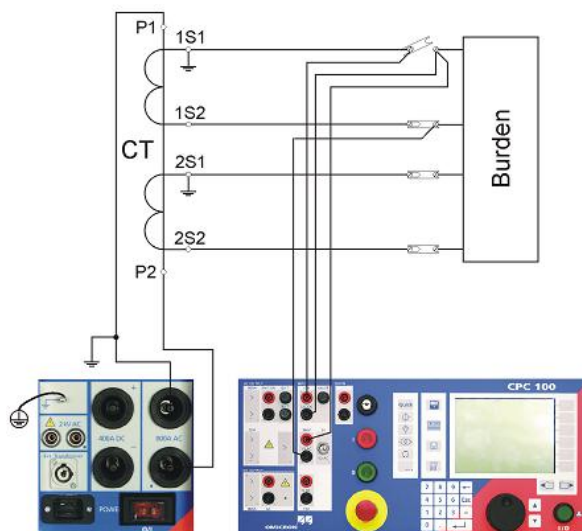
Ze štítku PTP můžeme odečíst následující údaje:

Začátek měřicího vinutí je na transformátoru označen 1S1, konec měřicího vinutí je označen 1S2. Jmenovitý primární proud je 80 A, jmenovitý sekundární proud je 5 A. Udávaná třída přesnosti vinutí je 0,5. Dovolené chyby proudu a úhlu jsou uvedeny v **Tab. 4.1** při jmenovitém břemeni 5 VA. Hodnota nadproudu čísla je 10, jehož význam je uveden v kapitole **4.1.2**.

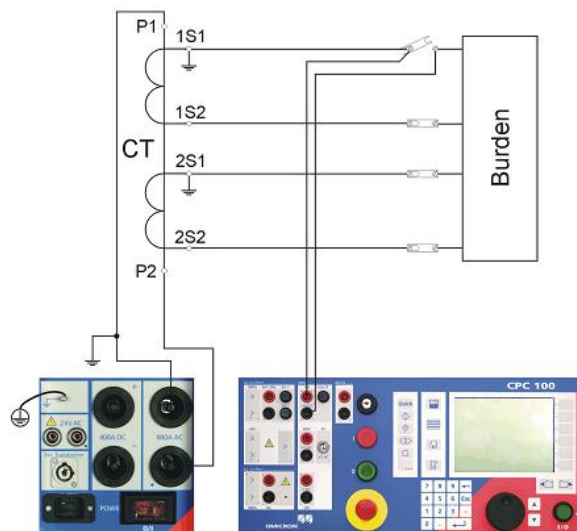
Začátek jisticího vinutí je označen 2S1, konec jisticího vinutí je označen 2S2. Jmenovitý primární proud je 80 A, jmenovitý sekundární proud je 5 A. Udávaná třída přesnosti vinutí je 5P. V této třídě přesnosti je podle **Tab. 4.2** požadována přesnost měření  $\pm 1\%$  při hodnotě jmenovitého primárního proudu a jmenovitém břemeni 10 VA. Zároveň chyba úhlu nesmí překročit hranici  $\pm 60$  minut. Hodnota nadproudu činitele je 10, jehož význam je uveden v kapitole **4.1.3**.

### 6.2.1 Měření přesnosti PTP

Pro měření přesnosti obou vinutí PTP zapojíme obvod podle **Obr. 6.5**. Sekundární vinutí, na kterém neprobíhá měření, zkratujeme. Jako zátěž sekundárního obvodu je zapojen reostat.



Obr. 6.5: Schéma zapojení pro nastavení jmenovité zátěže [17]



Obr. 6.6: Schéma zapojení pro měření přesnosti PTP [17]

Vložíme měřicí kartu *CT Burden* a spustíme měření. Změnou polohy jezdce reostatu nastavíme jmenovitou hodnotu zátěže. Po nastavení zátěže přepojíme obvod podle schématu na **Obr. 6.6**. Nyní vkládáme měřicí karty *Sequencer*, které nám umožňují vkládat více měřených hodnot do jedné karty. Postupně nastavujeme požadované hodnoty primárních proudů do hodnoty 160 A. Poté přerušíme měření, abychom nepřekročili rozsah vstupu, a dále měříme sekundární proud pomocí Hallovy sondy, jejíž výstup připojíme na napěťový vstup V2. Pokračujeme dále v měření až do hodnoty maximálního proudu 800 A, poté měření opět přerušíme a propojíme CPC 100 s proudovým zesilovačem CP CB2.

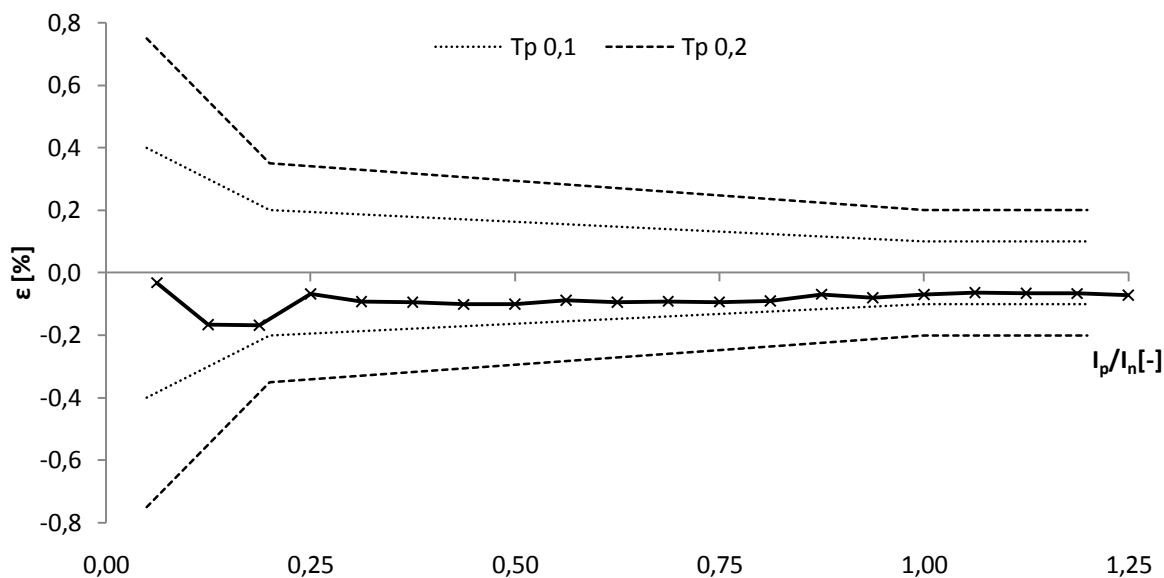
Pro změření přesnosti měřicího vinutí a oblasti nasycení jádra nám postačí hodnoty primárního proudu do 1000 A. Primární obvod tedy zapojíme podle **Obr. 6.3**. Pro změření přesnosti jisticího vinutí při nadproudech a oblast nasycení jádra zapojíme primární obvod podle **Obr. 6.4**. Měření ukončíme v okamžiku, kdy vlivem přesycení magnetického jádra nebude měřicí systém CPC 100 chopen nastavit požadovaný proud.

Všechny naměřené výsledky uložíme a graficky zpracujeme.

### 6.2.2 Chyby proudu a úhlu měřicího vinutí

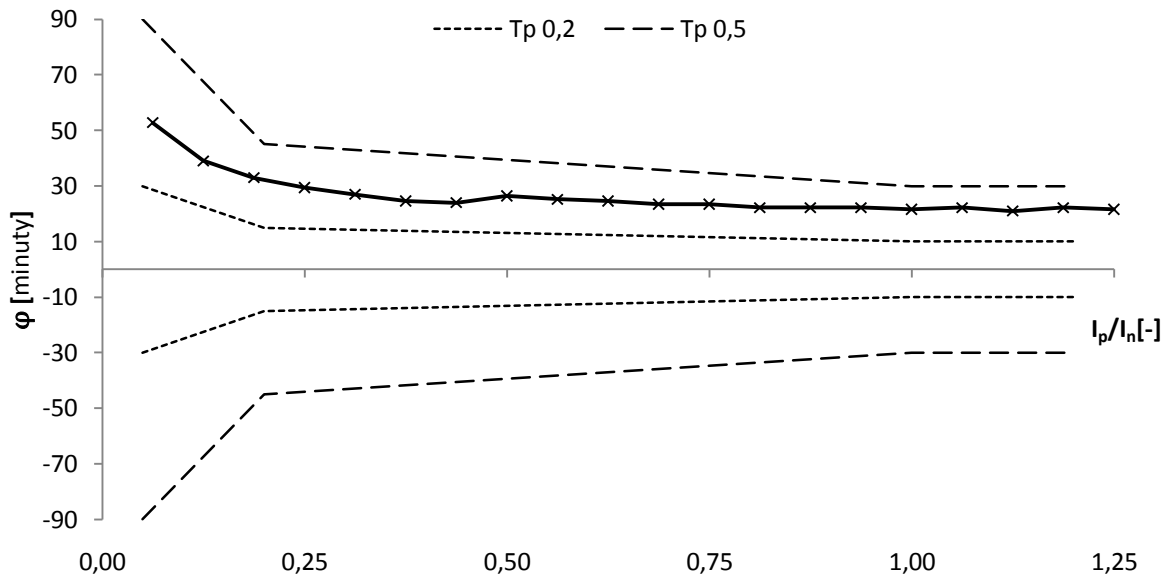
Z naměřených a vypočtených hodnot, které jsou uvedeny v **Tab. P.1** jsme zobrazili průběhy chyb proudu a úhlu měřicího vinutí. Pro určení třídy přesnosti měřicího vinutí testovaného PTP potřebujeme znát chyby měření ve jmenovitém rozsahu do hodnoty 120 % jmenovitého primárního proudu. V grafech jsou s výslednými průběhy chyb zobrazeny hraniční křivky, které vymezují určité třídy přesnosti.

Na **Obr. 6.7** je znázorněn průběh chyby proudu měřicího vinutí. Z tohoto průběhu vyplývá, že měřicí vinutí splňuje podmínky třídy přesnosti 0,1.



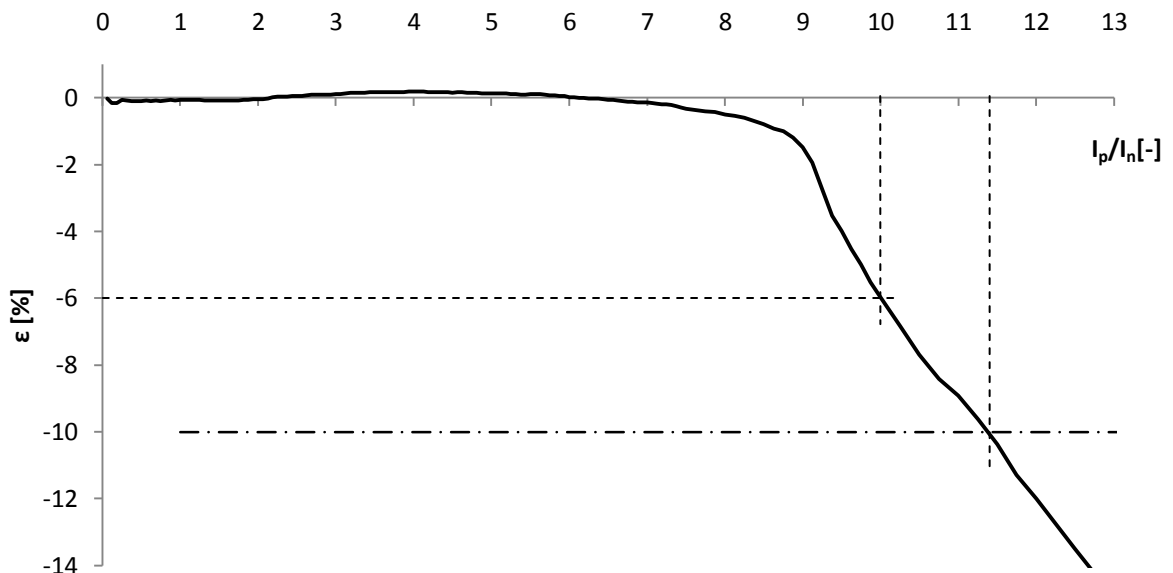
Obr. 6.7: Průběh chyby proudu měřicího vinutí

Na **Obr. 6.8** je znázorněn průběh chyby úhlu měřicího vinutí. Z tohoto průběhu vyplývá, že chyba úhlu měřicího vinutí se pohybuje mezi hranicemi třídy 0,2 a 0,5. Chyba úhlu tedy vyhovuje třídě přesnosti 0,5.



Obr. 6.8: Průběh chyby úhlu měřicího vinutí

Pro určení nadproudového čísla měřicího vinutí jsme potřebovali změřit průběh chyby proudu minimálně do desetinásobku jmenovitého primárního proudu. Nadproudové číslo je definováno jako poměr jmenovitého nadproudu ke jmenovitému proudu. U měřicího vinutí je jmenovitý nadproud takový proud, který způsobí chybu měření  $\geq 10\%$ . Průběh chyby proudu v nadproudové oblasti měřicího vinutí je na **Obr. 6.9**. Z tohoto průběhu můžeme přímo odečíst hodnotu nadproudového čísla. Vidíme, že 10 % chyba měření vznikla při více než jedenáctinásobku hodnoty jmenovitého primárního proudu. Při nadproudovém čísle 10, které udává výrobce, byla chyba měření 6 %.



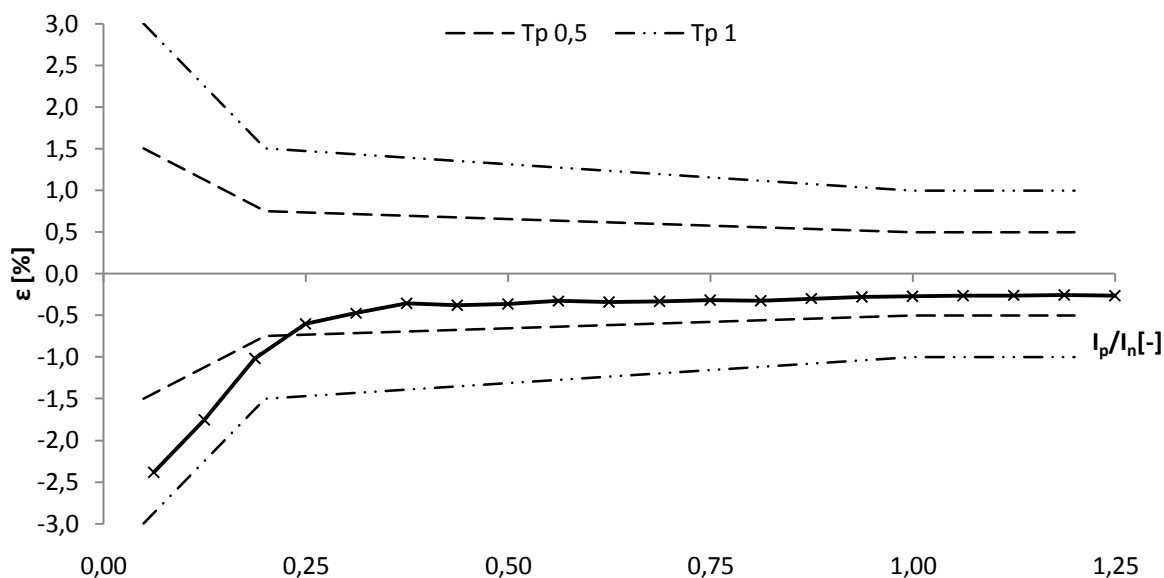
Obr. 6.9: Určení nadproudového čísla měřicího vinutí

Měřicí vinutí PTP vyhovuje třídě přesnosti 0,5. Pro toto vinutí jsme změřili nadproudové číslo přibližně 11,5. Z řady jmenovitých hodnot vybereme nejbližší vyšší hodnotu 12.

### 6.2.3 Chyby proudu a úhlu jisticího vinutí PTP

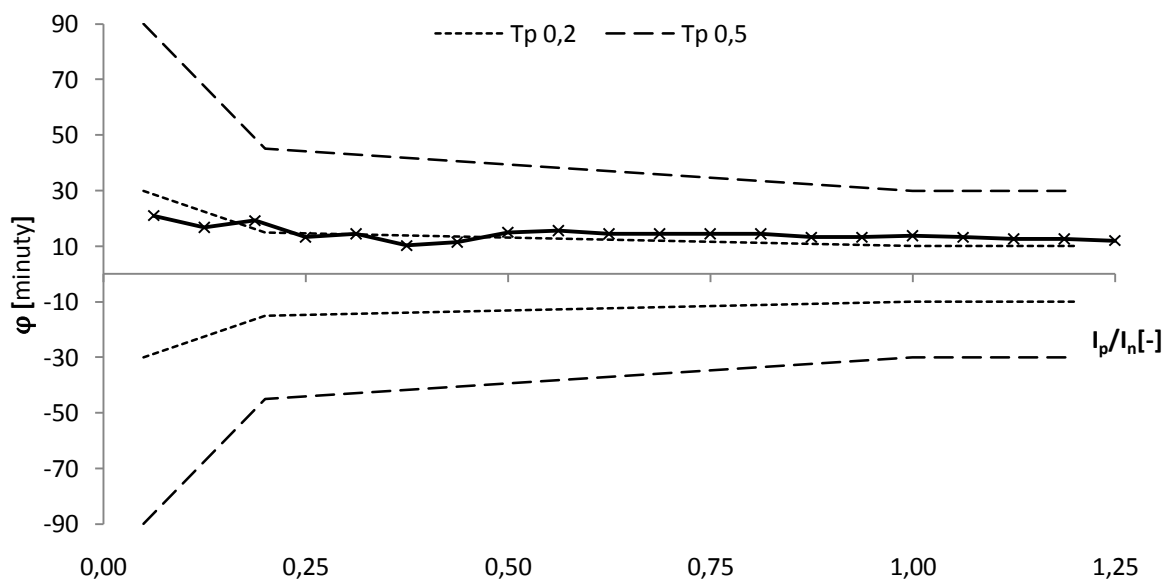
Z naměřených a vypočtených hodnot, které jsou uvedeny v **Tab. P.2** jsme zobrazili průběhy chyb proudu a úhlu jisticího vinutí. U jisticího vinutí nepotřebujeme znát třídu přesnosti ve jmenovitém rozsahu, ale potřebujeme znát třídu přesnosti v nadproudové oblasti. Třídu přesnosti ve jmenovitém rozsahu uvádíme pro porovnání s měřicím vinutím.

Průběh chyby proudu ve jmenovitém rozsahu je na **Obr. 6.10**. Z tohoto průběhu vyplývá, že chyba proudu jisticí vinutí vyhovuje třídě přesnosti 1.



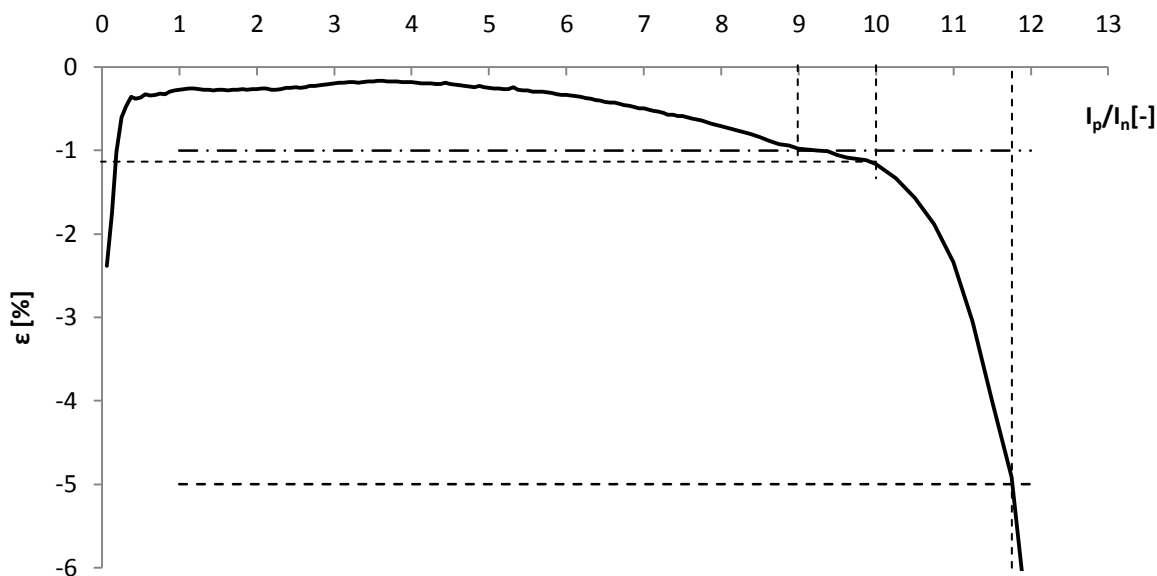
Obr. 6.10: Průběh chyby proudu jisticího vinutí ve jmenovitém rozsahu

Na **Obr. 6.11** je znázorněn průběh chyby úhlu jisticího vinutí ve jmenovitém rozsahu. Z tohoto průběhu vyplývá, že chyba úhlu jisticího vinutí vyhovuje třídě přesnosti 0,5.



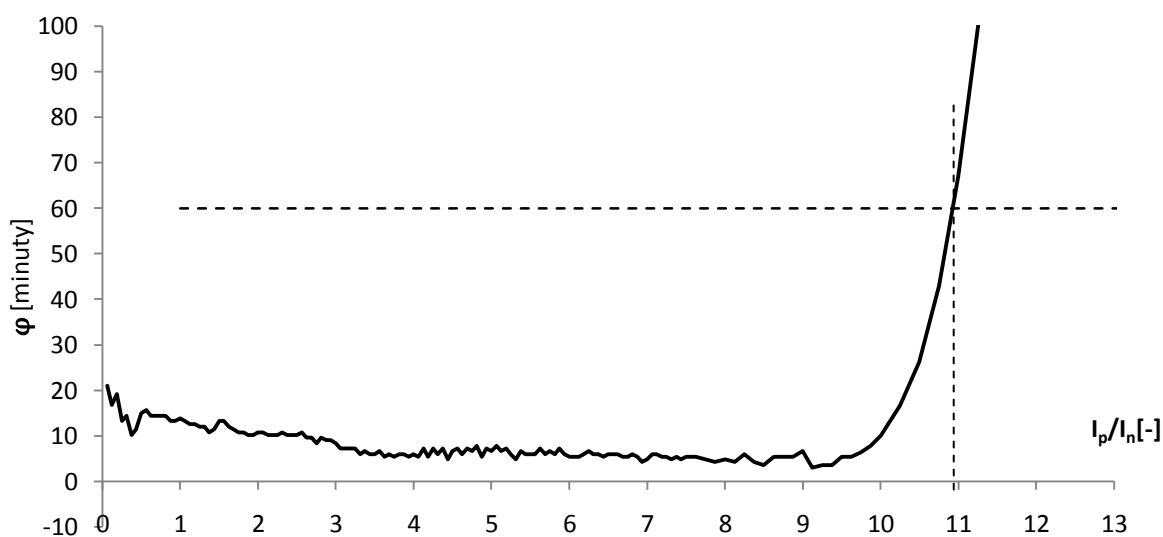
Obr. 6.11: Průběh chyby úhlu jisticího vinutí ve jmenovitém rozsahu

Třída přesnosti jisticího vinutí se určuje podle chyby proudu a úhlu v nadproudové oblasti. Na **Obr. 6.12** je zobrazen průběh chyby proudu jisticího vinutí. Z tohoto průběhu vyplývá, že chyba proudu je menší než  $\pm 1\%$  do devítinásobku jmenovitého primárního proudu. Jisticí vinutí tak splňuje podmínku chyby proudu pro třídu přesnosti 5P. Při nadproudovém činiteli, který udává výrobce, byla chyba měření přibližně 1,2 %. Námí změřená hodnota nadproudového činitele je přibližně 11,8. Z řady jmenovitých hodnot vybereme nejbližší nižší hodnotu 11.



Obr. 6.12: Průběh chyby proudu jisticího vinutí při nadproudech

Na **Obr. 6.13** je zobrazen průběh chyby úhlu jisticího vinutí. Z tohoto průběhu vyplývá, že chyba úhlu je menší než  $\pm 60$  minut do více než desetinásobku jmenovitého primárního proudu.



Obr. 6.13: Průběh chyby úhlu jisticího vinutí při nadproudech

Jisticí vinutí PTP vyhovělo chybou proudu požadavkům třídy přesnosti 5P. Pro toto vinutí jsme změřili nadproudové číslo přibližně 11,8. Z řady jmenovitých hodnot vybereme nejbližší nižší hodnotu 11.

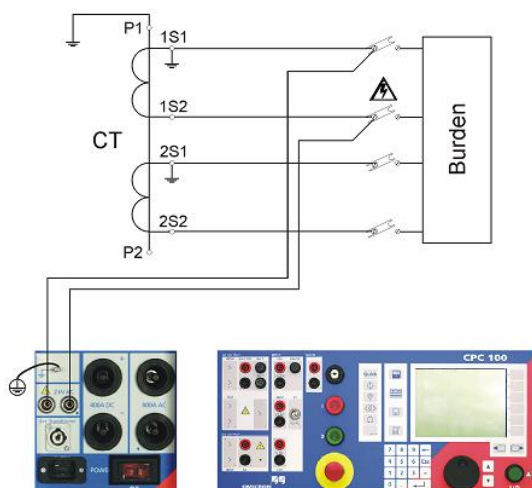
### 6.2.4 Měření magnetizační charakteristiky PTP

Magnetizační charakteristika vyjadřuje závislost mezi indukovaným napětím  $U_i$  a magnetizačním proudem  $I_0$ . Tato závislost má vliv na chybu proudu a úhlu viz kapitola 4.3.1. U skutečného PTP je tato závislost zpočátku lineární až do hodnoty  $U_{imax}$ , kdy dojde k nasycení magnetického obvodu a odklonění charakteristiky od svého původního průběhu. Určení bodu nasycení obou jader PTP je cílem tohoto měření.

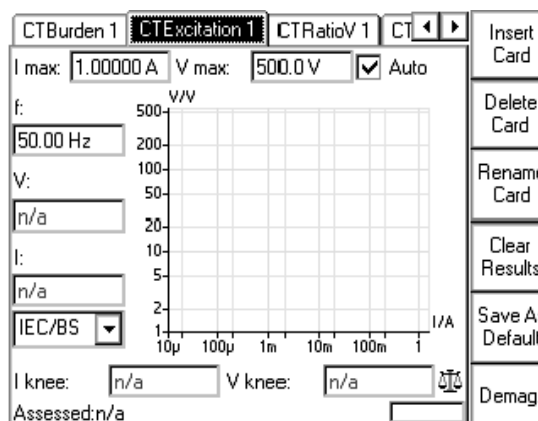
Bod nasycení jádra je definován třemi způsoby [17]:

- IEC/BS: Podle normy IEC 60044-1 je tento bod určen tak, že nárůst napětí.  $U_i$  o 10 % zvýší magnetizační proud  $I_0$  o 50 %.
- ANSI 45°: Podle normy IEEE C57.13 v tomto bodě magnetizační charakteristiky vynesené v logaritmických souřadnicích svírá tečna s proudovou osou úhel 45°.
- ANSI 30°: Je definován stejným způsobem jako předchozí bod s rozdílem, že tečna svírá s proudovou osou úhel 30°.

Pro změření magnetizačních charakteristik obou jader vinutí zapojíme obvod podle schématu na **Obr. 6.14**. Vložíme měřicí kartu *CT Excitation*, která je zobrazena na **Obr. 6.15**.



Obr. 6.14: Schéma zapojení pro měření magnetizačních charakteristik PTP



Obr. 6.15: Měřicí karta pro měření magnetizačních charakteristik PTP

Postupně proměříme magnetizační charakteristiku pro obě jádra třikrát pokaždé s jiným bodem nasycení. Charakteristiky obou jader vyneseme pro porovnání od jednoho grafu.

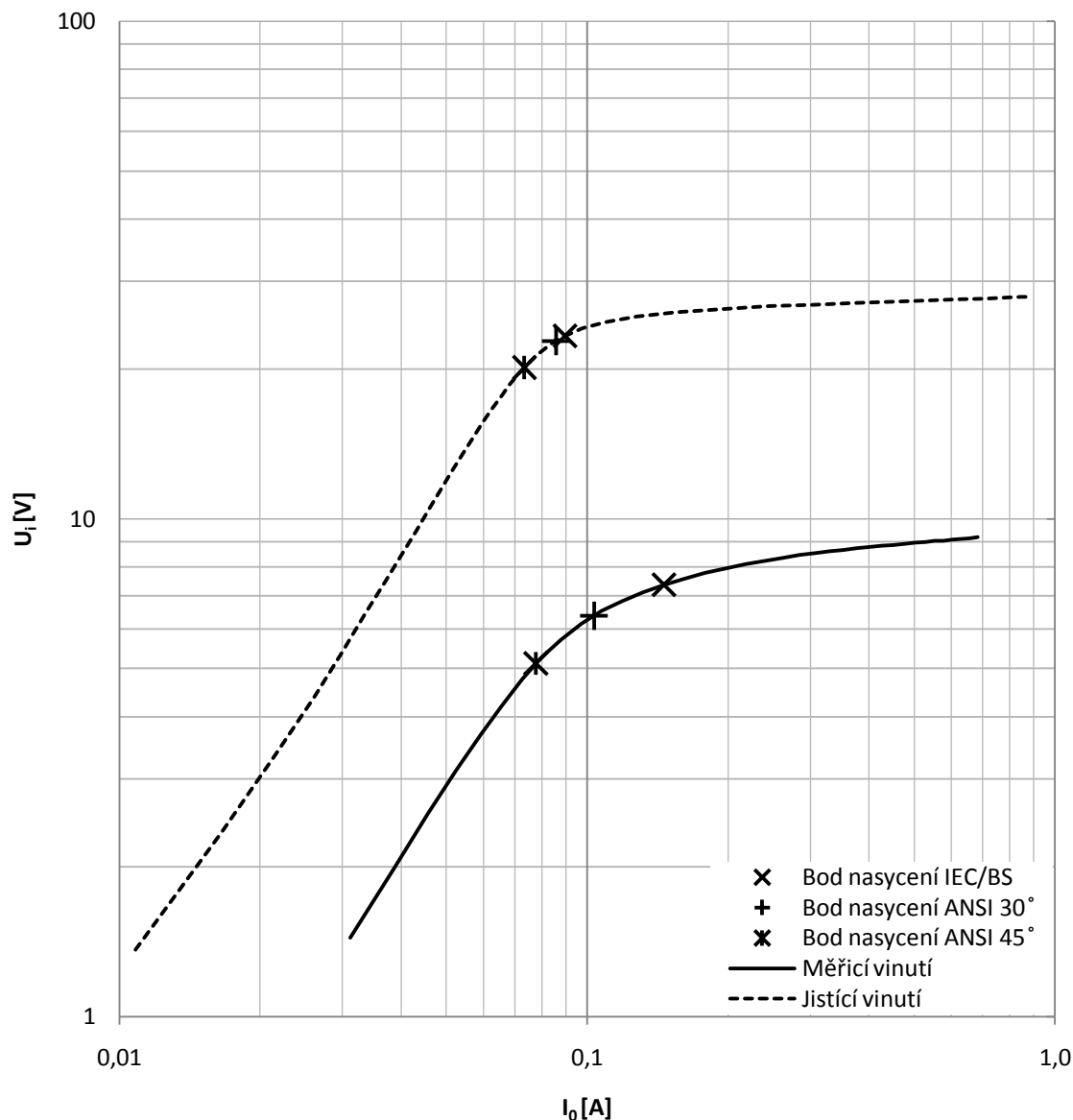
### 6.2.5 Magnetizační charakteristika dvoujádrového PTP

Z naměřených hodnot, které jsou uvedeny v **Tab. P.4**, jsme zobrazili v logaritmických souřadnicích průběhy magnetizačních charakteristik obou jader měřených vinutí. Charakteristiky jsou na **Obr. 6.16**. V obou průbězích jsou vyznačeny body nasycení magnetického obvodu. Souřadnice bodů nasycení jsou v následující tabulce.

Tab. 6.1: Souřadnice bodů nasycení jader měřených vinutí

Měřicí vinutí					Jistící vinutí						
IEC/BS		ANSI 30°		ANSI 45°	IEC/BS		ANSI 30°		ANSI 45°		
$U_s$ [V]	7,37	$U_s$ [V]	6,39	$U_s$ [V]	5,12	$U_s$ [V]	23,3	$U_s$ [V]	22,76	$U_s$ [V]	20,13
$I_s$ [A]	0,146	$I_s$ [A]	0,103	$I_s$ [A]	0,077	$I_s$ [A]	0,089	$I_s$ [A]	0,085	$I_s$ [A]	0,073

Z průběhů magnetizačních charakteristik můžeme vidět, že u jádra jisticího vinutí dochází ke stavu nasycení při vyšších hodnotách napětí  $U_i$  tj. při větších nadproudech, než u měřicího vinutí.



Obr. 6.16: Magnetizační charakteristika dvoujádrového PTP

### 6.3 Měření proudových senzorů

K dispozici jsme měli kombinovaný proudový senzor s napěťovým senzorem typu KEVCD firmy ABB, pro který jsme určili chyby proudu a úhlu. Měřený senzor má následující štítkové parametry:

KEVCD 12AE3

S/N: 1VLT5406001271

$U_{pn}$ :  $6/\sqrt{3} \dots 11/\sqrt{3}$  kV  $K_n$ : 10 000/1 cl.: 1/3P  $K_u$ : 1,9/8h

$I_{pr}$ =80 A  $U_{sr}$ =0,150/0,180 V  $f_r$ =50/60 Hz cl.: 1 (3)

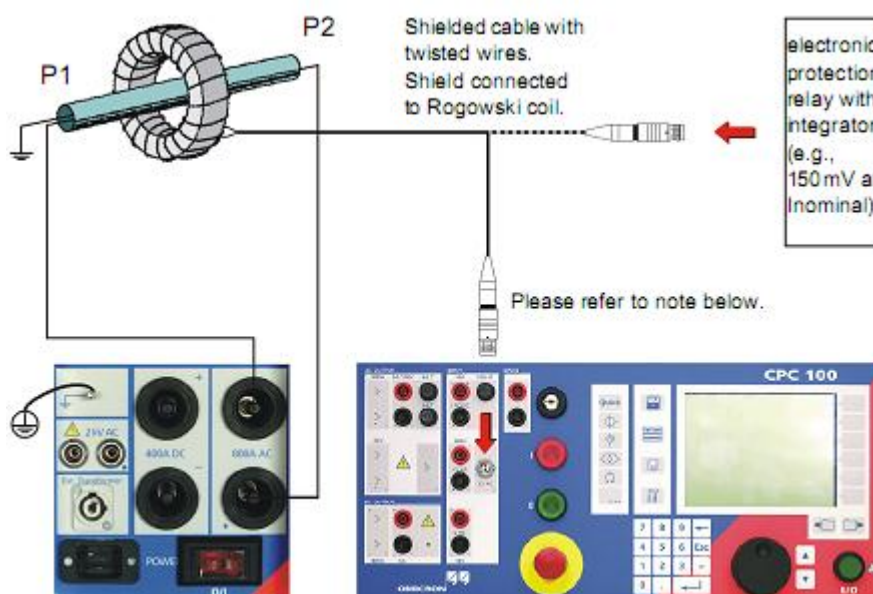
Cor. fac.: 0,9955 for cl.1

Ze štítku senzoru můžeme odečíst následující údaje:

Jmenovitý primární proud je 80 A. Jmenovitý převod je 80 A/0,15 V pro frekvenci 50 Hz. Udávaná třída přesnosti je 3 bez použití korekčního činitele. S korekčním činitelem je třída přesnosti 1. Dovolené chyby proudu a úhlu pro dané třídy přesnosti jsou stejné, jako u přístrojových transformátorů proudu viz **Tab. 4.1**.

### 6.3.1 Měření přesnosti senzoru KEVCD

Pro měření přesnosti proudového senzoru zapojíme obvod podle schématu na **Obr. 6.17**. Výstupní kabel senzoru připojíme na napěťový vstup V2.



Obr. 6.17: Schéma zapojení pro měření přesnosti proudového senzoru

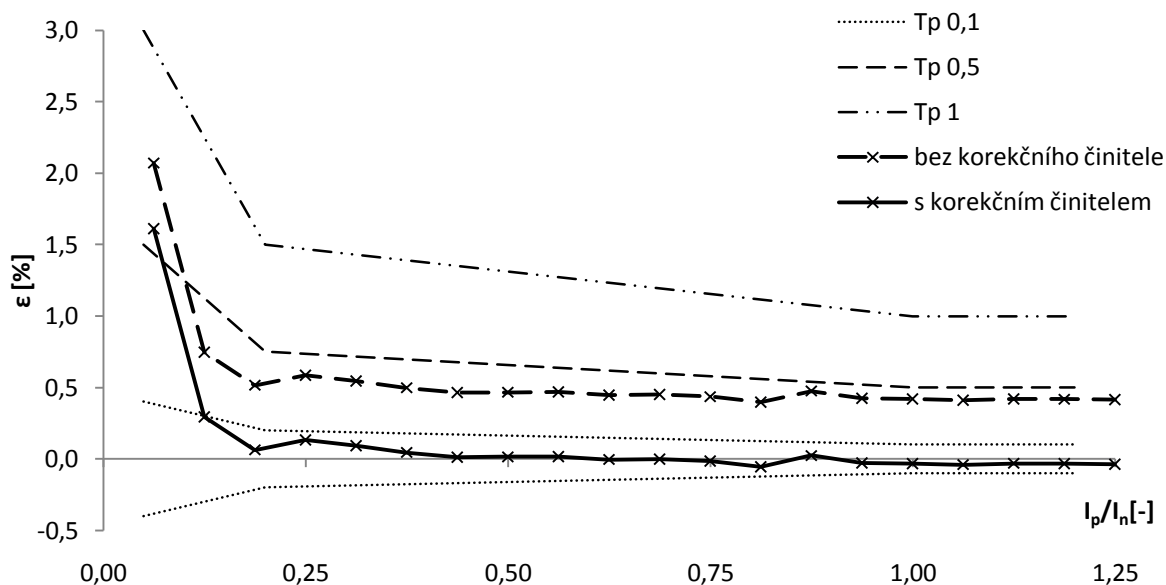
Pro měření senzoru vkládáme měřicí karty *Sequencer*, ve kterých nastavíme příslušné vstupy a výstupy. Postupně nastavujeme požadované hodnoty primárních proudů do hodnoty 800 A, které je schopen generovat CPC 100. Poté přerušíme měření a propojíme CPC 100 s proudovým zesilovačem CP CB2, který zapojíme na rozsah 2000 A podle **Obr. 6.4**. Pokračujeme v měření do hodnoty primárního proudu 1700 A, kdy sekundární napětí překračuje rozsah napěťového vstupu V2. Kabel senzoru pak připojíme přes redukci na napěťový vstup V1 a dokončíme měření. Naměřené hodnoty uložíme a zpracujeme.

### 6.3.2 Chyby proudu a úhlu kombinovaného senzoru typu KEVCD

Z naměřených a vypočtených hodnot, které jsou uvedeny v **Tab. P.3** jsme zobrazili průběhy chyb proudu a úhlu proudového senzoru. Pro určení třídy přesnosti testovaného proudového senzoru použijeme průběh chyby proudu a úhlu do hodnoty 120 % jmenovitého primárního proudu pro porovnání přesnosti s přístrojovým transformátorem proudu. V grafech jsou s výslednými průběhy chyb zobrazeny hraniční křivky, které vymezují určité třídy přesnosti.

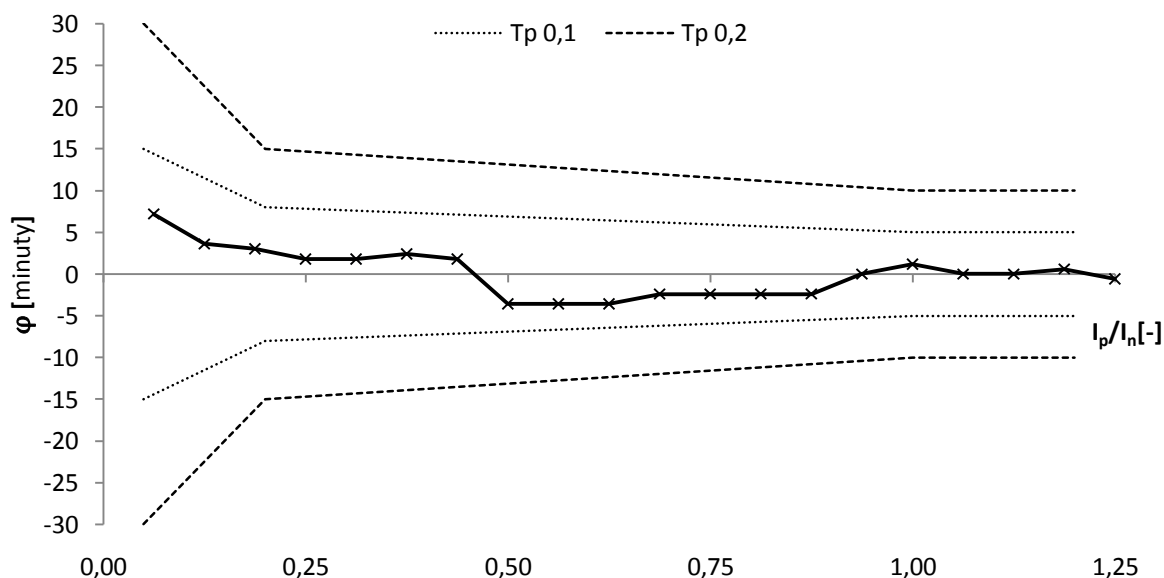
Na **Obr. 6.18** je znázorněn průběh chyby proudu proudového senzoru bez korekčního činitele i s jeho použitím. Z tohoto průběhu vyplývá, že proudový senzor splňuje podmínky třídy přesnosti 1 bez použití korekčního činitele. Použitím korekčního činitele můžeme korigovat průběh chyby proudu, třídu přesnosti však nezlepšíme, ikdyž průběh chyby přibližně od pětiny jmenovitého rozsahu vyhovuje třídě přesnosti 0,1. Chyba proudu na začátku rozsahu nevyhovuje lepší třídě přesnosti.





Obr. 6.18: Průběh chyby proudu proudového senzoru

Na **Obr. 6.19** je znázorněn průběh chyby úhlu proudového senzoru. Z tohoto průběhu vyplývá, že proudový senzor vyhovuje třídě přesnosti 0,1.



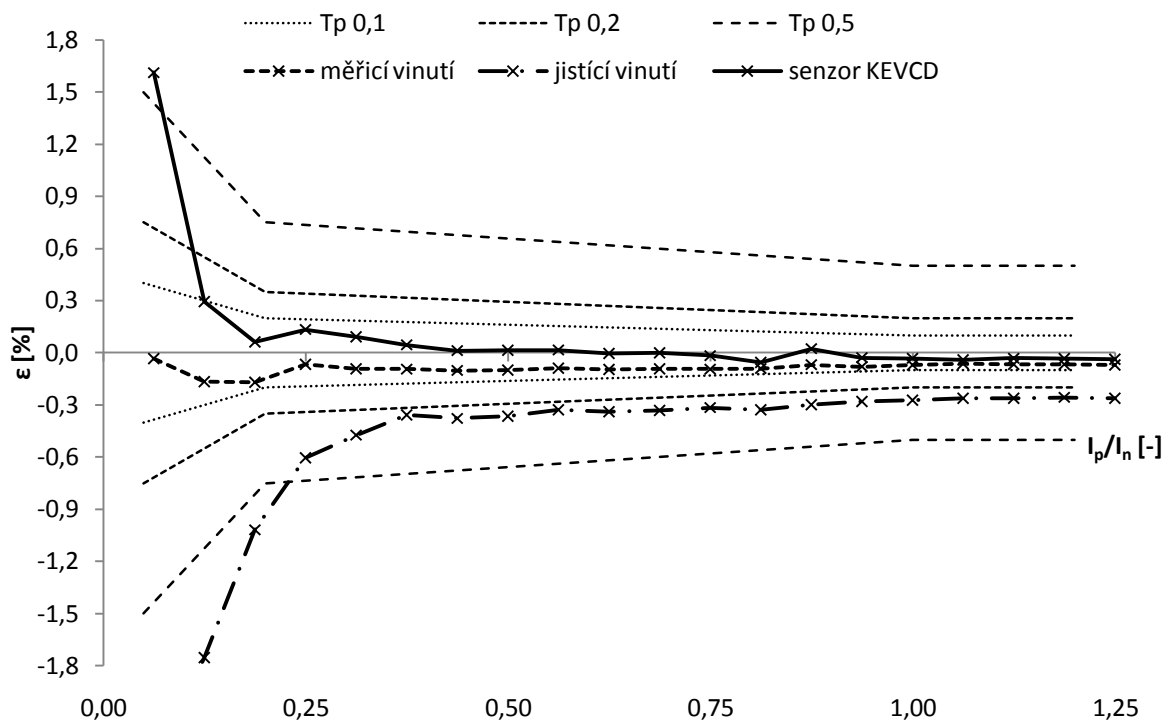
Obr. 6.19: Průběh chyby úhlu proudového senzoru

Proudový senzor vyhovuje udávané třídě přesnosti 1 s použitím korekčního činitele i bez něj. Velká chyba proudu na začátku rozsahu nám nedovoluje zlepšit třídu přesnosti senzoru.

## 6.4 Porovnání přesnosti PTP a senzoru KEVCD

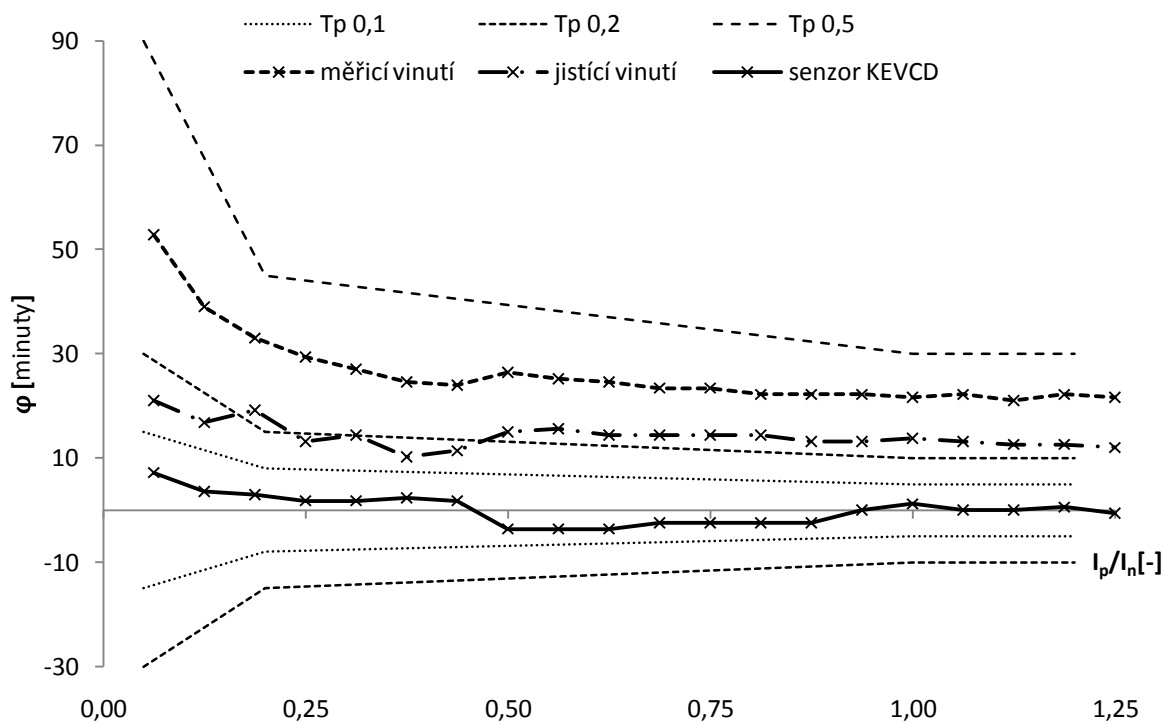
Pro porovnání přesností PTP a proudového senzoru vyneseme průběhy chyb proudu a úhlu do samostatných grafů. Na **Obr. 6.20** jsou zobrazeny průběhy chyb proudu obou vinutí a proudového senzoru s korekčním činitelem. Z průběhů můžeme vidět, že měřicí vinutí je na začátku rozsahu mnohem přesnější než proudový senzor. S rostoucím proudem se přesnost senzoru zvyšuje a v pětině rozsahu už vyhovuje třídě přesnosti 0,1 stejně jako měřicí vinutí. Průběh chyby proudu jističového vinutí je uveden jen pro porovnání. Jeho přesnost se sleduje

především v nadproudové oblasti. Ve jmenovitém rozsahu vyhovuje jistící vinutí třídě přesnosti 1.



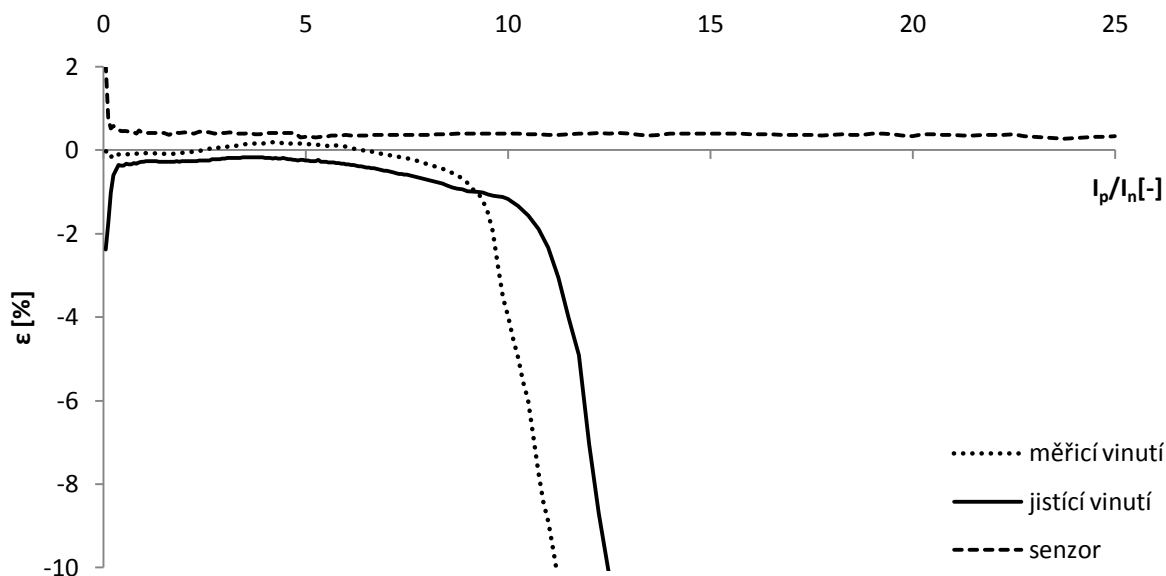
Obr. 6.20: Porovnání chyb proudu PTP a proudového senzoru ve jmenovitém rozsahu

Na **Obr. 6.21** jsou zobrazeny průběhy chyb úhlu obou vinutí a proudového senzoru. Z průběhů můžeme vidět, že nejpřesnější je proudový senzor, který vyhovuje třídě přesnosti 0,1. Obě vinutí PTP vyhovují chybou úhlu třídě přesnosti 0,5.



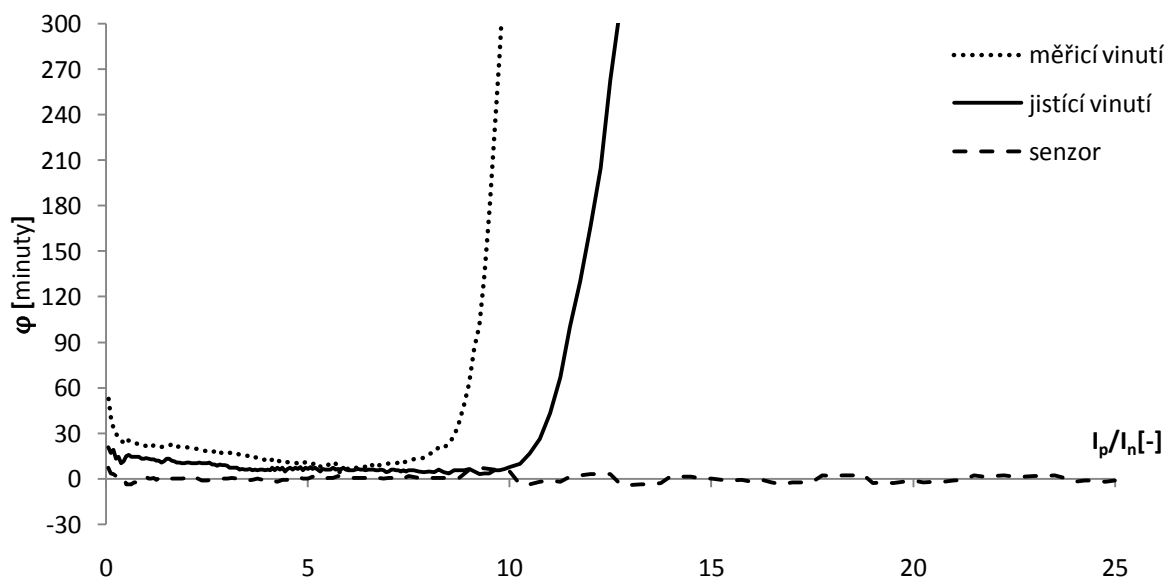
Obr. 6.21: Porovnání chyb úhlu PTP a proudového senzoru ve jmenovitém rozsahu

Zajímavější výsledky nabízí srovnání obou přístrojů v nadproudové oblasti. Na **Obr. 6.22** jsou zobrazeny průběhy chyb proudu obou přístrojů. Z těchto průběhů vidíme, že průběh chyby proudového senzoru je v celém měřeném rozsahu téměř konstantní vyjma počáteční hodnoty. Z průběhů chyb obou vinutí přístrojového transformátoru proudu vidíme zcela rozdílné výsledky, než u proudového senzoru. Obě vinutí zpočátku vyhovují svým třídám přesnosti, pak ovšem dochází vlivem přesycení magnetických obvodů k prudkému nárůstu chyby měření do záporných hodnot přes 10 % a více. U jistícího vinutí dochází k přesycení magnetického obvodu při větších nadproudech než u měřicího vinutí.



Obr. 6.22: Porovnání chyb proudu PTP a proudového senzoru v nadproudové oblasti

Podobně je tomu i v případě porovnání chyb úhlu obou přístrojů na **Obr. 6.23**. Chyba úhlu proudového senzoru se pohybuje v celém rozsahu okolo nulové hodnoty jen s nepatrnými odchylkami několika minut. U obou vinutí PTP jsou chyby úhlu v rámci daných tříd přesnosti, pak opět vlivem přesycení magnetických obvodů narůstá chyba úhlu do stovek minut.



Obr. 6.23: Porovnání chyb úhlu PTP a proudového senzoru v nadproudové oblasti

## 7 ZÁVĚR

Přístrojové transformátory proudu a proudové senzory se používají jako převodníky pro měření velkých střídavých proudů v soustavách vysokého napětí. Oba přístroje pracují na principu elektromagnetické indukce, avšak různé způsoby konstrukce dodávají oběma přístrojům zcela rozdílné vlastnosti. Výsledkem této práce je rozbor obou přístrojů a porovnání jejich vlastností, které mají vliv na přesnost měření.

V teoretické části jsou popsány principy měření obou přístrojů, jejich vlastnosti mající vliv na správnou funkci přístrojů a jsou zde uvedeny různé způsoby provedení obou přístrojů.

Základním a nejdůležitějším rozdílem jsou vlastnosti magnetických obvodů těchto přístrojů. Přístrojové transformátory proudu obsahují feromagnetické jádro, které umožňuje poskytnout dostatečně výkonný signál pro analogové přístroje, je však příčinou řadou negativních vlastností. Nejvýznamnější vlastností je nasycení feromagnetického jádra, jehož vlivem dochází ke značným chybám měření. U proudových senzorů je cívka navinuta na nemagnetické jádro, což má za následek odstranění nežádoucích vlastností feromagnetického jádra. Mohou však být použity pouze s digitálními přístroji. Významným rozdílem jsou v některých případech celkové rozměry a hmotnost jednotlivých přístrojů. Další rozdíly jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 7.1: Porovnání vlastností transformátorů proudu a proudových senzorů

Vlastnost	Transformátor proudu	Proudový senzor
Výstupní signál	5 A	150 mV/A
Zátěž sek. Obvodu	5 VA	4 - 10 MΩ
Třída přesnosti	Měřicí vinutí: 0,5	v celém rozsahu 1
	Jistící vinutí: 5P	
Linearita rozsahu	Lineární ve jmenovitém rozsahu	Lineární v celém rozsahu
Saturace jádra	Způsobuje zkreslení signálu	Neexistuje
Rozpojení sek. obvodu	Způsobuje indukování nebezpečného napětí	Nemá vliv na bezpečnost

V praktické části jsou popsány a znázorněny výsledky laboratorního měření parametrů přístrojů udávaných výrobcem.

Měřicí vinutí PTP vyhovělo chybou proudu požadavkům třídě přesnosti 0,1. Ovšem chybou úhlu vyhovuje třídě přesnosti 0,5. Třída přesnosti měřicího vinutí je tedy 0,5. Pro toto vinutí jsme změřili nadproudové číslo 11,5. Z řady jmenovitých hodnot vybereme nejbližší vyšší hodnotu 12.

Jistící vinutí vyhovělo třídě přesnosti 5P chybou proudu do devítinásobku a chybou úhlu do více než desetinásobku jmenovitého primárního proudu. Pro toto vinutí jsme změřili hodnotu nadproudového činitele 11,8. Z řady jmenovitých hodnot vybereme nejbližší nižší hodnotu 11.

Naše měření potvrzuje třídu přesnosti a nadproudové číslo měřicího vinutí danou výrobcem a také třídu přesnosti a nadproudový činitel jistícího vinutí.

Proudový senzor chybou proudu i úhlu vyhověl dané třídě přesnosti 1. Použitím korekčního činitele bychom mohli určit třídu přesnosti 0,1 nebýt velké chyby na začátku rozsahu. Tato chyba

---

nás nutí ponechat třídu přesnosti 1. Výrobce daný korekční činitel je určen velmi přesně a podle našeho měření není nutné žádné upřesnění.

Na **Obr. 6.22** a **Obr. 6.23** můžeme vidět hlavní rozdíl mezi oběma přístroji. Zatímco u proudového senzoru zůstává chyba měření téměř konstantní, u obou vinutí PTP dochází vlivem nasycení magnetických obvodů ke značným chybám.

Proudové senzory se pro své vlastnosti jeví jako ideální způsob měření proudů, přestože se v praxi uplatňují jen zřídka.

**POUŽITÁ LITERATURA**

- [1] *Elektrotechnická měření*. 1. vyd. Praha : BEN, 2004. 255 s. ISBN 80-7300-022-9.
- [2] HAASZ, V., SEDLÁČEK, M. *Elektrická měření : přístroje a metody*. 2. vyd. Praha : ČVUT, 2005. 337 s.
- [3] HOFMANN, J., URBANOVÁ, M. *Fyzika II*. Praha : VŠCHT, 2000. 216 s.
- [4] HALUZÍK, E. *Ochrany a automatiky v elektrických sítích*. Brno : VUT, 1986. 160 s.
- [5] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 1 : Úvod - transformátory*. 1. vyd. Praha : Academia, 1980. 385 s.
- [6] ARCEGA, F.J., ARTERO, J.A. Influence of External Currents in Sensors Based on PCB Rogowski Coils. *ICREPQ\05 Zaragoza 16,17,18 of March, 2005* [online]. 2005 [cit. 2009-12-12], s. 1-4. Dostupný z WWW: <<http://www.icrepq.com/full-paper-icrep/274-artero.pdf>>.
- [7] BISHOP M., KOJOVIC L., SHARMA D., WILLIAMS S., 2004, RC Current Sensors at Nucor-Yamato Steel Provide Superior Protection, *The Line*, Cooper Power Systems, October, s. 9-11. Dostupný z WWW: <<http://www.cooperpower.com/library/TheLine/pdf/Oct04/NucorYamato.pdf>>
- [8] KOJOVIC, L. Split-core PCB Rogowski coil designs and applications for protective relaying. *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES* [online]. 2003, no. 1 [cit. 2009-12-10], s. 269-273. ISSN 0-7803-8110-6.
- [9] KOJOVIC, L. A. PCB Rogowski Coils Benefit Relay Protection. *IEEE Computer Applications in Power* [online]. 2002 [cit. 2009-11-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.cooperpower.com/Library/pdf/CoilBenefit.pdf>>. ISSN 0895-0156.
- [10] KOJOVIC, L.A. Rogowski Coil Transient Performance and ATP Simulations for Applications in Protective Relaying. *International Conference on Power Systems Transient in Montreal, Canada, June 19-23, 2005* Paper No. IPST05-010
- [11] KOJOVIC, L.A. Comparative Performance Characteristics of Current Transformers and Rogowski Coils used for Protective Relaying Purposes. *Power Engineering Society General Meeting.*, 2007. s. 1-6. Dostupný z WWW: <[http://www.see.ed.ac.uk/~afm/tmp/sslides/.n/The-School/RIs/ies/Conf\\_proceedings/IEEE%20PES%20GM%202007/files/PESGM2007-001335.PDF](http://www.see.ed.ac.uk/~afm/tmp/sslides/.n/The-School/RIs/ies/Conf_proceedings/IEEE%20PES%20GM%202007/files/PESGM2007-001335.PDF)>. ISBN 1-4244-1296-X. ISSN 1932-5517.
- [12] MAHONEN, P., VIRTANEN, V., HAKOLA, T. The Rogowski coil and the voltage divider in power system protection and monitoring. [cit. 2009-12-12]. Dostupný z WWW: <[http://library.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/d9317de927099d73c2256c3e002bc491/\\$File/CIGREreport.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/d9317de927099d73c2256c3e002bc491/$File/CIGREreport.pdf)>.
- [13] Prokop, V. Požadavky diferenciálních ochran na přístrojové transformátory proudu, *Energyspectrum* ISSN 1214-7044, Volume 0 (2003 - 2005), Issue 1 (2003 - 2005), s.58-62.
- [14] SHEPARD, D. E., YAUCH, D. W. *An Overview of Rogowski Coil Current Sensing Technology*. <http://www.dynamp.com> [online]. 2009, September 2009 [cit. 2009-11-30]. Dostupný z WWW: <[http://www.dynamp.com/dynamp/ldadocum.nsf/E710AF6D3E0F6255862565D7004B19DB/\\$file/Report.pdf?OpenElement](http://www.dynamp.com/dynamp/ldadocum.nsf/E710AF6D3E0F6255862565D7004B19DB/$file/Report.pdf?OpenElement)>.

- 
- [15] ČSN EN 60044-1:2001 Přístrojové transformátory-část 1: Transformátory proudu.
- [16] ČSN EN 60044-8:2004 Přístrojové transformátory-část 8: Elektronické transformátory proudu.
- [17] OMICRON: *CPC 100 Reference manual*. OMICRON, 2007
- [18] *ABB Group* [online]. 2009 [cit. 2009-11-11]. [Http://www.abb.com/](http://www.abb.com/). Dostupné z WWW: <http://www.abb.com/product/cz/9AAC720011.aspx?country=CZ>.
- [19] Kůs, J.. [www.elektrika.cz](http://www.elektrika.cz) [online]. c1998-2009, 23.7.2003 [cit. 2009-11-11]. Dostupný z WWW: <http://elektrika.cz/data/clanky/tempow030723>.
- [20] *OMICRON electronics* [online]. 2010 [cit. 2010-05-05]. [Http://www.omicron.at](http://www.omicron.at). Dostupný z WWW: <http://www.omicron.at/en/products/pro/primary-testing-diagnosis/cpc-100-series/cpc-100/>.

## PŘÍLOHY

## Příloha 1 Naměřené hodnoty měřicího vinutí PTP

Tab. P.1: Naměřené hodnoty měřicího vinutí PTP

č.	$I_p$		$I_s$		$K_s$	$\varepsilon$	$\varphi$	č.	$I_p$		$I_s$		$K_s$	$\varepsilon$	$\varphi$
	[A]	[°]	[A]	[°]	[-]	[%]	[min]		[A]	[°]	[A]	[°]	[-]	[%]	[min]
1	5	0	0,31	0,88	80,03	-0,03	53	39	215	0	13,51	-0,03	79,56	0,04	18
2	10	0	0,62	0,65	80,13	-0,17	39	40	220	0	13,83	-0,05	79,55	0,06	17
3	15	0	0,94	0,55	80,14	-0,17	33	41	225	0	14,14	-0,03	79,55	0,06	18
4	20	0	1,25	0,49	80,05	-0,07	29	42	230	0	14,46	-0,05	79,54	0,07	17
5	25	0	1,56	0,45	80,07	-0,09	27	43	235	0	14,77	-0,06	79,53	0,08	16
6	30	0	1,87	0,41	80,08	-0,09	25	44	240	0	15,09	-0,05	79,52	0,09	17
7	35	0	2,19	0,40	80,08	-0,10	24	45	245	0	15,40	-0,04	79,53	0,08	17
8	40	0	2,50	0,44	80,08	-0,10	26	46	250	0	15,72	-0,06	79,52	0,09	16
9	45	0	2,81	0,42	80,07	-0,09	25	47	255	0	16,03	-0,06	79,52	0,09	16
10	50	0	3,12	0,41	80,08	-0,09	25	48	260	0	16,35	-0,05	79,51	0,10	17
11	55	0	3,43	0,39	80,07	-0,09	23	49	265	0	16,66	-0,07	79,50	0,11	16
12	60	0	3,75	0,39	80,07	-0,09	23	50	270	0	16,98	-0,07	79,50	0,12	16
13	65	0	4,06	0,37	80,07	-0,09	22	51	275	0	17,30	-0,07	79,48	0,14	16
14	70	0	4,37	0,37	80,06	-0,07	22	52	280	0	17,62	-0,08	79,47	0,15	15
15	75	0	4,68	0,37	80,06	-0,08	22	53	285	0	17,93	-0,08	79,48	0,14	15
16	80	0	5,00	0,36	80,06	-0,07	22	54	290	0	18,25	-0,10	79,47	0,15	14
17	85	0	5,31	0,37	80,05	-0,06	22	55	295	0	18,56	-0,09	79,47	0,16	14
18	90	0	5,62	0,35	80,05	-0,07	21	56	300	0	18,88	-0,10	79,47	0,16	14
19	95	0	5,93	0,37	80,05	-0,07	22	57	305	0	19,19	-0,10	79,45	0,18	14
20	100	0	6,24	0,36	80,06	-0,07	22	58	310	0	19,51	-0,12	79,46	0,17	13
21	105	0	6,56	0,36	80,07	-0,09	22	59	315	0	19,82	-0,12	79,46	0,16	13
22	110	0	6,87	0,35	80,07	-0,08	21	60	320	0	20,14	-0,10	79,46	0,17	14
23	115	0	7,18	0,36	80,07	-0,09	22	61	325	0	20,45	-0,13	79,46	0,17	12
24	120	0	7,49	0,36	80,07	-0,09	22	62	330	0	20,77	-0,12	79,46	0,18	13
25	125	0	7,81	0,36	80,07	-0,08	22	63	335	0	21,08	-0,15	79,45	0,19	11
26	130	0	8,12	0,38	80,07	-0,08	23	64	340	0	21,40	-0,13	79,45	0,19	12
27	135	0	8,43	0,35	80,07	-0,08	21	65	345	0	21,71	-0,14	79,45	0,18	11
28	140	0	8,74	0,34	80,06	-0,08	20	66	350	0	22,03	-0,13	79,45	0,19	12
29	145	0	9,06	0,36	80,05	-0,06	22	67	355	0	22,34	-0,14	79,47	0,16	11
30	150	0	9,37	0,36	80,06	-0,07	22	68	360	0	22,65	-0,15	79,46	0,17	11
31	175	0	10,93	0,33	80,03	-0,04	20	69	365	0	22,97	-0,15	79,46	0,16	11
32	180	0	11,30	-0,05	79,63	-0,04	20	70	370	0	23,28	-0,15	79,47	0,16	11
33	185	0	11,62	-0,01	79,62	-0,04	19	71	375	0	23,59	-0,15	79,47	0,16	11
34	190	0	11,93	-0,02	79,61	-0,02	19	72	380	0	23,91	-0,16	79,47	0,16	10
35	195	0	12,25	-0,02	79,59	0,01	19	73	385	0	24,22	-0,15	79,47	0,16	11
36	200	0	12,57	-0,03	79,57	0,03	18	74	390	0	24,54	-0,16	79,47	0,16	10
37	205	0	12,88	-0,03	79,57	0,03	18	75	395	0	24,85	-0,15	79,48	0,15	11
38	210	0	13,20	-0,04	79,57	0,04	17	76	400	0	25,16	-0,15	79,48	0,14	11



77	405	0	25,48	-0,15	79,48	0,14	11	117	610	0	38,23	-0,11	79,77	-0,23	13
78	410	0	25,79	-0,17	79,49	0,14	10	118	620	0	38,85	-0,11	79,80	-0,26	13
79	415	0	26,10	-0,15	79,49	0,13	11	119	630	0	39,46	-0,10	79,82	-0,29	14
80	420	0	26,42	-0,17	79,50	0,12	10	120	640	0	40,07	-0,06	79,85	-0,33	16
81	425	0	26,73	-0,20	79,49	0,14	8	121	650	0	40,68	-0,04	79,89	-0,37	17
82	430	0	27,05	-0,17	79,49	0,13	10	122	660	0	41,29	0,02	79,92	-0,41	21
83	435	0	27,36	-0,17	79,49	0,13	10	123	670	0	41,91	0,01	79,94	-0,44	20
84	440	0	27,67	-0,18	79,50	0,12	9	124	680	0	42,51	0,06	80,00	-0,50	23
85	445	0	27,98	-0,16	79,51	0,11	10	125	690	0	43,11	0,15	80,03	-0,54	29
86	450	0	28,29	-0,16	79,52	0,10	10	126	700	0	43,71	0,28	80,08	-0,61	37
87	455	0	28,61	-0,15	79,52	0,09	11	127	710	0	44,30	0,48	80,14	-0,69	49
88	460	0	28,93	-0,24	79,50	0,12	5	128	720	0	44,88	0,72	80,22	-0,79	63
89	465	0	29,24	-0,26	79,50	0,12	4	129	730	0	45,44	1,10	80,33	-0,93	86
90	470	0	29,56	-0,25	79,51	0,10	5	130	740	0	46,03	1,35	80,39	-1,00	101
91	475	0	29,87	-0,23	79,52	0,09	6	131	750	0	46,55	1,91	80,55	-1,20	134
92	480	0	30,18	-0,22	79,53	0,08	7	132	760	0	47,02	2,64	80,79	-1,49	178
93	485	0	30,49	-0,23	79,54	0,07	6	133	770	0	47,43	3,50	81,17	-1,95	230
94	490	0	30,80	-0,22	79,55	0,06	7	134	780	0	47,78	4,37	81,61	-2,48	282
95	495	0	31,11	-0,21	79,56	0,04	7	135	790	0	48,09	5,28	82,14	-3,11	337
96	500	0	31,42	-0,20	79,58	0,02	8	136	800	0	47,68	7,92	83,89	-3,99	495
97	505	0	31,73	-0,19	79,58	0,02	8	137	810	0	47,82	8,84	84,69	-4,12	550
98	510	0	32,04	-0,20	79,59	0,00	8	138	820	0	49,04	7,35	83,61	-4,83	461
99	515	0	32,35	-0,20	79,60	-0,01	8	139	830	0	49,43	7,84	83,96	-5,22	490
100	520	0	32,66	-0,16	79,61	-0,02	10	140	840	0	49,61	8,68	84,66	-6,01	541
101	525	0	32,97	-0,17	79,62	-0,03	10	141	850	0	49,77	9,48	85,39	-6,83	589
102	530	0	33,28	-0,20	79,62	-0,03	8	142	860	0	49,91	10,24	86,15	-7,65	634
103	535	0	33,59	-0,18	79,63	-0,05	9	143	870	0	50,36	10,49	86,38	-7,90	649
104	540	0	33,90	-0,19	79,64	-0,06	8	144	880	0	50,38	11,38	87,34	-8,91	703
105	545	0	34,21	-0,17	79,65	-0,07	10	145	890	0	50,55	12,00	88,03	-9,63	740
106	550	0	34,52	-0,17	79,67	-0,09	10	146	900	0	50,70	12,63	88,76	-10,38	778
107	555	0	34,83	-0,17	79,67	-0,10	10	147	910	0	50,74	13,36	89,67	-11,29	821
108	560	0	35,14	-0,16	79,68	-0,11	10	148	920	0	50,89	13,94	90,39	-12,00	856
109	565	0	35,45	-0,16	79,69	-0,11	10	149	930	0	51,01	14,55	91,16	-12,75	893
110	570	0	35,76	-0,16	79,70	-0,13	10	150	940	0	51,58	14,47	91,12	-12,90	888
111	575	0	36,07	-0,16	79,71	-0,15	10	151	950	0	51,63	15,13	92,00	-13,55	928
112	580	0	36,38	-0,15	79,71	-0,15	11	152	960	0	51,65	15,80	92,93	-14,43	968
113	585	0	36,69	-0,17	79,72	-0,16	10	153	970	0	51,67	16,43	93,86	-15,28	1006
114	590	0	37,00	-0,15	79,73	-0,17	11	154	980	0	51,71	17,05	94,76	-16,09	1043
115	595	0	37,31	-0,14	79,75	-0,19	11	155	990	0	51,89	17,46	95,40	-16,66	1067
116	600	0	37,62	-0,14	79,75	-0,19	11	156	1000	0	51,76	18,20	96,59	-17,69	1112

## Příloha 2 Naměřené hodnoty jisticího vinutí PTP

Tab. P.2: Naměřené hodnoty jisticího vinutí PTP

č.	$I_p$		$I_s$		$K_s$	$\varepsilon$	$\varphi$	č.	$I_p$		$I_s$		$K_s$	$\varepsilon$	$\varphi$
	[A]	[°]	[A]	[°]	[-]	[%]	[min]		[A]	[°]	[A]	[°]	[-]	[%]	[min]
1	5	0	0,31	0,35	84,68	-2,38	21	41	205	0	12,81	-0,03	80,01	-0,25	10,6
2	10	0	0,61	0,28	81,43	-1,75	16,8	42	210	0	13,12	-0,05	80,00	-0,24	9,4
3	15	0	0,93	0,32	80,82	-1,02	19,2	43	215	0	13,44	-0,05	79,99	-0,22	9,4
4	20	0	1,24	0,22	80,49	-0,60	13,2	44	220	0	13,75	-0,07	79,99	-0,22	8,2
5	25	0	1,56	0,24	80,38	-0,47	14,4	45	225	0	14,07	-0,05	79,98	-0,22	9,4
6	30	0	1,87	0,17	80,29	-0,36	10,2	46	230	0	14,38	-0,06	79,97	-0,21	8,8
7	35	0	2,18	0,19	80,30	-0,38	11,4	47	235	0	14,69	-0,06	79,97	-0,20	8,8
8	40	0	2,49	0,25	80,29	-0,36	15	48	240	0	15,01	-0,07	79,97	-0,20	8,2
9	45	0	2,80	0,26	80,26	-0,33	15,6	49	245	0	15,32	-0,09	79,95	-0,19	7
10	50	0	3,11	0,24	80,27	-0,34	14,4	50	250	0	15,63	-0,09	79,96	-0,18	7
11	55	0	3,43	0,24	80,27	-0,33	14,4	51	255	0	15,95	-0,09	79,95	-0,18	7
12	60	0	3,74	0,24	80,25	-0,32	14,4	52	260	0	16,26	-0,09	79,95	-0,18	7
13	65	0	4,05	0,24	80,26	-0,33	14,4	53	265	0	16,57	-0,11	79,96	-0,18	5,8
14	70	0	4,36	0,22	80,24	-0,30	13,2	54	270	0	16,89	-0,10	79,95	-0,18	6,4
15	75	0	4,67	0,22	80,23	-0,28	13,2	55	275	0	17,20	-0,11	79,95	-0,18	5,8
16	80	0	4,99	0,23	80,22	-0,27	13,8	56	280	0	17,51	-0,11	79,95	-0,17	5,8
17	85	0	5,30	0,22	80,21	-0,26	13,2	57	285	0	17,83	-0,10	79,94	-0,17	6,4
18	90	0	5,61	0,21	80,21	-0,26	12,6	58	290	0	18,14	-0,12	79,94	-0,17	5,2
19	95	0	5,92	0,21	80,21	-0,26	12,6	59	295	0	18,45	-0,11	79,95	-0,17	5,8
20	100	0	6,23	0,20	80,21	-0,26	12	60	300	0	18,76	-0,12	79,94	-0,17	5,2
21	105	0	6,54	0,20	80,22	-0,27	12	61	305	0	19,08	-0,11	79,94	-0,17	5,8
22	110	0	6,86	0,18	80,22	-0,27	10,8	62	310	0	19,39	-0,11	79,95	-0,18	5,8
23	115	0	7,17	0,19	80,22	-0,28	11,4	63	315	0	19,70	-0,12	79,95	-0,18	5,2
24	120	0	7,48	0,22	80,22	-0,27	13,2	64	320	0	20,01	-0,11	79,95	-0,18	5,8
25	125	0	7,79	0,22	80,22	-0,27	13,2	65	325	0	20,32	-0,12	79,96	-0,19	5,2
26	130	0	8,10	0,20	80,22	-0,28	12	66	330	0	20,64	-0,09	79,96	-0,19	7
27	135	0	8,41	0,19	80,22	-0,27	11,4	67	335	0	20,95	-0,12	79,97	-0,20	5,2
28	140	0	8,73	0,18	80,22	-0,27	10,8	68	340	0	21,26	-0,09	79,96	-0,19	7
29	145	0	9,04	0,18	80,21	-0,26	10,8	69	345	0	21,57	-0,11	79,97	-0,20	5,8
30	150	0	9,35	0,17	80,22	-0,27	10,2	70	350	0	21,88	-0,09	79,97	-0,20	7
31	155	0	9,66	0,17	80,21	-0,27	10,2	71	355	0	22,20	-0,13	79,96	-0,19	4,6
32	160	0	9,97	0,18	80,21	-0,26	10,8	72	360	0	22,51	-0,10	79,97	-0,20	6,4
33	165	0	10,29	0,18	80,21	-0,26	10,8	73	365	0	22,82	-0,09	79,98	-0,21	7
34	170	0	10,60	0,17	80,21	-0,26	10,2	74	370	0	23,13	-0,11	79,99	-0,22	5,8
35	175	0	10,91	0,17	80,22	-0,27	10,2	75	375	0	23,44	-0,09	79,99	-0,23	7
36	180	0	11,25	-0,04	80,02	-0,27	10	76	380	0	23,75	-0,10	79,99	-0,23	6,4
37	185	0	11,56	-0,03	80,01	-0,26	10,6	77	385	0	24,06	-0,08	80,00	-0,24	7,6
38	190	0	11,87	-0,04	80,01	-0,25	10	78	390	0	24,38	-0,12	79,99	-0,23	5,2
39	195	0	12,19	-0,04	80,01	-0,25	10	79	395	0	24,69	-0,09	80,00	-0,24	7
40	200	0	12,50	-0,04	80,01	-0,24	10	80	400	0	25,00	-0,10	80,01	-0,25	6,4

81	405	0	25,31	-0,08	80,01	-0,25	7,6	118	590	0	36,75	-0,12	80,27	-0,57	5,2
82	410	0	25,62	-0,10	80,01	-0,26	6,4	119	595	0	37,06	-0,13	80,28	-0,59	4,6
83	415	0	25,93	-0,09	80,02	-0,26	7	120	600	0	37,37	-0,12	80,28	-0,59	5,2
84	420	0	26,24	-0,11	80,02	-0,27	5,8	121	610	0	37,98	-0,12	80,30	-0,61	5,2
85	425	0	26,56	-0,13	80,00	-0,24	4,6	122	620	0	38,59	-0,13	80,32	-0,64	4,6
86	430	0	26,87	-0,10	80,03	-0,27	6,4	123	630	0	39,20	-0,14	80,35	-0,68	4
87	435	0	27,18	-0,11	80,03	-0,28	5,8	124	640	0	39,81	-0,13	80,38	-0,71	4,6
88	440	0	27,49	-0,11	80,03	-0,28	5,8	125	650	0	40,42	-0,14	80,40	-0,74	4
89	445	0	27,80	-0,11	80,04	-0,29	5,8	126	660	0	41,03	-0,11	80,43	-0,77	5,8
90	450	0	28,11	-0,09	80,04	-0,30	7	127	670	0	41,64	-0,14	80,45	-0,80	4
91	455	0	28,42	-0,11	80,05	-0,30	5,8	128	680	0	42,25	-0,15	80,48	-0,84	3,4
92	460	0	28,73	-0,10	80,05	-0,31	6,4	129	690	0	42,85	-0,12	80,52	-0,89	5,2
93	465	0	29,04	-0,11	80,06	-0,31	5,8	130	700	0	43,45	-0,12	80,55	-0,92	5,2
94	470	0	29,35	-0,09	80,07	-0,32	7	131	710	0	44,06	-0,12	80,58	-0,96	5,2
95	475	0	29,66	-0,11	80,07	-0,33	5,8	132	720	0	44,66	-0,10	80,61	-1,00	6,4
96	480	0	29,97	-0,12	80,07	-0,33	5,2	133	740	0	45,94	-0,16	80,55	-0,93	2,8
97	485	0	30,28	-0,12	80,08	-0,34	5,2	134	750	0	46,54	-0,15	80,60	-0,98	3,4
98	490	0	30,59	-0,12	80,09	-0,35	5,2	135	760	0	47,13	-0,15	80,63	-1,02	3,4
99	495	0	30,90	-0,11	80,09	-0,36	5,8	136	770	0	48,37	-0,12	79,61	-1,02	5,2
100	500	0	31,21	-0,10	80,11	-0,37	6,4	137	780	0	48,98	-0,12	79,64	-1,11	5,2
101	505	0	31,52	-0,11	80,11	-0,38	5,8	138	790	0	49,58	-0,14	79,68	-1,02	4
102	510	0	31,83	-0,11	80,12	-0,39	5,8	139	800	0	49,56	0,45	80,72	-1,11	39,4
103	515	0	32,14	-0,12	80,13	-0,41	5,2	140	820	0	50,69	0,54	80,88	-1,33	44,8
104	520	0	32,44	-0,11	80,14	-0,42	5,8	141	840	0	51,80	0,65	81,08	-1,57	51,4
105	525	0	32,75	-0,11	80,15	-0,42	5,8	142	860	0	52,87	0,81	81,34	-1,88	61
106	530	0	33,06	-0,11	80,15	-0,43	5,8	143	880	0	53,84	1,09	81,72	-2,34	77,8
107	535	0	33,37	-0,12	80,16	-0,44	5,2	144	900	0	54,67	1,49	82,31	-3,05	101,8
108	540	0	33,68	-0,12	80,17	-0,45	5,2	145	920	0	55,33	2,04	83,14	-4,01	134,8
109	545	0	33,99	-0,11	80,18	-0,46	5,8	146	940	0	56,00	2,54	83,93	-4,92	164,8
110	550	0	34,29	-0,12	80,19	-0,48	5,2	147	960	0	55,94	3,14	85,84	-7,03	200,8
111	555	0	34,60	-0,14	80,20	-0,49	4	148	980	0	56,04	3,79	87,40	-8,70	239,8
112	560	0	34,91	-0,13	80,21	-0,50	4,6	149	1000	0	56,28	4,75	88,81	-10,15	297,4
113	565	0	35,22	-0,11	80,22	-0,51	5,8	150	1021	0	56,49	5,57	90,35	-11,69	346,6
114	570	0	35,53	-0,11	80,23	-0,52	5,8	151	1040	0	56,76	6,32	91,59	-12,89	391,6
115	575	0	35,83	-0,12	80,24	-0,54	5,2	152	1060	0	56,97	7,18	93,03	-14,25	443,2
116	580	0	36,14	-0,12	80,25	-0,55	5,2	153	1079	0	57,19	8,08	94,37	-15,46	497,2
117	585	0	36,44	-0,13	80,26	-0,57	4,6								

### Příloha 3 Naměřené hodnoty senzoru KEVCD

Tab. P.3: Naměřené hodnoty senzoru KEVCD

č.	$I_p$		$U_s$		$\varepsilon$	$\varphi$	č.	$I_p$		$U_s$		$\varepsilon$	$\varphi$
	[A]	[°]	[V]	[°]	[%]	[min]		[A]	[°]	[V]	[°]	[%]	[min]
1	5	0	0,010	90,12	2,06	7,2	41	310	0	0,584	89,99	0,39	-0,6
2	10	0	0,019	90,06	0,74	3,6	42	320	0	0,602	90,00	0,41	0
3	15	0	0,028	90,05	0,51	3	43	330	0	0,621	89,98	0,42	-1,2
4	20	0	0,038	90,03	0,58	1,8	44	340	0	0,640	89,97	0,41	-1,8
5	25	0	0,047	90,03	0,54	1,8	45	350	0	0,659	89,99	0,42	-0,6
6	30	0	0,057	90,04	0,50	2,4	46	360	0	0,678	89,99	0,41	-0,6
7	35	0	0,066	90,03	0,46	1,8	47	370	0	0,697	90,01	0,41	0,6
8	40	0	0,075	89,94	0,46	-3,6	48	380	0	0,715	90,02	0,41	1,2
9	45	0	0,085	89,94	0,47	-3,6	49	390	0	0,734	90,00	0,31	0
10	50	0	0,094	89,94	0,45	-3,6	50	400	0	0,752	90,00	0,31	0
11	55	0	0,104	89,96	0,45	-2,4	51	410	0	0,771	90,02	0,32	1,2
12	60	0	0,113	89,96	0,43	-2,4	52	420	0	0,790	90,00	0,31	0
13	65	0	0,122	89,96	0,39	-2,4	53	430	0	0,809	89,99	0,31	-0,6
14	70	0	0,132	89,96	0,47	-2,4	54	440	0	0,828	90,01	0,32	0,6
15	75	0	0,141	90,00	0,42	0	55	450	0	0,847	90,01	0,35	0,6
16	80	0	0,151	90,02	0,42	1,2	56	460	0	0,866	90,03	0,36	1,8
17	85	0	0,160	90,00	0,41	0	57	470	0	0,884	90,01	0,36	0,6
18	90	0	0,169	90,00	0,42	0	58	480	0	0,903	90,01	0,36	0,6
19	95	0	0,179	90,01	0,42	0,6	59	490	0	0,922	90,01	0,36	0,6
20	100	0	0,188	89,99	0,41	-0,6	60	500	0	0,941	90,01	0,36	0,6
21	110	0	0,207	90,02	0,41	1,2	61	510	0	0,960	90,01	0,36	0,6
22	120	0	0,226	90,00	0,42	0	62	520	0	0,978	90,01	0,36	0,6
23	130	0	0,245	90,00	0,37	0	63	530	0	0,997	90,02	0,37	1,2
24	140	0	0,264	90,00	0,42	0	64	540	0	1,016	90,01	0,36	0,6
25	150	0	0,282	90,00	0,41	0	65	550	0	1,035	90,00	0,36	0
26	160	0	0,301	90,01	0,42	0,6	66	560	0	1,054	90,01	0,36	0,6
27	170	0	0,320	89,98	0,42	-1,2	67	570	0	1,073	90,01	0,36	0,6
28	180	0	0,339	90,01	0,40	0,6	68	580	0	1,091	90,02	0,36	1,2
29	190	0	0,358	89,98	0,45	-1,2	69	590	0	1,110	90,00	0,36	0
30	200	0	0,377	89,98	0,44	-1,2	70	600	0	1,129	90,03	0,37	1,8
31	210	0	0,395	89,99	0,42	-0,6	71	620	0	1,167	90,01	0,37	0,6
32	220	0	0,414	90,00	0,40	0	72	640	0	1,204	90,01	0,37	0,6
33	230	0	0,433	90,00	0,42	0	73	660	0	1,242	90,01	0,37	0,6
34	240	0	0,452	90,00	0,41	0	74	680	0	1,280	90,01	0,38	0,6
35	250	0	0,471	90,01	0,43	0,6	75	700	0	1,317	90,01	0,39	0,6
36	260	0	0,489	90,00	0,40	0	76	720	0	1,350	90,10	0,39	6
37	270	0	0,508	89,98	0,40	-1,2	77	740	0	1,387	90,12	0,40	7,2
38	280	0	0,527	89,98	0,39	-1,2	78	760	0	1,425	90,11	0,40	6,6
39	290	0	0,546	89,99	0,41	-0,6	79	780	0	1,462	90,09	0,40	5,4
40	300	0	0,565	90,00	0,39	0	80	800	0	1,500	90,08	0,40	4,8

81	820	0	1,535	89,94	0,39	-3,6	111	1420	0	2,663	90,04	0,36	2,4
82	840	0	1,573	89,94	0,38	-3,6	112	1440	0	2,700	90,03	0,37	1,8
83	860	0	1,610	89,97	0,37	-1,8	113	1460	0	2,738	90,04	0,37	2,4
84	880	0	1,647	89,98	0,37	-1,2	114	1480	0	2,775	90,04	0,37	2,4
85	900	0	1,685	89,97	0,36	-1,8	115	1500	0	2,813	90,05	0,37	3
86	920	0	1,722	90,02	0,38	1,2	116	1520	0	2,849	89,95	0,40	-3
87	940	0	1,760	90,04	0,39	2,4	117	1540	0	2,887	89,96	0,39	-2,4
88	960	0	1,798	90,05	0,40	3	118	1560	0	2,924	89,95	0,38	-3
89	980	0	1,835	90,05	0,41	3	119	1580	0	2,961	89,97	0,36	-1,8
90	1000	0	1,873	90,05	0,39	3	120	1600	0	2,998	89,98	0,34	-1,2
91	1020	0	1,912	89,94	0,41	-3,6	121	1620	0	3,036	89,96	0,39	-2,4
92	1040	0	1,949	89,93	0,39	-4,2	122	1640	0	3,074	89,97	0,38	-1,8
93	1060	0	1,986	89,94	0,37	-3,6	123	1660	0	3,111	89,97	0,37	-1,8
94	1080	0	2,023	89,94	0,35	-3,6	124	1680	0	3,148	89,98	0,36	-1,2
95	1100	0	2,061	89,95	0,36	-3	125	1700	0	3,185	89,99	0,35	-0,6
96	1120	0	2,101	90,03	0,40	1,8	126	1720	0	3,205	90,04	0,35	2,4
97	1140	0	2,139	90,02	0,40	1,2	127	1740	0	3,242	90,02	0,36	1,2
98	1160	0	2,177	90,02	0,40	1,2	128	1760	0	3,280	90,03	0,37	1,8
99	1180	0	2,214	90,00	0,40	0	129	1780	0	3,317	90,04	0,37	2,4
100	1200	0	2,252	90,00	0,40	0	130	1800	0	3,355	90,02	0,38	1,2
101	1220	0	2,289	89,99	0,39	-0,6	131	1820	0	3,390	90,02	0,33	1,2
102	1240	0	2,327	89,98	0,39	-1,2	132	1840	0	3,427	90,03	0,32	1,8
103	1260	0	2,364	89,99	0,39	-0,6	133	1860	0	3,464	90,03	0,30	1,8
104	1280	0	2,402	89,97	0,39	-1,8	134	1880	0	3,501	90,04	0,29	2,4
105	1300	0	2,439	89,99	0,39	-0,6	135	1900	0	3,538	90,01	0,28	0,6
106	1320	0	2,476	89,96	0,38	-2,4	136	1920	0	3,575	89,97	0,29	-1,8
107	1340	0	2,513	89,94	0,37	-3,6	137	1940	0	3,613	89,98	0,30	-1,2
108	1360	0	2,551	89,96	0,36	-2,4	138	1960	0	3,651	89,98	0,32	-1,2
109	1380	0	2,588	89,96	0,37	-2,4	139	1980	0	3,688	89,97	0,32	-1,8
110	1400	0	2,625	89,97	0,36	-1,8	140	2000	0	3,726	89,98	0,34	-1,2

## Příloha 4 Naměřené hodnoty magnetizačních charakteristik

Tab. P.4: Naměřené hodnoty magnetizačních charakteristik

Měřicí vinutí						Jistící vinutí					
IEC/BS		ANSI 30°		ANSI 45°		IEC/BS		ANSI 30°		ANSI 45°	
U <sub>knee</sub> [V]	7,37	U <sub>knee</sub> [V]	6,39	U <sub>knee</sub> [V]	5,12	U <sub>knee</sub> [V]	23,3	U <sub>knee</sub> [V]	22,76	U <sub>knee</sub> [V]	20,13
I <sub>knee</sub> [A]	0,146	I <sub>knee</sub> [A]	0,103	I <sub>knee</sub> [A]	0,077	I <sub>knee</sub> [A]	0,089	I <sub>knee</sub> [A]	0,085	I <sub>knee</sub> [A]	0,073
U[V]	I[A]	U[V]	I[A]	U[V]	I[A]	U[V]	I[A]	U[V]	I[A]	U[V]	I[A]
9,18	0,68	9,00	0,54	9,00	0,54	27,94	0,87	27,50	0,54	27,51	0,55
9,14	0,66	8,98	0,52	8,97	0,52	27,90	0,85	27,42	0,50	27,44	0,52
9,11	0,63	8,95	0,50	8,94	0,50	27,83	0,79	27,29	0,44	27,33	0,46
9,08	0,60	8,91	0,48	8,91	0,47	27,71	0,71	27,12	0,37	27,19	0,39
9,04	0,58	8,87	0,46	8,87	0,45	27,58	0,62	26,94	0,30	27,03	0,33
9,02	0,55	8,84	0,43	8,84	0,43	27,45	0,53	26,73	0,25	26,85	0,28
8,98	0,53	8,80	0,41	8,80	0,41	27,31	0,45	26,43	0,20	26,63	0,23
8,95	0,50	8,76	0,39	8,76	0,39	27,13	0,37	26,04	0,16	26,34	0,18
8,91	0,48	8,72	0,37	8,71	0,37	26,93	0,30	25,54	0,13	25,97	0,15
8,86	0,45	8,66	0,35	8,66	0,35	26,72	0,25	24,93	0,11	25,50	0,13
8,82	0,43	8,61	0,33	8,60	0,33	26,41	0,19	24,19	0,10	24,93	0,11
8,77	0,40	8,55	0,31	8,54	0,31	26,02	0,16	23,38	0,09	24,29	0,10
8,72	0,38	8,48	0,29	8,47	0,29	25,50	0,13	22,50	0,08	23,56	0,09
8,66	0,35	8,40	0,27	8,39	0,27	24,87	0,11	21,60	0,08	22,78	0,09
8,60	0,33	8,31	0,25	8,30	0,25	24,12	0,10	20,67	0,08	21,97	0,08
8,53	0,31	8,21	0,23	8,20	0,23	23,29	0,09	19,72	0,07	21,13	0,08
8,45	0,28	8,10	0,22	8,09	0,22	22,40	0,08	18,76	0,07	20,28	0,07
8,35	0,26	7,97	0,20	7,96	0,20	21,48	0,08	17,79	0,07	19,41	0,07
8,23	0,24	7,82	0,18	7,80	0,18	20,53	0,07	16,82	0,06	18,53	0,07
8,10	0,22	7,66	0,17	7,65	0,17	19,56	0,07	15,83	0,06	17,65	0,07
7,95	0,20	7,48	0,15	7,47	0,15	18,58	0,07	14,83	0,06	16,77	0,06
7,78	0,18	7,28	0,14	7,28	0,14	17,59	0,07	13,84	0,05	15,86	0,06
7,58	0,16	7,07	0,13	7,05	0,13	16,59	0,06	12,84	0,05	14,95	0,06
7,36	0,15	6,84	0,12	6,82	0,12	15,59	0,06	11,85	0,05	14,06	0,06
7,12	0,13	6,56	0,11	6,55	0,11	14,58	0,06	10,85	0,05	13,14	0,05
6,84	0,12	6,25	0,10	6,23	0,10	13,56	0,05	9,85	0,04	12,23	0,05
6,53	0,11	5,89	0,09	5,87	0,09	12,55	0,05	8,83	0,04	11,32	0,05
6,15	0,10	5,51	0,08	5,49	0,08	11,53	0,05	7,83	0,04	10,41	0,05
5,72	0,09	5,11	0,08	5,08	0,08	10,51	0,05	6,82	0,03	9,51	0,04
5,27	0,08	4,67	0,07	4,65	0,07	9,49	0,04	5,83	0,03	8,60	0,04
4,76	0,07	4,21	0,07	4,20	0,07	8,49	0,04	4,82	0,03	7,69	0,04
4,22	0,07	3,75	0,06	3,73	0,06	7,45	0,04	3,82	0,02	6,77	0,03
3,68	0,06	3,28	0,05	3,26	0,05	6,43	0,03	2,80	0,02	5,86	0,03
3,12	0,05	2,80	0,05	2,79	0,05	5,40	0,03	1,82	0,01	4,94	0,03
2,56	0,05	2,30	0,04	2,29	0,04	4,38	0,03			4,03	0,02
1,99	0,04	1,84	0,04	1,82	0,04	3,37	0,02			3,12	0,02
1,44	0,03	1,39	0,03	1,38	0,03	2,35	0,02			2,21	0,02
						1,35	0,01			1,33	0,01