



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

POROVNÁNÍ KONVENČNÍCH PTP A PTN S PROUDOVÝMI A NAPĚŤOVÝMI SENZORY

COMPARISON OF CONVENTIONAL CT AND VT WITH CURRENT AND VOLTAGE SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Dvořák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Petr Dvořák

ID: 151999

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Porovnání konvenčních PTP a PTN s proudovými a napěťovými senzory

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem DP je provedení analýzy, která bude hodnotit vzájemnou odchylku měření mezi konvenčními přístrojovými transformátory proudu (PTP) a proudovými senzory (na principu Rogowského cívky) a rovněž i mezi přístrojovými transformátory napětí (PTN) a napěťovými senzory (na principu odporového děliče). Vlastní analýza bude vycházet z dlouhodobého monitoringu těchto převodníků v podmínkách běžného provozu rozvodny 22 kV Medlánský.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

DVOŘÁK, Petr. *Porovnání konvenčních PTP a PTN s proudovými a napěťovými senzory*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119182>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jaroslava Orságová.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Porovnání konvenčních PTP a PTN s proudovými a napěťovými senzory jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 22.05.2019

.....

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá konvenčními přístrojovými transformátory a proudovými a napěťovými senzory. První polovina práce popisuje zejména základní pojmy a třídy přesnosti těchto převodníků používaných v elektrických rozvodnách. Důraz je kladen především na vzájemné rozdíly. Ve druhé polovině práce je uveden přesný typ převodníků, které jsou instalovány v rozvodně Medlánky. Z dlouhodobého monitoringu z této rozvodny je provedena analýza naměřených dat a porovnání výsledků z klasických přístrojových transformátorů oproti výsledkům z modernějších senzorů.

KLÍČOVÁ SLOVA: konvenční přístrojový transformátor proudu, konvenční přístrojový transformátor napětí, napěťový senzor, proudový senzor, analýza dat, třídy přesnosti, měření, převodníky

ABSTRACT

The diploma thesis deals with conventional transformers and current and voltage sensors. The first half of thesis describes mainly the basic concepts and accuracy classes of these converters used in electrical substations. The emphasis is given primarily on the differences. In the second half of thesis is presented an exact type of converters, which are installed in the substation Medlánky. There is an analysis of measured data from long – term monitoring from this substation and comparing the results from conventional transformers compared to the results from more modern sensors.

KEY WORDS:

conventional current transformers, conventional voltage transformers, current sensor, voltage sensor, data analysis, classes of accuracy measurement, converters

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD	15
2 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY	16
2.1 PRINCIP TRANSFORMÁTORŮ	16
2.2 KLASICKÉ INDUKTIVNÍ PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PROUDU.....	18
2.2.1 ROZDĚLENÍ PTP.....	18
2.2.2 ZÁKLADNÍ POJMY PTP.....	18
2.2.3 MĚŘENÍ S PTP.....	20
2.3 KLASICKÉ INDUKTIVNÍ PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY NAPĚTÍ	27
2.3.1 ROZDĚLENÍ PTN	27
2.3.2 ZÁKLADNÍ POJMY PTN	27
2.3.3 MĚŘENÍ S PTN	28
3 ELEKTRONICKÉ PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY - SENZORY	32
3.1 PROUDOVÉ SENZORY	32
3.1.1 DIFERENCE V PŘESNOSTI MĚŘENÍ OD PTP.....	34
3.2 NAPĚŤOVÉ SENZORY.....	35
3.2.1 DIFERENCE V PŘESNOSTI MĚŘENÍ OD PTN	37
3.3 KOMBINOVANÉ SENZORY	38
4 PŘEVODNÍKY V ROZVODNĚ 22 KV V MEDLÁNKÁCH	39
4.1 PŘÍSTROJOVÉ PROUDOVÉ TRANSFORMÁTORY	39
4.2 PŘÍSTROJOVÉ NAPĚŤOVÉ TRANSFORMÁTORY	40
4.3 PROUDOVÉ SENZORY	41
4.4 NAPĚŤOVÉ SENZORY.....	42
5 PRAKTICKÁ ČÁST.....	43
5.1 POSTUP ZPRACOVÁNÍ.....	45
5.1.1 VZORKOVACÍ FREKVENCE	45
5.1.2 OPRAVA CHYBNÝCH DAT.....	48
5.1.3 STEJNOSMĚRNÁ SLOŽKA	52
5.1.4 CELKOVÁ CHYBA	54
5.1.5 POTLAČENÍ VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH	56
5.1.6 VÝPOČET FÁZORŮ	61
5.1.7 VÝPOČET DIFERENCÍ MEZI SENZORY A PTP (PTN)	67
5.2 VYHODNOCENÍ DAT	70
5.2.1 VELIKOST FÁZORŮ	70
5.2.2 FÁZE FÁZORŮ	77
5.2.3 CELKOVÁ CHYBA	84

5.2.4 STEJNOSMĚRNÁ SLOŽKA	90
5.2.5 TEPLOTA	95
5.3 NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU	97
6 ZÁVĚR.....	102
POUŽITÁ LITERATURA	103

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Proudové charakteristiky PTP v závislosti na vnějších břemenech Z [3]</i>	20
<i>Obr. 2 Chyba proudu měřicího transformátoru při třídě přesnosti 0,5</i>	22
<i>Obr. 3 Chyba úhlu měřicího transformátoru při třídě přesnosti 0,5</i>	22
<i>Obr. 4 Chyba proudu jisticího transformátoru s nadproudovým číslem $n = 5$ při třídě přesnosti 10P</i>	24
<i>Obr. 5 Komplexní diagram chyb PTP [4]</i>	25
<i>Obr. 6 Nadproudové charakteristiky PTP (1 – měřicí, 2 – jisticí)</i>	26
<i>Obr. 7 Chyba amplitudy napětí měřicího transformátoru při třídě přesnosti 0,5</i>	29
<i>Obr. 8 Chyba úhlu napětí měřicího transformátoru při třídě přesnosti 0,5</i>	30
<i>Obr. 9 Chyby amplitud napětí jisticího transformátoru při třídách přesnosti 3P a 6P</i>	31
<i>Obr. 10 Chyby úhlu napětí jisticího transformátoru při třídách přesnosti 3P a 6P</i>	31
<i>Obr. 11 Rogowského cívka</i>	33
<i>Obr. 12 Jednotná třída přesnosti (0.5/5P630) proudového senzoru KECA 80 D85</i>	34
<i>Obr. 13 Jednotná třída přesnosti (0.5/5P630) proudového senzoru KECA 80 D85</i>	35
<i>Obr. 14 Frekvenční závislost napěťového děliče při různých velikostech vstupní kapacity měřicího zařízení [3]</i>	36
<i>Obr. 15 Jednotná třída přesnosti (0,5/3P) napěťového senzoru KEVA 24B21 [10]</i>	37
<i>Obr. 16 Kombinovaný senzor [5]</i>	38
<i>Obr. 17 Průchodkový transformátor proudu TSR 61.2[4]</i>	39
<i>Obr. 18 Přístrojový transformátor napětí typ TJP 6 [8]</i>	40
<i>Obr. 19 Proudový senzor KECA 80 D85 [9]</i>	41
<i>Obr. 20 Napěťový senzor KEVA 24B21 instalovaný v Medlánkách [10]</i>	42
<i>Obr. 21 Schéma celého měřicího řetězce s vyznačením tříd přesnosti převodníků a dalších prvků, kde mohou vzniknout chyby měření</i>	43
<i>Obr. 22 Prostředí programu SVA</i>	45
<i>Obr. 23 Ilustrační obrázek – vzorkovací frekvence</i>	46
<i>Obr. 24 Schéma zpracování dat</i>	47
<i>Obr. 25 Načtení výstupních dat a tvorba prázdných matic</i>	48
<i>Obr. 26 Nahrání hodnot proudů a napětí do matic</i>	49
<i>Obr. 27 Nahrání času do matic a přiřazení proudů a napětí dle času (s – senzor)</i>	50
<i>Obr. 28 Ukázka vynechání záznamu dat</i>	51
<i>Obr. 29 Výpočet a odstranění stejnosměrné složky</i>	52
<i>Obr. 30 Převedení stejnosměrné složky do procentuálního vyjádření</i>	53

<i>Obr. 31 Výpočet celkové chyby</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 32 Celková chyba v procentuálním vyjádření.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 33 Fourierova transformace proudu z PTP.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 34 Spektrum původního neharmonického signálu proudu.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 35 Aplikace filtru iirpeak</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 36 Vyfiltrování vyšších harmonických složek</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 37 Spektrum signálu proudu po aplikaci filtru</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 38 Změna průběhu proudu vlivem filtru</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 39 Přenesení časového harmonického průběhu do Gaussovy komplexní roviny [15]</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 40 Výpočet reálné části fázorů napětí a proudů</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 41 Výpočet imaginární části fázorů napětí a proudů.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 42 Převedení fázorů do polárního tvaru.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 43 Výpočet rozdílů fázorů</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 44 Výpočet rozdílů fázorů</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 45 Nalezení maximálních rozdílů fázorů</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 46 Diference v modulech fázorů proudů – fáze A.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 47 Diference v modulech fázorů proudů – histogram – fáze A.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 48 Diference v modulech fázorů proudů – fáze B.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 49 Diference v modulech fázorů proudů – histogram – fáze B.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 50 Diference v modulech fázorů proudů – fáze C.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 51 - Diference v modulech fázorů proudů – histogram – fáze C.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 52 Diference v modulech fázorů napětí – fáze A</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 53 Diference v modulech fázorů napětí – histogram – fáze A</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 54 Diference v modulech fázorů napětí – fáze B</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 55 Diference v modulech fázorů napětí – histogram – fáze B.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 56 Diference v modulech fázorů napětí – fáze C</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 57 Diference v modulech fázorů napětí – histogram – fáze C.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 58 Diference v úhlech fázorů proudů – fáze A.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 59 Diference v úhlech fázorů proudů – histogram – fáze A</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 60 Diference v úhlech fázorů proudů – fáze B.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 61 Diference v úhlech fázorů proudů – histogram – fáze B</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 62 Diference v úhlech fázorů proudů – fáze C</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 63 Diference v úhlech fázorů proudů – histogram – fáze C</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 64 Diference v úhlech fázorů napětí – fáze A</i>	<i>81</i>

<i>Obr. 65</i>	<i>Diference v úhlech fázorů napětí – histogram – fáze A</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 66</i>	<i>Diference v úhlech fázorů napětí – fáze B</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 67</i>	<i>Diference v úhlech fázorů napětí – histogram – fáze B</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 68</i>	<i>Diference v úhlech fázorů napětí – fáze C</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 69</i>	<i>Diference v úhlech fázorů napětí – histogram – fáze C</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 70</i>	<i>Celková chyba proudu ve fázi A</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 71</i>	<i>Celková chyba proudu ve fázi A – histogram</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 72</i>	<i>Celková chyba proudu ve fázi B</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 73</i>	<i>Celková chyba proudu ve fázi B – histogram</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 74</i>	<i>Celková chyba proudu ve fázi C</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 75</i>	<i>Celková chyba proudu ve fázi C – histogram</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 76</i>	<i>Celková chyba napětí ve fázi A</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 77</i>	<i>Celková chyba napětí ve fázi A – histogram</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 78</i>	<i>Celková chyba napětí ve fázi B</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 79</i>	<i>Celková chyba napětí ve fázi B – histogram</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 80</i>	<i>Celková chyba napětí ve fázi C</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 81</i>	<i>Celková chyba napětí ve fázi C – histogram</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 82</i>	<i>Poměr stejnosměrné složky u proudů ve fázi A</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 83</i>	<i>Poměr stejnosměrné složky u proudů ve fázi B</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 84</i>	<i>Poměr stejnosměrné složky u proudů ve fázi C</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 85</i>	<i>Poměr stejnosměrné složky napětí ve fázi A (PTN)</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 86</i>	<i>Poměr stejnosměrné složky napětí ve fázi A (senzor)</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 87</i>	<i>Poměr stejnosměrné složky napětí ve fázi B (PTN)</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 88</i>	<i>Poměr stejnosměrné složky napětí ve fázi B (senzor)</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 89</i>	<i>Poměr stejnosměrné složky napětí ve fázi C (PTN)</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 90</i>	<i>Poměr stejnosměrné složky napětí ve fázi C (senzor)</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 91</i>	<i>Závislost modulů fázorů proudů na teplotě</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 92</i>	<i>Závislost modulů fázorů napětí na teplotě</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 93</i>	<i>Nahrání čísla vzorku do matice a následná konverze z textového na číselný formát</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 94</i>	<i>Vymazání period, ve kterých došlo k výpadku záznamu</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 95</i>	<i>Perioda, při které došlo k přerušení záznamu</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 96</i>	<i>Průběh proudu po odstranění periody, při které došlo k přerušení záznamu</i>	<i>101</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Třídy přesnosti</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 2 Chyby při jednotlivých třídách přesnosti měřicích transformátorů proudu [6]</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 3 Chyby při jednotlivých třídách přesnosti měřicích transformátorů proudu [6]</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 4 Chyby při jednotlivých třídách přesnosti měřicích transformátorů proudu pro zvláštní použití [6]</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 5 Chyby při jednotlivých třídách přesnosti jisticích transformátorů proudu [6]</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 6 Chyby při jednotlivých třídách přesnosti měřicích transformátorů napětí [7].....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 7 Chyby při jednotlivých třídách přesnosti jisticích transformátorů napětí [7].....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 8 Technické parametry přístrojových proudových transformátorů instalovaných v Medláncích</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 9 Technické parametry přístrojových napěťových transformátorů instalovaných v Medláncích (v závorce uvedeny hodnoty PTN ve 2. vývodu)</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 10 Technické parametry proudových senzorů instalovaných v Medláncích.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 11 Technické parametry napěťových senzorů instalovaných v Medláncích</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 12 Chyby způsobené digitalizací dat z proudových převodníků [13]</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 13 Chyby způsobené digitalizací dat z napěťových převodníků [13].....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 14 Efektivní hodnoty proudů před a po aplikaci filtru.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 15 Efektivní hodnoty proudů před a po aplikaci filtru.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 16 Hodnoty napětí před a po aplikaci filtru.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 17 Hodnoty napětí před a po aplikaci filtru.....</i>	<i>59</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol (zkratka)	Název
EMC	Electro Magnetic Compatibility (elektromagnetická kompatibilita),
PTP	Přístrojový Transformátor Proudů,
PTN	Přístrojový Transformátor Napětí,
PT	Přístrojový Transformátor,
I_1	proud v primárním vinutí,
Φ_{1h}	hlavní magnetický tok,
$\Phi_{1\sigma}$	rozptylový magnetický tok,
I_2	proud v sekundárním vinutí,
Φ_{2h}	magnetický tok sekundárního vinutí,
$\Phi(t)$	výsledný magnetický tok uzavírají se ve feromagnetickém jádře,
u_{i1}	vnitřní napětí indukované v primárním vinutí,
u_{i2}	vnitřní napětí indukované v sekundárním vinutí,
$N_{1(2)}$	počet závitů primárního (sekundárního) vinutí,
t	čas,
Φ_m	maximální hodnota celkového magnetického toku,
ω	úhlová frekvence,
f	frekvence,
k_I	jmenovitý převod přístrojového transformátoru proudu,
I_{1n}	jmenovitý primární proud,
I_{2n}	jmenovitý sekundární proud,
Z_c	celkové břemeno,
R_I	rezistence sekundárního vinutí,
X_I	reaktance sekundárního vinutí,
R	rezistence zátěže,
X	reaktance zátěže,
S	zátěž přístrojového transformátoru,
n	nadproudové číslo,
n_n	jmenovité nadproudové číslo
Z_n	jmenovité břemeno,
Z	vnější břemeno,
ε_I	relativní chyba amplitudy proudu,

δ_I	relativní chyba úhlu proudu,
I_m	magnetizační proud,
T	perioda,
i_1	okamžitá hodnota proudu primárním vinutím,
i_2	okamžitá hodnota proudu sekundárním vinutím,
I'_1	primární proud přepočtený na počet závitů sekundární strany,
k_U	jmenovitý převod přístrojového transformátoru napětí,
U_{1n}	jmenovité primární napětí,
U_{2n}	jmenovité sekundární napětí,
Y	břemeno,
Y_n	jmenovité břemeno,
G	konduktance,
B	susceptance,
ε_U	relativní chyba amplitudy napětí,
δ_U	relativní chyba úhlu napětí,
VN	Vysoké Napětí,
SF6	fluorid sírový,
u_{out}	okamžitá hodnota výstupního napětí,
M	vzájemná indukčnost,
μ_0	permeabilita vakua,
A	průřez cívky,
l_m	délka střední linie cívky,
ΔT	rozdíl teplot,
α	teplotní součinitel odporu,
I_{cth}	jmenovitý trvalý teplotní proud,
I_{th}	jmenovitý krátkodobý teplotní proud,
u_p	okamžitá hodnota vstupního napětí,
I_{thn}	jmenovitý krátkodobý proud,
MU	Merging Unit (měřící jednotka),
IED	Intelligent Electronic Device (inteligentí elektrické zařízení),
SV	Sampled Values,
UEEN	Ústav ElektroEnergetiky,
csv	Comma Separated Values (čárkou oddělené hodnoty),

<i>SVA</i>	Sampled Values Analyzer,
<i>NN</i>	Nízké Napětí,
<i>DC</i>	District Current (stejnoseměrný proud),
<i>FFT</i>	Fast Fourier Transform (rychlá Fourierova transformace),
I_{DC}	velikost stejnosměrné složky proudu,
$I_{h,m}$	amplituda harmonického řádu h ,
h	řád harmonické,
H	celkový počet harmonických,
φ_{th}	počáteční fáze h -té harmonické složky proudu.

1 ÚVOD

Elektrické veličiny měřené v elektrizačních soustavách mají příliš velký rozsah, a proto není z ekonomického a technického hlediska vhodné přizpůsobovat těmto hodnotám obvody v měřicích, ovládacích a dalších přístrojích. Namísto toho se využívá funkcí přístrojových transformátorů. Přes tento typ transformátorů se připojují tyto jednotky, aby nemusely být zapojené přímo na silnoproudá zařízení. Zpravidla vysoké hodnoty napětí a proudů jsou transformovány na normalizované hodnoty. Liší se konstrukcí podle toho, zda jejich výstupy míří na měřicí přístroje nebo na jisticí. Podle toho také rozlišujeme přístrojové transformátory měřicí a jisticí, na které jsou vyžadovány rozdílné nároky. Zatímco u měřicích je potřeba zvýšená přesnost zejména v okolí jmenovitých hodnot, u jisticích je to při nadproudových hodnotách.

V praxi se často staví bloky několika transformátorů vedle sebe, kde každý plní jinou roli. Nevýhodu jsou velké rozměry těchto bloků. Také se v poslední době rozmáhají digitální ochrany a digitální měřicí přístroje s mikroprocesorovou technikou, které vyžadují na svém vstupu nízké hodnoty signálů. To jsou dva důvody, kvůli kterým rozvoj v používané technologii měření směřuje od konvenčních přístrojových transformátorů s feromagnetickými jádry spíše k elektronickým přístrojovým transformátorům – sensorům. Sensory jsou menších rozměrů, mají nízkou napěťový výstup a splňují lépe současné nároky na měřicí aparaturu. I přes jejich poměrně snadnou technologii, jsou stále podrobovány různým výzkumům a srovnávání s již už několik desítek let prověřenými klasickými přístrojovými transformátory. V nejmodernějších rozvodnách jsou již upřednostňovány a jsou vyráběny mnoha výrobci, kteří musí zaručit, že jsou splněna potřebná kritéria, kterým musí vyhovět. Kritéria se týkají elektrické odolnosti, EMC a především přesnosti měření.

Součástí této diplomové práce je výtah nejdůležitějších informací ohledně sensorů a konvenčních přístrojových transformátorů a také příklad srovnání naměřených dat z těchto převodníků a vyhodnocení zda, případné odchylky v měření jsou v toleranci tříd přesnosti.

2 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY

Úkolem přístrojových transformátorů je galvanické oddělení silnoproudých zařízení od zařízení ochran a dalších systémů nízkého napětí. Oddělení od silných magnetických a elektrických polí. Umožnění soustředění nízkonapěťových systémů v dozornách mimo rozvodnu na jednom místě pro snadnější ovládání a monitoring. Umožnění v oddělených obvodech vytvořit součty a rozdíly proudů a napětí a především jejich hlavním úkolem je chránit systémy měřicích a jisticích přístrojů před škodlivými účinky poruchových jevů v elektrizační soustavě. [1]

Přístrojové transformátory můžeme rozdělit podle mnoha kritérií. Kromě již zmiňovaného rozdělení na měřicí a jisticí je významné členění podle transformované veličiny na přístrojové transformátory proudu (PTP), přístrojové transformátory napětí (PTN) a kombinované přístrojové transformátory.

Dále podle převodu dělíme přístrojové transformátory na: Nepřepínatelné, přepínatelné primární a přepínatelné sekundární. [2]

2.1 Princip transformátorů

Princip funkce přístrojových transformátorů se neliší od principu funkce ostatních transformátorů. Základem jsou dvě vinutí s feromagnetickým jádrem. Vinutí jsou na jádru navinuta na společné ose, tak aby vytvářela dobrou magnetickou vazbu. Proud v primárním vinutí I_1 způsobí zrod magnetického toku v jádru, pomocí něhož je tento tok přesunut k sekundárnímu vinutí, ve kterém indukuje střídavé napětí. Magnetický tok vyvolaný zdrojem střídavého proudu v primárním vinutím se dělí na dvě části. Hlavní magnetický tok Φ_{1h} prochází jádrem a druhá menší část nazývaná rozptylový magnetický tok $\Phi_{1\sigma}$ se uzavírá pouze kolem vinutí a vyvolává ztráty přenosu energie. V moment, kdy je k sekundárnímu obvodu transformátoru připojena zátěž, začne vinutím procházet proud I_2 , který vyvolá vznik vlastního magnetického toku Φ_{2h} . Výsledný magnetický tok uzavírající se ve feromagnetickém jádře je dán součtem tohoto toku a hlavním magnetickým tokem. [3]

$$\Phi(t) = \Phi_{1h}(t) + \Phi_{2h}(t) \quad (2.1)$$

Φ_{1h} a Φ_{2h} jsou pouze fiktivní toky neprocházející jádrem, jádrem prochází ve skutečnosti pouze výsledný tok $\Phi(t)$, jehož působením se ve vinutích indukují vnitřní napětí u_{i1} a u_{i2} ,

$$u_{i1} = N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.2)$$

$$u_{i2} = N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.3)$$

kde $N_{1(2)}$ – počet závitů primárního (sekundárního) vinutí (-),
 Φ – výsledný magnetický tok (Wb),
 t – čas (s).

předpokládáme – li harmonický průběh toku Φ platí:

$$u_i = \frac{d}{dt}(N\Phi_m \sin(\omega t)) = N\Phi_m \omega \cos(\omega t), \quad (2.4)$$

kde Φ_m – maximální hodnota celkového magnetického toku (Wb),
 ω – úhlová frekvence ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$).

Pro efektivní hodnotu indukovaného napětí platí:

$$U_i = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N\Phi = 4,44fN\Phi, \quad (2.5)$$

kde f – frekvence (Hz).

2.2 Klasické indukční přístrojové transformátory proudu

Přístrojové transformátory proudu jsou transformátory, které ve vymezeném měřicím rozsahu mají sekundární proud úměrný primárnímu proudu s možnými odchylkami amplitudy a úhlu danými třídou přesnosti. Jejich primární vinutí se zapojuje do série se silnoproudými obvody a z jejich sekundárních vinutí jsou napájeny systémy měřicích přístrojů.

2.2.1 Rozdělení PTP

PTP můžeme dále dělit podle různých kritérií. Například podle počtu primárních a sekundárních vinutí:

PTP sčítací

PTP s více sekundárními výstupy – vícejádrový nebo s pomocnými transformátory

PTP kaskádový

Podle počtu závitů vinutí na primární straně PTP

Jednozávitový

Závitový

Podle velikosti rozptylové reaktance

Nízkoreaktanční

Vysokoreaktanční

Zvláštní skupinu PTP tvoří tzv. speciální jisticí transformátory proudu. Tyto PTP jsou charakteristické tím, že se definují danými parametry. Těmito parametry jsou třída přesnosti, jmenovitá zátěž, nadproudový činitel, amplitudová a úhlová chyba. Dělí se podle účelu použití na

PTP pro distanční ochrany

PTP pro rozdílové ochrany

PTP pro ochranu při zemních poruchách

2.2.2 Základní pojmy PTP

K pochopení principu funkce PTP si musíme definovat následující veličiny, které blíže popisují vlastnosti PTP.

Jmenovitý převod k_I přístrojového transformátoru proudu:

$$k_I = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} (-), \quad (2.6)$$

kde I_{1n} – jmenovitý primární proud – efektivní hodnota proudu primárním vinutím takové velikosti, které odpovídá konstrukce transformátoru (A),

I_{2n} – jmenovitý sekundární proud – efektivní hodnota proudu sekundárním vinutím takové velikosti, které odpovídá konstrukce transformátoru (A).

Hodnoty I_{1n} a I_{2n} jsou uvedeny na štítku.

Celkové břemeno Z_C PTP

$$Z_C = \sqrt{(R_i + R)^2 + (X_i + X)^2} (\Omega) \quad (2.7)$$

je vektorovým součtem vnitřního břemene a vnějšího břemene. Vnitřním břemenem rozumíme rezistanci a reaktanci sekundárního vinutí a vnějším břemenem rezistanci a reaktanci zátěže připojené právě k tomuto sekundárnímu vinutí.

Vnitřní břemeno

$$Z_I = \sqrt{R_I^2 + X_I^2} (\Omega), \quad (2.8)$$

kde R_I – rezistence sekundárního vinutí (Ω),
 X_I – reaktance sekundárního vinutí (Ω).

Vnější břemeno

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} (\Omega), \quad (2.9)$$

kde R – rezistence zátěže – připojené přístroje k sekundárnímu vinutí (Ω),
 X – reaktance zátěže – připojené přístroje k sekundárnímu vinutí (Ω).

Maximální hodnota vnějšího břemene Z_n , při kterém není překročena dovolená chyba měření v daném měřicím rozsahu, se nazývá jmenovité břemeno.

Vynásobíme – li vnější břemeno kvadrátem jmenovitého sekundárního proudu, tak výsledkem bude zátěž S přístrojového transformátoru proudu

$$S = Z \cdot I_{2n}^2 (VA). \quad (2.10)$$

Bude – li mít vnější břemeno jmenovitou hodnotu Z_n , dostaneme jmenovitou zátěž S_n [3]

$$S_n = Z_n \cdot I_{2n}^2 (VA). \quad (2.11)$$

2.2.3 Měření s PTP

Přesnost měření PTP se odvíjí především podle nadproudové charakteristiky. Ta je závislá na nadproudovém čísle n a také na velikosti vnějšího břemene Z . S měnícím se břemenem se mění stav přesycení magnetického jádra transformátoru. Pro nadproudové číslo n platí

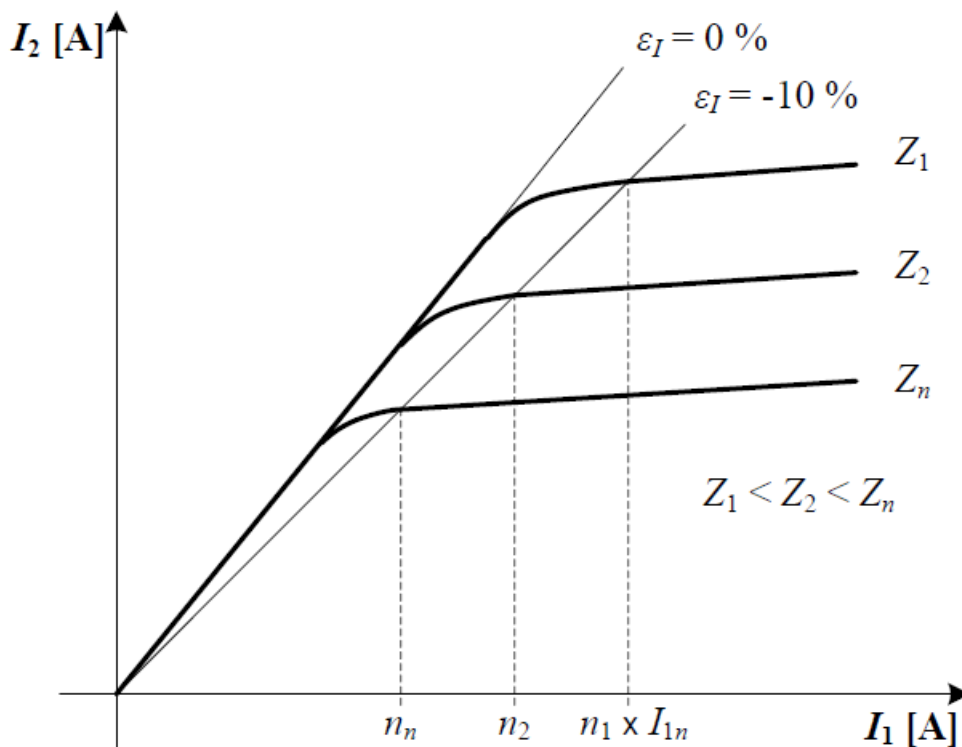
$$n \cong n_n \cdot \frac{Z_n}{Z} (-), \quad (2.12)$$

kde n_n – jmenovité nadproudové číslo (-),

Z_n – jmenové břemeno (Ω),

Z – vnější břemeno (Ω).

Z uvedené rovnice obdobně jak z obr. č. 1 vyplývá, že čím více je zatížen PTP, tím menší je nadproudové číslo.



Obr. 1 Proudové charakteristiky PTP v závislosti na vnějších břemenech Z [3]

Pracovní oblast PTP se dělí na dvě části. Provozní a nadproudovou. Proudová charakteristika a nadproudové číslo udává přesnost měření v nadproudové oblasti (při přetíženích a poruchových stavech) a za normálního stavu v provozní oblasti je přesnost daná třídou přesnosti. Třída přesnosti určuje maximální dovolené chyby, které mohou nastat při běžných podmínkách provozu. Vyjadřuje velikost dovolených relativních chyb amplitud proudu ε_I a dovolených chyb úhlu transformátoru δ_I . Měřicí přístrojové transformátory proudu se vyrábí s třídou přesnosti 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3 – 5. Jistící přístrojové transformátory mohou být v provedení s třídou přesnosti 5P a 10P, kde písmenko P pochází z anglického výrazu protection – ochrana. Podle třídy přesnosti se pozná, pro jaké pole působnosti jsou transformátory určeny dle tab. č. 1.

Tab. 1 Třídy přesnosti

0,1	Přesná laboratorní měření
0,2	Laboratorní měření
0,2 S	Rozšířený násobek jmenovitého proudu, laboratorní měření
0,5	Měření spotřeby elektrické energie
0,5 S	Rozšířený násobek jmenovitého proudu, měření spotřeby elektrické energie
1	Podružná měření
3	Orientační měření
5	Orientační měření

Relativní chyby amplitud proudu vznikají z důvodu úniku části primárního proudu do magnetizační větve hlavní indukčnosti transformátoru namísto přesunu do sekundárního obvodu. Tento fakt zapříčiní, že skutečný převod transformátoru se nerovná jmenovitému převodu

$$\varepsilon_I = \frac{I_m}{I_1} \cdot 100 = \frac{k \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100 (\%), \quad (2.13)$$

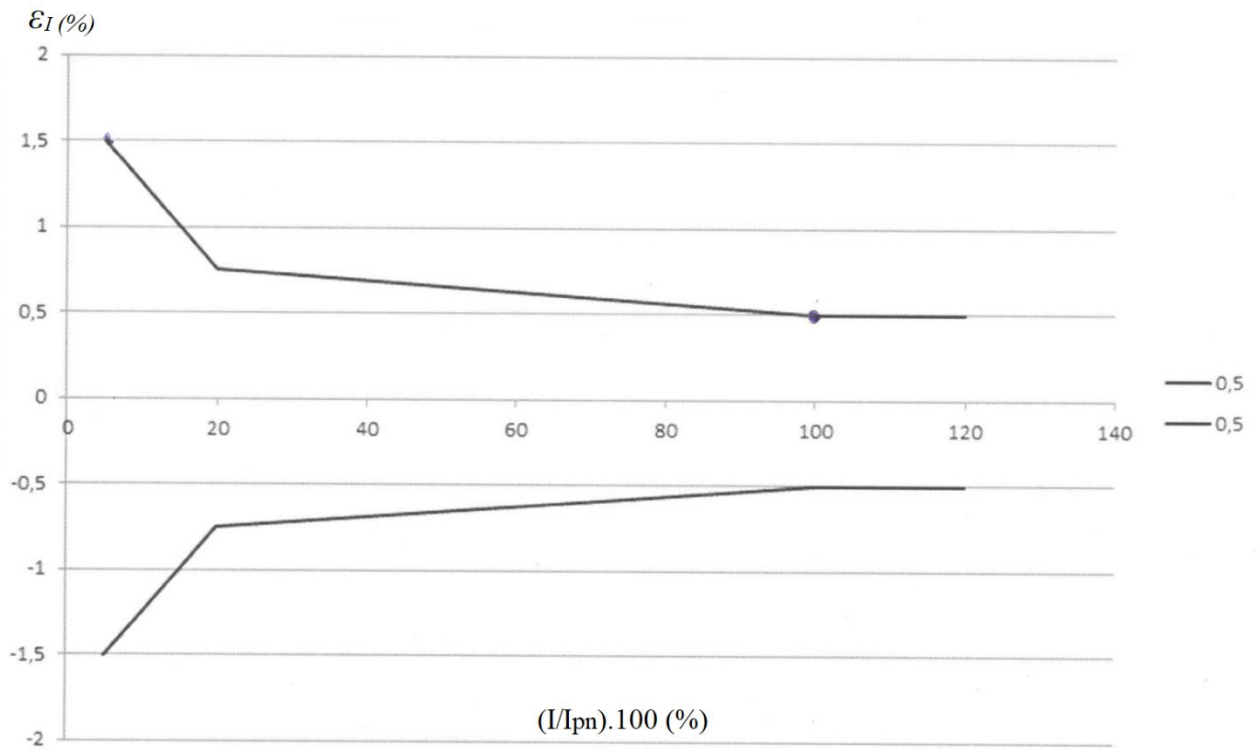
kde I_1 – proud primárním vinutím (A),
 I_2 – proud sekundárním vinutím (A),
 I_m – magnetizační proud (A),
 k – jmenovitý převod (-).

V ideálním případě úhel mezi vektory primárního proudu a sekundárního je nulový. V reálném provedení ale vždy nastává chyba úhlu transformátoru proudu δ_I . Když vektor proudu na sekundární straně předbíhá vektor proudu primární strany, mluvíme o kladné chybě úhlu. Když se zpožďuje, jedná se zápornou chybu úhlu. [3, 5]

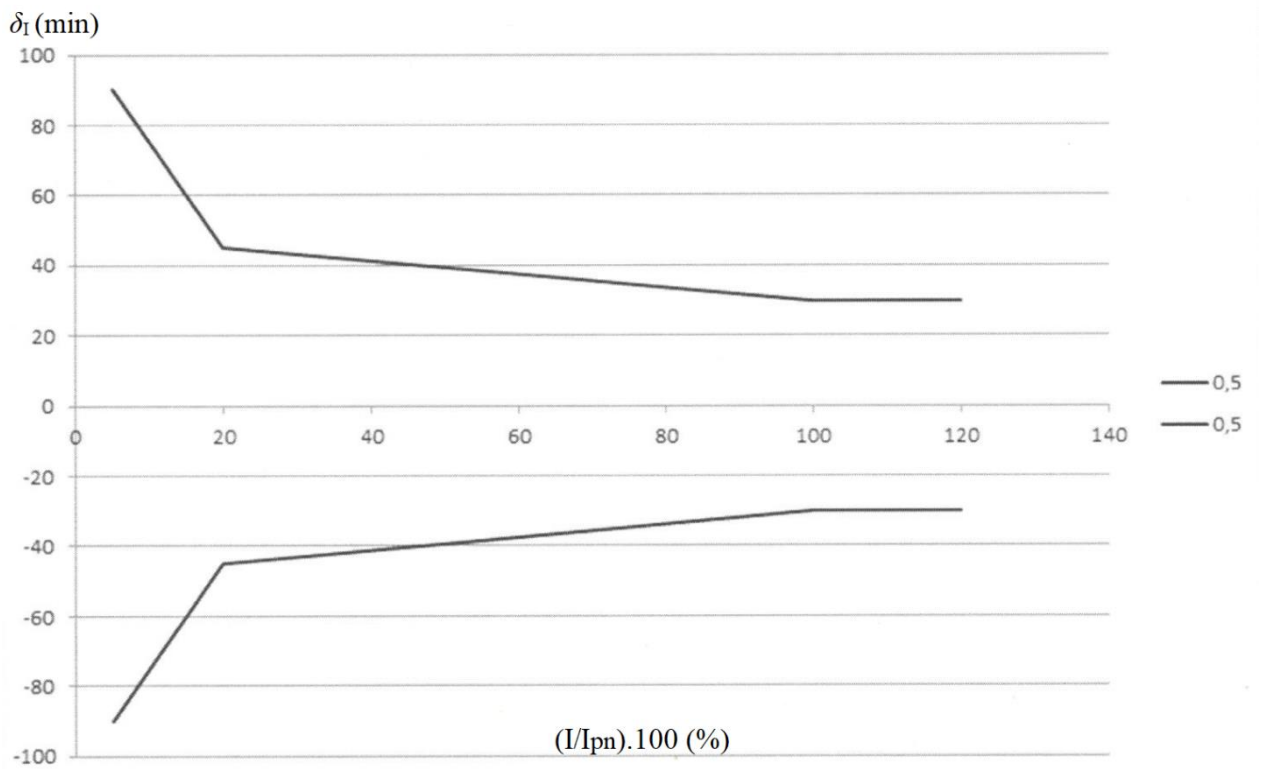
Meze chyb pro měřicí transformátory proudu s danou třídou přesnosti zobrazují následující tabulky a obrázky.

Tab. 2 Chyby při jednotlivých třídách přesnosti měřících transformátorů proudu [6]

Třída přesnosti	± chyba proudu v % jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku				± chyba úhlu v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku							
					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	0,15
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8



Obr. 2 Chyba proudu měřicího transformátoru při třídě přesnosti 0,5



Obr. 3 Chyba úhlu měřicího transformátoru při třídě přesnosti 0,5

Pro třídu 3 a třídu 5 nejsou stanoveny meze chyby úhlu.

Tab. 3 Chyby při jednotlivých třídách přesnosti měřicích transformátorů proudu [6]

Třída přesnosti	± chyba proudu v % jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku	
	50	120
3	3	3
5	5	5

Tab. 4 Chyby při jednotlivých třídách přesnosti měřicích transformátorů proudu pro zvláštní použití [6]

Třída přesnosti	± chyba proudu v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku					± chyba úhlu v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku									
						minuty					centiradiány				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2 S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5 S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9

Třídy přesnosti s označením S jsou stanoveny pro PTP pro zvláštní použití, speciálně ve spojení s elektroměry, kde je vyžadována vysoká přesnost. Měří správně už od 1 % jmenovitého proudu.

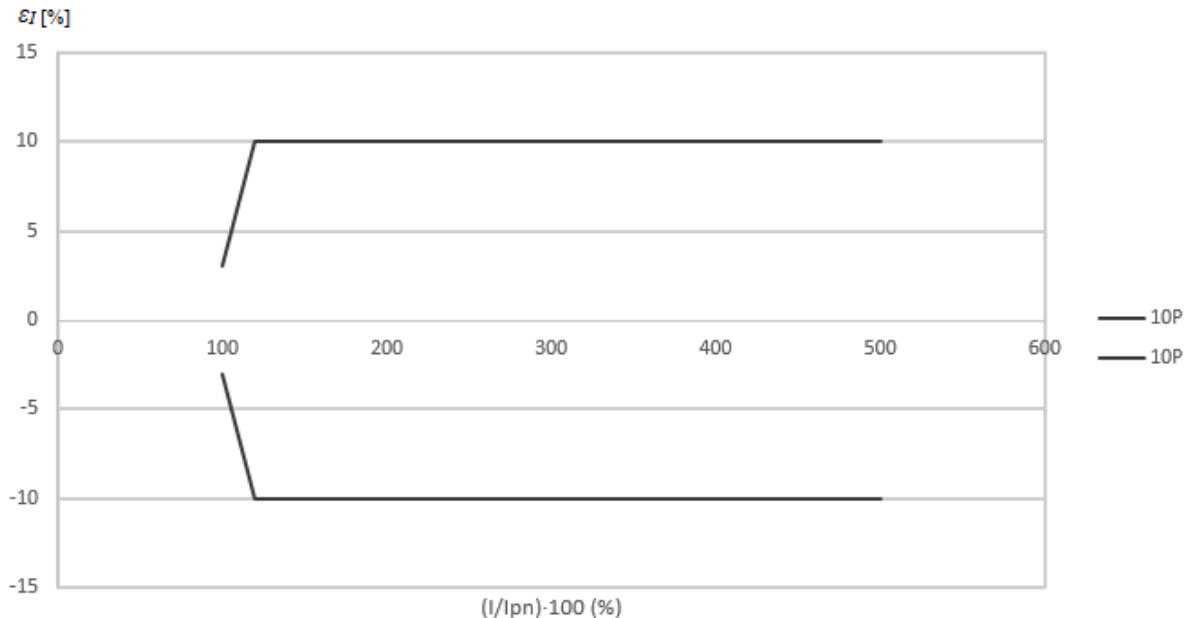
Meze chyb pro jisticí transformátory proudu s danou třídou přesnosti zobrazuje následující tab. č. 5.

Tab. 5 Chyby při jednotlivých třídách přesnosti jisticích transformátorů proudu [6]

Třída přesnosti	Chyba převodu	Chyba úhlu		Celková chyba
	$\pm \varepsilon_I$ (%)	$\pm \delta_I$ (min)	$\pm \delta_I$ (centiradiány)	
5TPE	1	60	1,8	5
5P	1	60	1,8	5
10P	3	Není garantováno	Není garantováno	10

Uvedené hodnoty pro chybu převodu ε_I v tab. 5 platí pouze pro jmenovitý proud I_n a pro jmenovitou zátěž, u jisticích jader PTP nemáme garantovanou přesnost měření pro nižší hodnoty proudů než I_n . U malých zátěží připojených na sekundární vinutí, je však pravděpodobné, že tato přesnost bude také dosažena.

Přesnost při vyšších hodnotách proudu než jmenovitý proud I_n nám udává celková chyba ε_c , a to až do hodnoty dané nadproudovým číslem. Například PTP s třídou přesnosti 10P, nadproudovým číslem 5 a se jmenovitým primárním proudem 300 A bude mít až do hodnoty $(5 \cdot 300) = 1500$ A zaručenou maximální možnou chybu měření 10 %.



Obr. 4 Chyba proudu jisticího transformátoru s nadproudovým číslem $n = 5$ při třídě přesnosti 10P

Celková chyba je v ustáleném stavu definována jako efektivní hodnota rozdílu mezi okamžitou hodnotou primárního proudu a okamžitou skutečnou hodnotou sekundárního proudu vynásobeného jmenovitým transformačním převodem,

$$\varepsilon_c = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (k \cdot i_2 - i_1)^2 dt}}{I_1} \cdot 100 (\%), \quad (2.14)$$

kde

k – jmenovitý převod (-),

I_1 – efektivní hodnota proudu primárním vinutím (A),

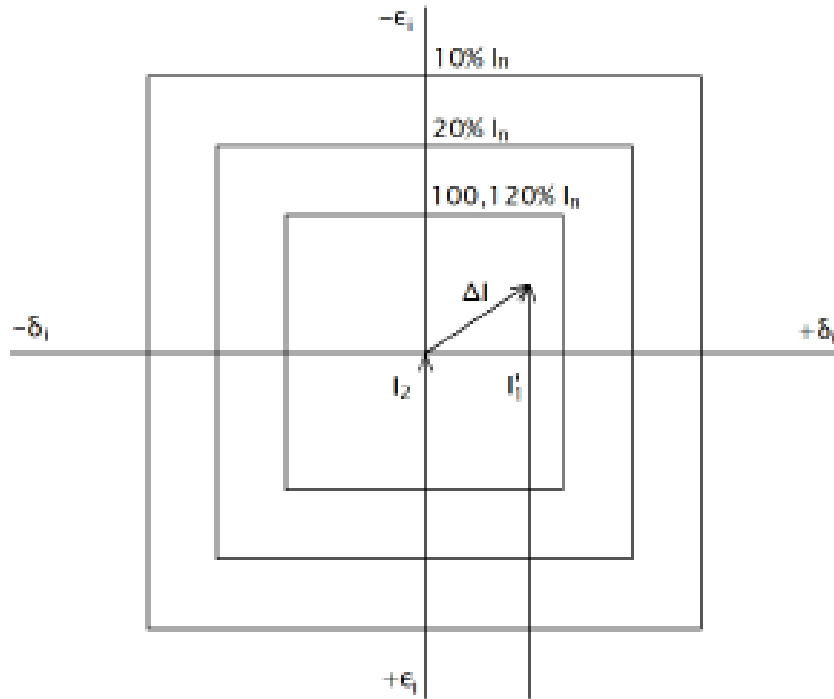
T – perioda (s),

i_1 – okamžitá hodnota proudu primárním vinutím (A),

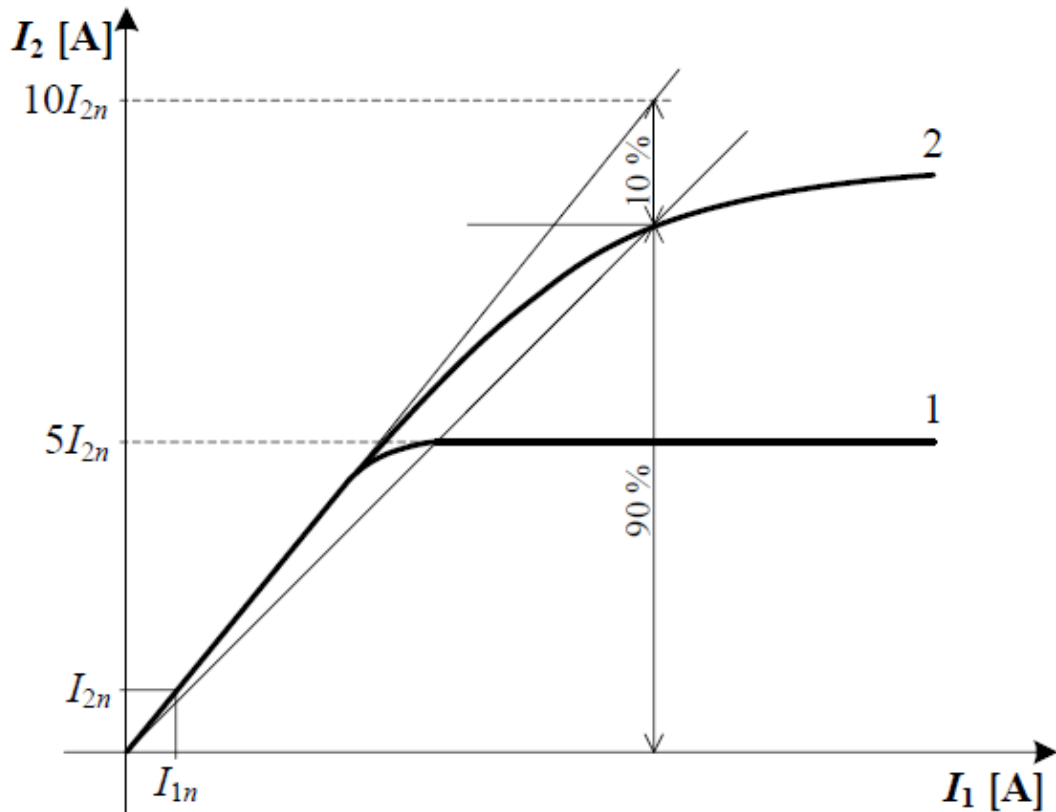
i_2 – okamžitá hodnota proudu sekundárním vinutím (A).

Rozmezí chyb objevující se při dané třídě přesnosti lze vyjádřit srozumitelně také dle komplexního diagramu chyb PTP na obr. č. 5. Střed diagramu – počátek souřadnicového systému tvoří konec fázoru I_2 . Za výchozí veličiny jsou v těchto diagramech brány ty na sekundární straně, proto jsou ostatní veličiny přepočteny na počet závitů sekundárního vinutí. Celková chyba je tu zobrazena jako ΔI a jelikož chyby úhlu jsou v řádech minut lze uvažovat fázory I_2 a I_1 jako

rovnoběžné. Jak je vidět v předcházejících tabulkách, chyby při dané třídě přesnosti nejsou konstantní v celém rozsahu, ale mění se v závislosti na velikosti procenta ze jmenovitého proudu. Při 20 % I_n je chyba větší než při 100 % I_n a tak dále. V komplexním diagramu jsou určeny hranice pro náležitý rozsah proudu, které nejsou překročeny v případě, že transformátor vyhovuje dané třídě přesnosti. Princip spočívá v tom, že koncový bod fázoru I'_1 se musí vždy nacházet uvnitř oblasti pro určitou hodnotu jmenovitého proudu. [2]



Obr. 5 Komplexní diagram chyb PTP [4]



Obr. 6 Nadproudové charakteristiky PTP (1 – měřicí, 2 – jisticí)

Proudová charakteristika transformátoru proudu (viz. obr. 6) je závislost sekundárního proudu na proudu primárním. Při vyšších hodnotách než je měřicí rozsah PTP mluvíme o nadproudové oblasti. V této oblasti jsou kladeny různé nároky na měřicí a na jisticí transformátory. U měřicích se očekává, že se křivka závislosti proudů, vlivem feromagnetických vlastností jádra, bude rychle zakřivovat, aby případné nežádoucí jevy na primární straně neohrozili připojené přístroje na sekundární straně. U jisticích PTP je tomu naopak. Nadproudovou oblast charakterizuje nadproudové číslo n , které se rovná n – násobku jmenovitého primárního proudu, který vytvoří celkovou relativní amplitudovou chybu 5 % při třídě přesnosti 5 P, respektive chybu 10 % při třídě přesnosti 10 P. Pokud k tomu je přístrojový transformátor zatížen jmenovitým břemenem Z_n , při jmenovitém účinníku $\cos \varphi = 0,8$ induktivního charakteru a při jmenovité frekvenci, hovoříme o jmenovitém nadproudovém čísle n_n PTP. U měřicích transformátorů je vyžadováno pokud možno co nejnižší nadproudové číslo $n < 5$, naopak u jisticích transformátorů je vyžadováno pokud možno co nejvyšší nadproudové číslo $n > 10$. [3]

2.3 Klasické indukční přístrojové transformátory napětí

Přístrojové transformátory napětí napájí napěťové obvody měřících a jisticích přístrojů. Zapojují se paralelně k měřenému vysokonapěťovému obvodu, respektive jejich primární strana, přičemž k sekundární straně jsou připojeny elektrické přístroje.

2.3.1 Rozdělení PTN

Obdobně jako PTP se vyhotovuje několik různých typů. Nejzákladnější rozdělení je podle způsobu transformace napětí. Rozlišují se indukční PTN a kapacitní PTN. Už z názvu vyplývá způsob, který je využíván. U prvně jmenovaných vazbu mezi primárním a sekundárním vinutím tvoří magnetický obvod a u kapacitních PTN se převod uskutečňuje prostřednictvím kapacitních děličů napětí a následně se pomocí dalších přidavných pomocných příslušenství jako je druhý indukční transformační proces, kompenzují chyby převodu a tlumí se ferorezonance.

Dále se přístrojové transformátory proudu dělí podle počtu fází a podle izolace.

- Jednofázový jednopólově izolovaný přístrojový transformátor napětí
- Jednofázový dvojpólově izolovaný přístrojový transformátor napětí
- Trojfázový plně izolovaný přístrojový transformátor napětí
- Trojfázový uzemněný přístrojový transformátor napětí

Nebo můžeme rozlišovat PTN dle počtu výstupů na sekundární straně. Zvláštním typem jsou kaskádové transformátory napětí.

2.3.2 Základní pojmy PTN

K popisu funkce PTN je třeba si popsat následující veličiny.

Jmenovitý převod k_U přístrojového transformátoru napětí

$$k_U = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} (-), \quad (2.15)$$

kde U_{1n} – jmenovité primární napětí – je základním východiskem z kterého se vychází při konstrukci přístrojového transformátoru napětí, jedná se o efektivní hodnotu primárního napětí,

U_{2n} – jmenovité sekundární napětí – efektivní hodnota sekundárního napětí odpovídající jmenovitému převodu a primárnímu napětí, napětí U_{2n} je rovno 100 V u trojfázových izolovaných a u dvojfázových izolovaných transformátorů, výjimečně 110 V, v případě trojfázových uzemněných a jednopólově izolovaných transformátorů je tato hodnota rovna $100/\sqrt{3}$, výjimečně $110/\sqrt{3}$.

Hodnoty U_{1n} a U_{2n} jsou uvedeny na štítku.

Břemenem Y transformátoru rozumíme součet admitance přívodů a přístrojů zapojených k sekundárnímu vinutí

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} (S), \quad (2.16)$$

kde G – konduktance přívodů a přístrojů (S),
 B – susceptance přívodů a přístrojů (S).

Pokud se jedná o maximální admitanci, při které nejsou na daném měřicím rozsahu překročeny dovolené chyby, mluvíme o jmenovitém břemenu Y_n .

Vynásobíme – li břemeno druhou mocninou jmenovitého sekundárního napětí, dostaneme zátěž S přístrojového transformátoru napětí

$$S = Y \cdot U_{2n}^2 \text{ (VA)}. \quad (2.17)$$

Bude – li mít břemeno jmenovitou hodnotu Y_n , výsledkem bude jmenovitá zátěž S_n

$$S_n = Y_n \cdot U_{2n}^2 \text{ (VA)}. \quad (2.18)$$

2.3.3 Měření s PTN

Obdobně jako u PTP třídy přesnosti určují maximální dovolené chyby, které mohou nastat při běžných podmínkách provozu. Vyjadřují velikosti dovolených relativních chyb amplitud napětí ε_U a dovolených chyb úhlu transformátoru δ_U . Měřicí přístrojové transformátory napětí se vyrábí s třídou přesnosti 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3. Jistící přístrojové transformátory napětí mohou být v provedení s třídou přesnosti 3P a 6P.

U transformátoru s třídou přesnosti 0,1 tedy může při jmenovitém napětí nastat maximální chyba, která nepřekročí hodnotu 0,1 % z tohoto napětí.

Relativní chyba amplitud napětí ε_U způsobená odchylkou skutečného převodu od jmenovité hodnoty převodu je rovna

$$\varepsilon_U = \frac{k_U \cdot U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100 \text{ (-)}, \quad (2.19)$$

kde U_1 – primární napětí (V),
 U_2 – sekundární napětí odpovídající primárnímu napětí (V),
 k_U – jmenovitý převod PTN (-).

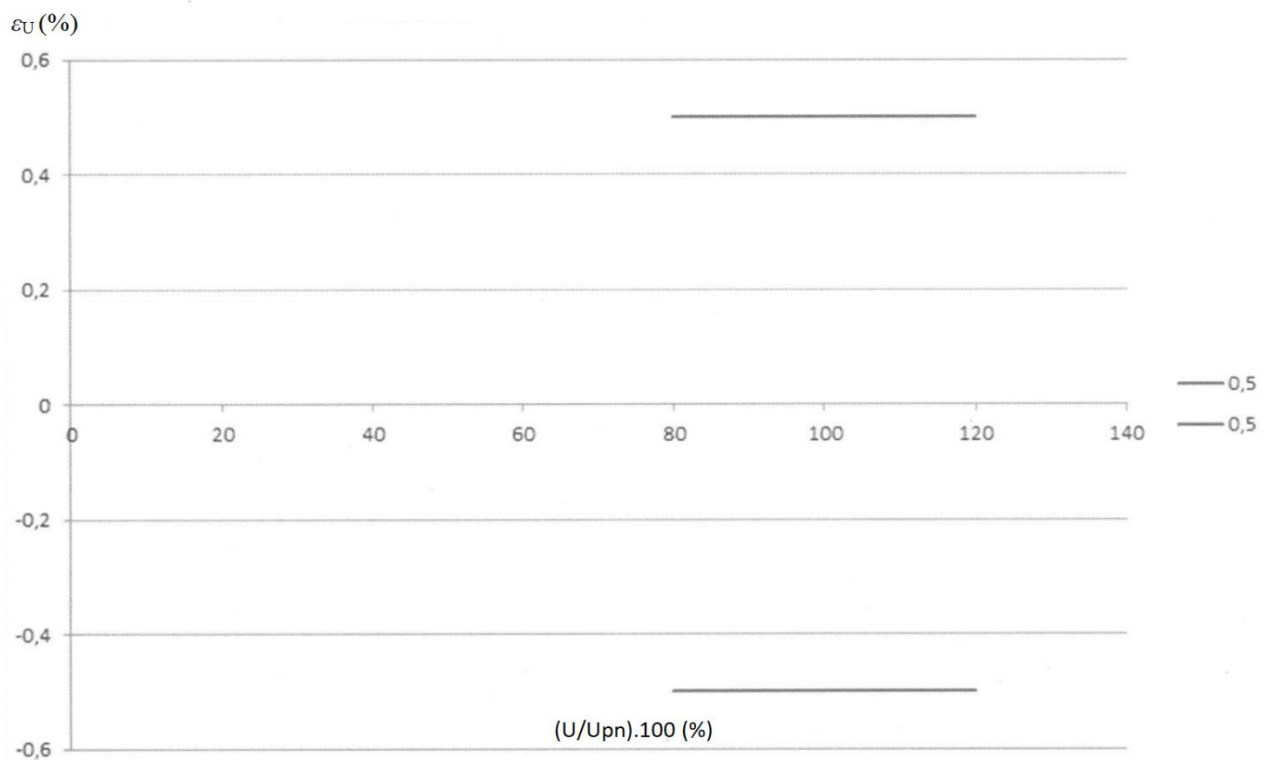
V ideálním případě úhel mezi vektory primárního napětí a sekundárního je nulový. V reálném provedení ale vždy nastává chyba úhlu transformátoru napětí δ_U . Chyby těchto úhlů a napětí jsou zobrazeny v následujících tabulkách a grafech. [3]

2.3.3.1 Měřicí transformátory

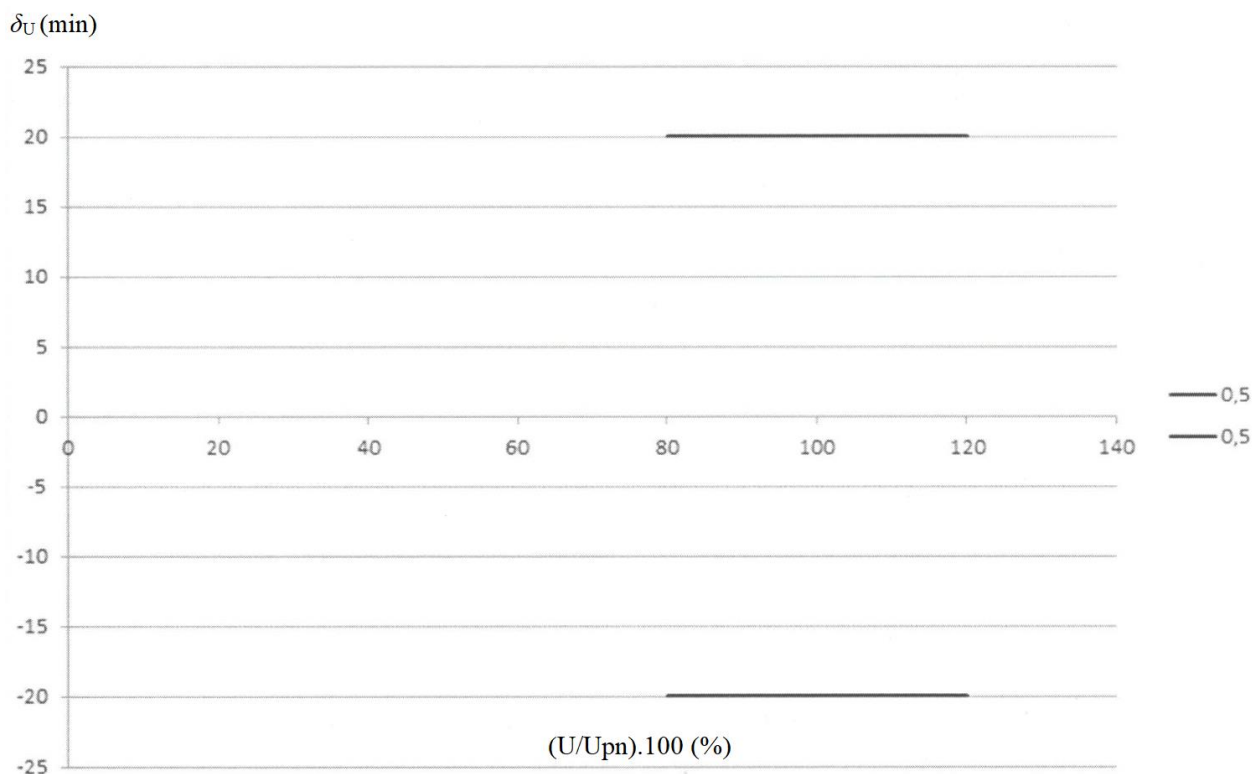
Meze chyb pro měřicí transformátory napětí s danou třídou přesnosti zobrazují následující tab. č. 6 a obr. č. 7, 8.

Tab. 6 Chyby při jednotlivých třídách přesnosti měřicích transformátorů napětí [7]

Třída přesnosti	Chyba napětí	Chyba úhlu	
	$\pm\varepsilon_U$ (%)	$\pm\delta_U$ (min)	$\pm\delta_U$ (centiradiány)
0,1	0,1	5	0,15
0,2	0,2	10	0,3
0,5	0,5	20	0,6
1,0	1,0	40	1,2
3,0	3,0	Není garantováno	Není garantováno



Obr. 7 Chyba amplitudy napětí měřicího transformátoru při třídě přesnosti 0,5



Obr. 8 Chyba úhlu napětí měřicího transformátoru při třídě přesnosti 0,5

Chyba napětí a úhlu by neměla překročit uvedené hranice při jakémkoliv napětí mezi 80 % a 120 % jmenovitého napětí, s břemeny mezi 25 % a 100 % jmenovitého břemene a při induktivním účinníku 0,8.

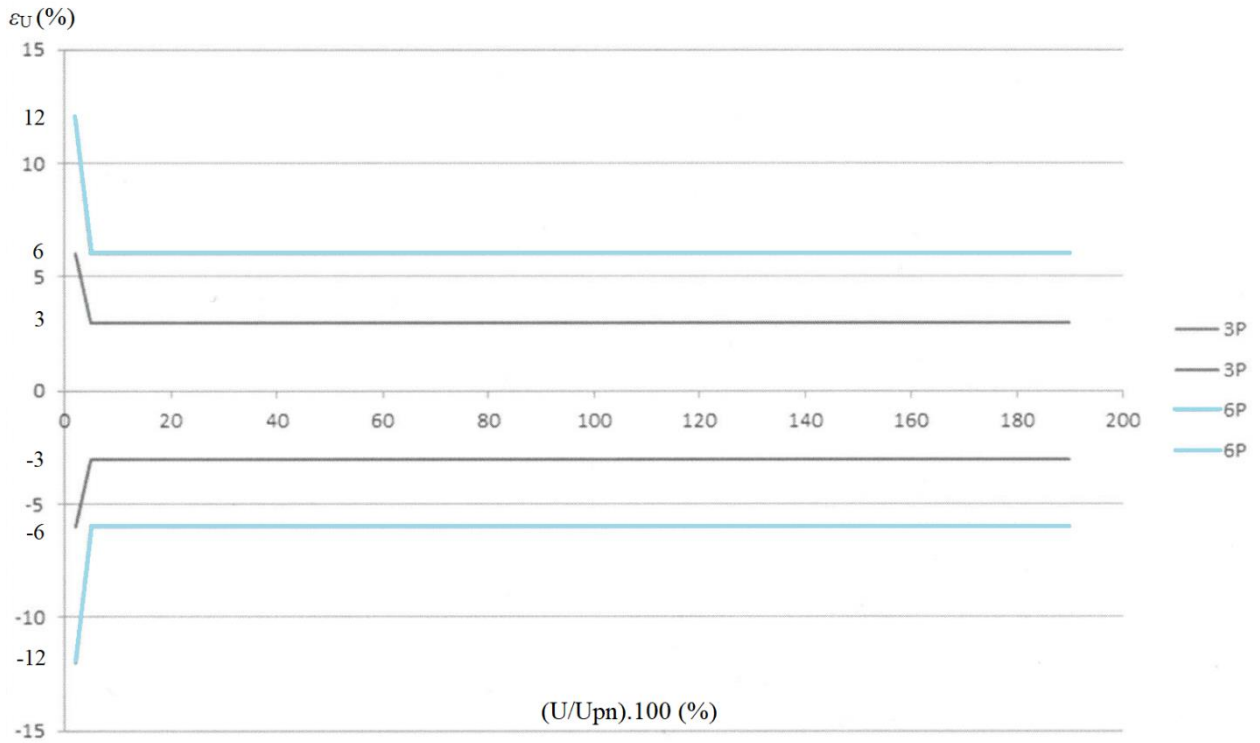
2.3.3.2 Jisticí transformátory

Meze chyb pro jisticí transformátory napětí s danou třídou přesnosti zobrazuje následující tab. č. 7 a obr. č. 9, 10.

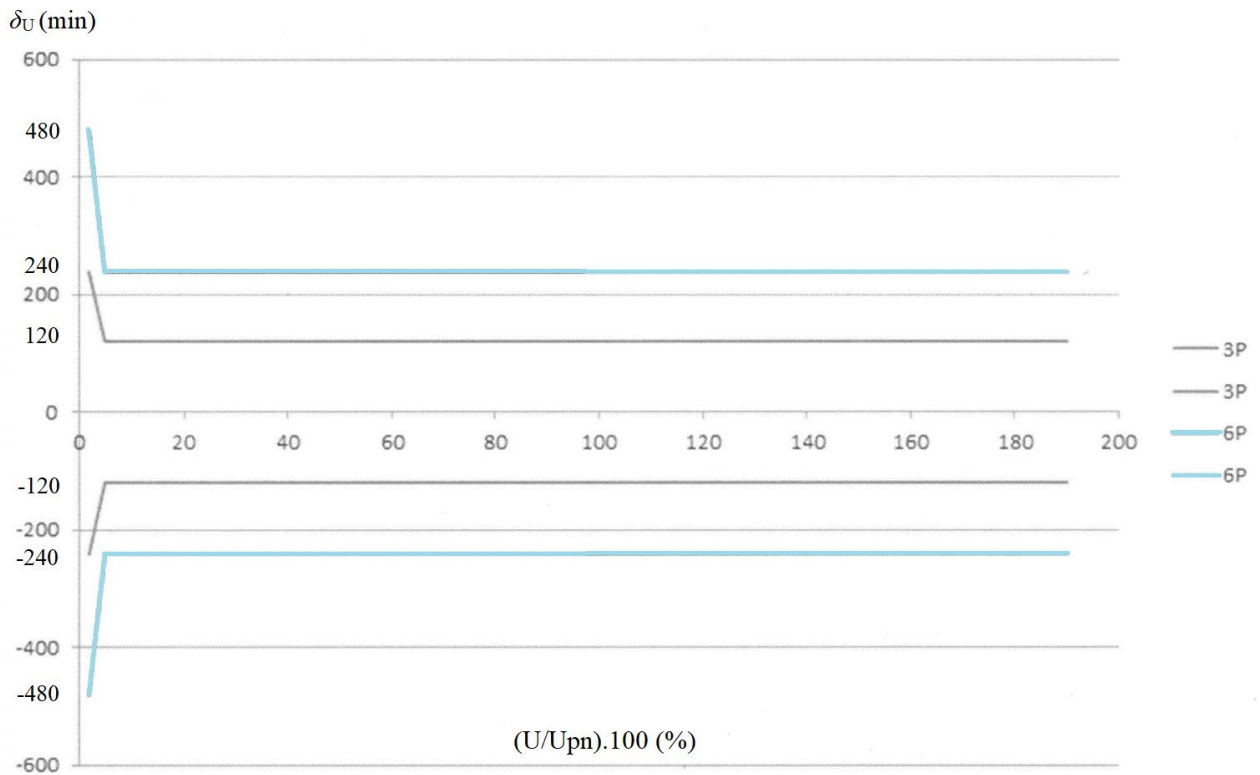
Tab. 7 Chyby při jednotlivých třídách přesnosti jisticích transformátorů napětí [7]

Třída přesnosti	$(U_p/U_{pn}) \cdot 100$								
	2 (%)			5 (%)			x (%) – 190 (%)		
	$\pm \varepsilon_U$ (%)	$\pm \delta_U$ (min)	$\pm \delta_U$ (centiradiány)	$\pm \varepsilon_U$ (%)	$\pm \delta_U$ (min)	$\pm \delta_U$ (centiradiány)	$\pm \varepsilon_U$ (%)	$\pm \delta_U$ (min)	$\pm \delta_U$ (centiradiány)
3P	6	240	7	3	120	3,5	3	120	3,5
6P	12	480	14	6	240	7	6	240	7

(Pozn. x – jmenovitý činitel zvýšení napětí násobený 100)



Obr. 9 Chyby amplitud napětí jističího transformátoru při třídách přesnosti 3P a 6P



Obr. 10 Chyby úhlu napětí jističího transformátoru při třídách přesnosti 3P a 6P

3 ELEKTRONICKÉ PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY - SENZORY

Vlivem neustálých konstrukčních změn a zmenšování VN rozvaděčů jsou kladeny požadavky směrem k nižším rozměrům a nižším hmotnostem elektrických přístrojů. Zejména u rozvaděčů izolovaných pomocí plynu SF₆. Tento tlak vedl ke vzniku elektronických přístrojových transformátorů (senzorů). Tyto senzory vynikají především absencí magnetického obvodu. Nemůže dojít k jeho přesycení. Mezi další kladné stránky patří vysoká spolehlivost, elektromagnetická kompatibilita, minimální údržba a větší flexibilita pro projektování a zvyšování výkonů v budoucnosti.

3.1 Proudové senzory

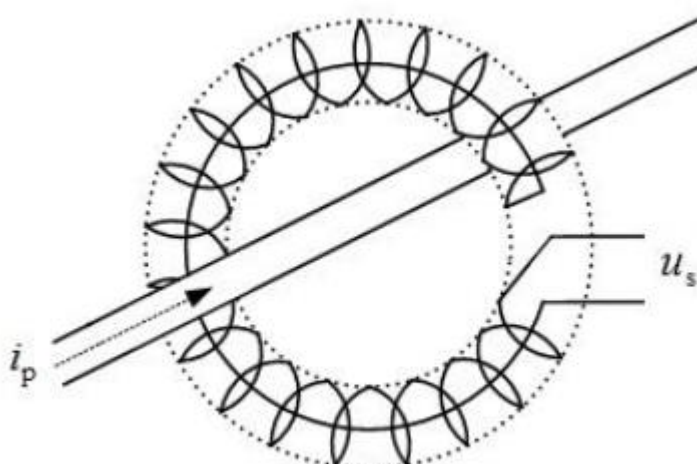
Proudové senzory jsou založeny na principu známém z výzkumů Waltera Rogowského již z roku 1912. Jedná se o Rogowského cívku. Vinutí je rovnoměrně umístěné na toroidním jádře z neferomagnetického materiálu a obklopuje proudový vodič, který je umístěn přímo uprostřed toroidu obdobně jako sekundární vinutí v proudovém transformátoru. Výstupem ze senzoru je napětí u_{out} , které se indukuje kvůli přítomnosti střídavého magnetického pole kolem vodiče a je úměrné derivaci proudu podle času. Napětí u_{out} je dále digitálně integrováno v ochraně, ve které se získává výsledná hodnota proudu pro měřicí a jistící účely,

$$u_{out}(t) = M \cdot \frac{di_1(t)}{dt}, \quad (3.1)$$

kde u_{out} – okamžitá hodnota výstupního napětí (V),
 i_1 – okamžitá hodnota primárního proudu (A),
 t – čas (s),
 M – vzájemná indukčnost (H),

$$M = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot A}{l_m}, \quad (3.2)$$

kde μ_0 – permeabilita vakua (H·m⁻¹),
 N – počet závitů (-),
 A – průřez cívky (m²),
 l_m – délka střední linie cívky (m).



Obr. 11 Rogowského cívka

Nepřítomnost magnetického jádra umožňuje vysokou dynamičnost a možnost měřit proudy ve velkém rozsahu od jednotek ampérů po několik stovek ampérů. Měřicí rozsah je dán ve většině případů použitou elektronikou v digitální ochraně.

I přes vysokou linearitu proudu oproti klasickým indukčním transformátorům i v těchto zařízeních vznikají chyby, které jsou závislé na různých parametrech. Například významným parametrem přesnosti měření je teplota. Proto je snaha zavádět speciální materiály o nízkých teplotních koeficientech, anebo se kontinuálně měří teplota senzoru a následně proběhne vyrovnání dle teplotních závislostí. Dalšími příčinami vzniků chyb mohou být vliv magnetických polí proudů v ostatních fázích, konečná délka vodiče a také tolerance při výrobě proudových senzorů. Tyto neduhy mohou být potlačeny vhodnou konstrukcí senzoru a jeho optimálním umístěním ve VN rozvaděči. [6]

Proudové senzory mají velký frekvenční rozsah od jednotek Hz do několika kHz. Díky tomu jsou vhodné i pro vyhodnocování kvality elektrické energie neboť jsou schopné přenášet i deformované průběhy poruchových proudů.

V rozvodně Medlánky jsou instalovány proudové senzory typu KECA 80 D85. Jádro senzorů je dělené a umožňuje tedy snadný přístup k měřenému vodiči, je to vhodný prvek pro retrofity, ale také pro nové instalace. Instaluje se na průchodkový izolátor, izolované, stíněné kabelové konektory nebo na jakýkoliv jiný typ izolovaného vodiče.

Používá se jak ve vzduchem, tak i plynem izolovaných rozváděčích. [8]

3.1.1 Diference v přesnosti měření od PTP

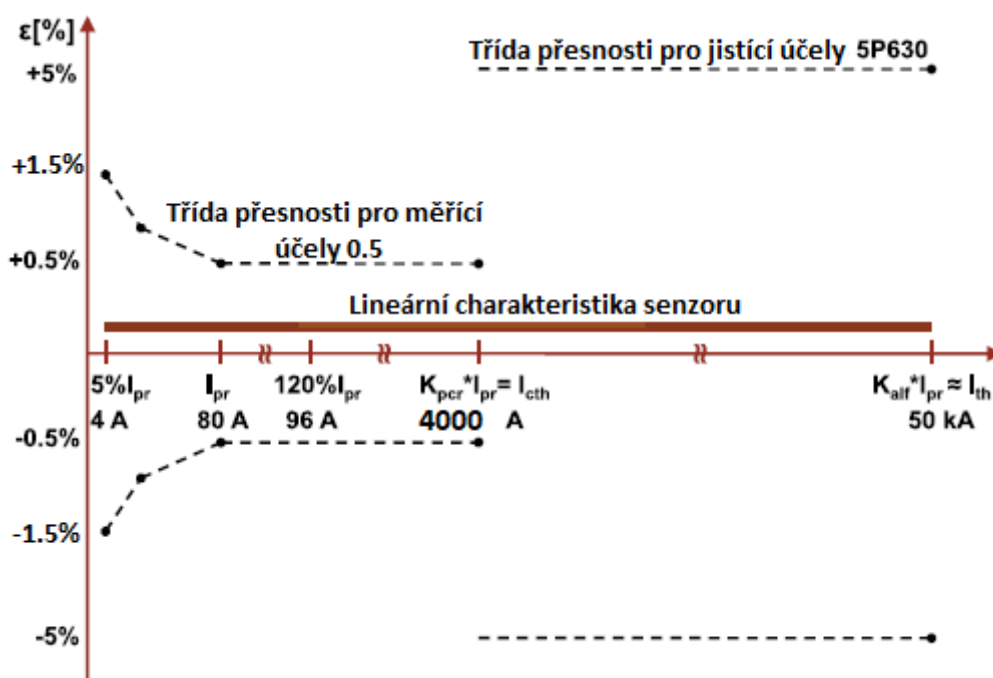
Měřicí účely

Zatímco u PTP je garantovaná přesnost měřicího jádra jen do 1,2 násobku jmenovitého proudu, u senzorů proudu je přesnost měření pro účely měření definována až do hodnoty danou faktorem K_{pcr} . To značí, že například pro senzor s třídou přesnosti 0,5/5P630, s činitelem $K_{\text{pcr}} = 50$ a se jmenovitým primárním proudem 80 A je třída přesnosti pro měření zaručena až do hodnoty $50 \cdot 80 = 4000$ A.

Jisticí účely

Od hodnoty proudu, při které už není garantována přesnost pro měřicí účely, je známa přesnost měření pro jisticí účely. U PTP je tato přesnost dána už od jmenovité hodnoty proudu, u senzorů zpravidla bývá tato přesnost definována až od vyšších hodnot proudu. Například v případě senzoru zmiňovaném v předcházejícím odstavci je to až od hodnoty 4000 A (viz. obr. 12). Horní mez je daná nadproudovým číslem. U senzoru s nadproudovým číslem 630 a se jmenovitým proudem 80 A je přesnost pro jisticí účely zaručena až do hodnoty $630 \cdot 80 = 50,4$ kA.

PTP mají funkci měřicí a jisticí rozdělenou mezi dvě feromagnetická jádra, která mají rozdílnou charakteristiku a rozsah, zatímco proudové senzory nemají magnetická jádra a jejich rozsah pro měřicí a jisticí účely je jednotný a je lineární od jednotek A po několik desítek kA.



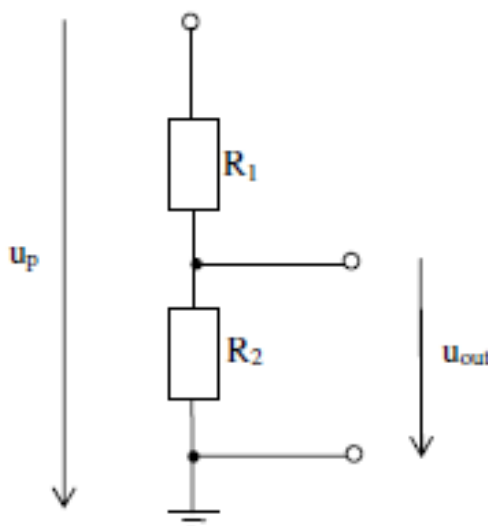
Obr. 12 Jednotná třída přesnosti (0.5/5P630) proudového senzoru KECA 80 D85

Pro tento typ proudového senzoru KECA 80 D85 je bod, ve kterém je hranice mezi třídou přesnosti pro měřicí účely a pro jisticí účely, rovna jmenovitému trvalému teplotnímu proudu I_{cth} a horní mez přesnosti pro jisticí účely 50,4 kA je přibližně rovna jmenovitému krátkodobému teplotnímu proudu I_{th} . [9]

3.2 Napět'ové senzory

Napět'ové senzory se vyrábí ve dvou různých provedení. Napětí je měřeno odporovým děličem, anebo v případě druhé varianty kapacitním děličem. Absence magnetického jádra umožňuje využití ve velkém rozsahu. Například typ senzoru KEVA 24 A1 je určen pro rozsah napětí od 7,2 kV do 24 kV. Proto není potřeba vyrábět příliš mnoho různých variant, jelikož jeden typ vyhoví více různým jmenovitým fázovým napětím. Sekundární napětí při jmenovitém primárním napětí je rovno 1 V.

Chyba senzorů se pohybuje kolem 0,5 %, pro účely měření je vyžadována vyšší přesnost – chyba kolem 0,2 %. Té se dosahuje dvěma způsoby. Teplotní kompenzací výstupního sekundárního napětí anebo musí být použity k výrobě senzorů rezistory ze speciálních materiálů s nízkými teplotními koeficienty.



Obr. 13 Jednotná třída přesnosti (0.5/5P630) proudového senzoru KECA 80 D85

Součástí napět'ového senzoru je odporový dělič s velmi velkou rezistancí. Odporový dělič vidíme na obr. č. 13. Skládá se ze dvou do série zapojených rezistorů R_1 a R_2 . Výstupní sekundární napětí u_{out} je úměrné dle následujícího vzorce vstupnímu primárnímu napětí u_p .

$$u_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_p, \quad (3.3)$$

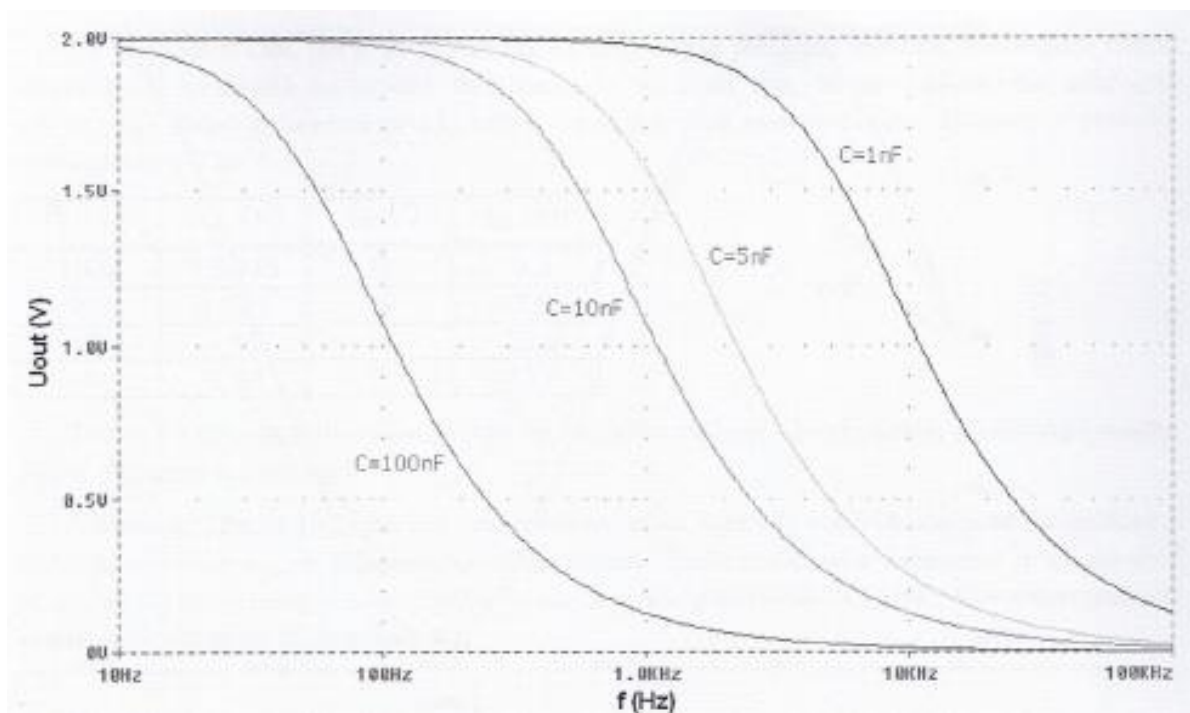
kde u_{out} – okamžitá hodnota výstupního napětí (V),
 R_1, R_2 – hodnoty odporů (Ω),
 u_p – okamžitá hodnota vstupního napětí (V).

Odpor rezistorů R závisí na teplotě dle následující rovnice.

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \Delta T), \quad (3.4)$$

kde R_0 – počáteční odpor (Ω),
 ΔT – rozdíl teplot (K),
 α – teplotní součinitel odporu (K^{-1}).

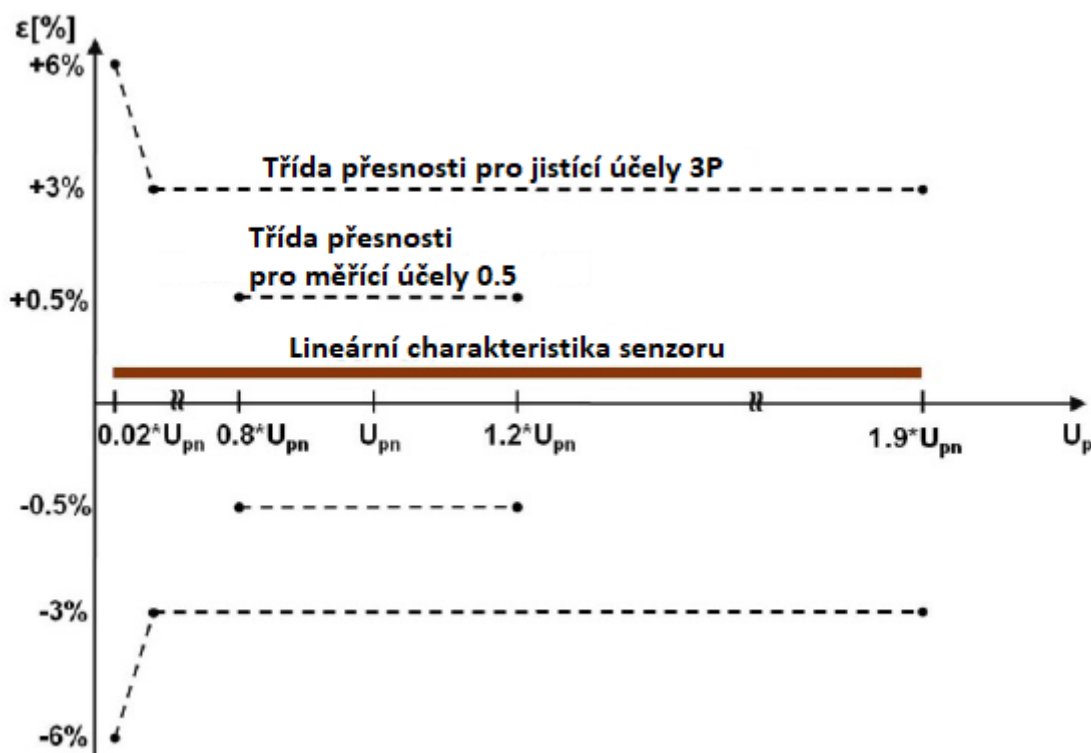
Frekvenční rozsah měření napěťových senzorů není tak obrovský jako je tomu u proudových senzorů – několik kHz (viz. obr. č. 14), ale i přesto postačuje k napájení obvodů ochrany a vyhodnocení kvality elektrické energie. Jsou zde zobrazeny grafické průběhy frekvenční závislosti napětí u_{out} při různých vstupních kapacitách měřicího zařízení.



Obr. 14 Frekvenční závislost napěťového děliče při různých velikostech vstupní kapacity měřicího zařízení [3]

3.2.1 Diference v přesnosti měření od PTN

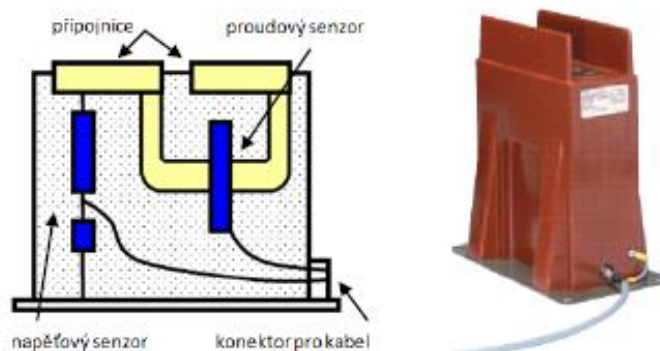
Srovnáme – li následující třídu přesnosti napěťového senzoru KEVA 24B21 (viz. obr. 15) s třídami přesnosti měřících a jistících transformátorů napětí (viz. kapitola 2.3.3), pozorujeme, že jsou definované pro stejný rozsah primárního napětí a maximální chyby amplitud a úhlů mohou dosahovat stejných hodnot. Rozdíl je pouze v tom, že napěťový senzor slučuje měřící a jistící transformátor v jeden kompaktní celek.



Obr. 15 Jednotná třída přesnosti (0,5/3P) napěťového senzoru KEVA 24B21 [10]

3.3 Kombinované senzory

Kombinovaný senzor shrnuje ve své konstrukci proudový a napěťový senzor v jednom celistvém díle. Výhodou je především zmenšení celkového prostoru potřebného pro instalaci a bezpečnost. Vzhledově je velice podobný klasickému přístrojovému transformátoru proudu podpěrného provedení (viz. obr. č. 16) . Liší se připojeným kabelem, se kterým je proudový senzor podroben zkouškám přesnosti. Výstupní signál je nižší než hodnota 5 A nebo 1 A, jak je tomu u sekundárního vinutí PTP.



Obr. 16 Kombinovaný senzor [5]

4 PŘEVODNÍKY V ROZVODNĚ 22 kV V MEDLÁNKÁCH

4.1 Přístrojové proudové transformátory



Obr. 17 Průchodkový transformátor proudu TSR 61.2[4]

Tab. 8 Technické parametry přístrojových proudových transformátorů instalovaných v Medlánkách

Parametr transformátoru	Hodnota
Typ provedení	TSR 61.2, průchodkový do kobky
Převod	300//5/5 A
Třída přesnosti	10P5
Výkon	30 VA
Nadproudové číslo	5
Izolační napětí	25 kV
Zkušební napětí	55 kV
Zkušební napětí ráz	125 kV
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Jmenovitý primární proud	300 A
Jmenovitý krátkodobý proud I_{thn}	40 kA
Jmenovitý dynamický proud	$2,55 \cdot I_{thn}$
Jmenovitý sekundární proud	5 A
Hmotnost	24 kg
Rok výroby	1982
Místo výroby	EJF Brno

4.2 Přístrojové napěťové transformátory



Obr. 18 Přístrojový transformátor napětí typ TJP 6 [8]

Tab. 9 Technické parametry přístrojových napěťových transformátorů instalovaných v Medláncích (v závorce uvedeny hodnoty PTN ve 2. vývodu)

Parametr transformátoru	Hodnota
Typ provedení	TJP 6
Primární napětí	22000/ $\sqrt{3}$
Sekundární napětí	100/3
Třída přesnosti	6P
Výkon	50 (100) VA
Jmenovitá frekvence	50 Hz
Rok výroby	1981

4.3 Proudové senzory

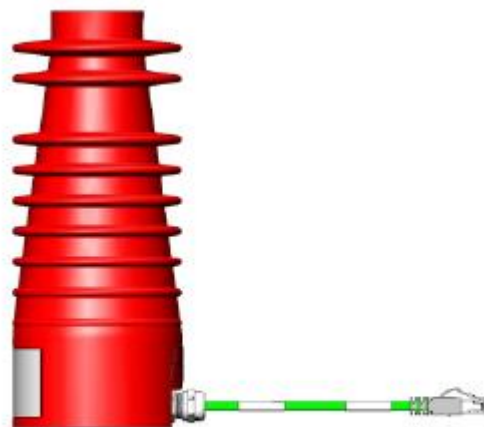


Obr. 19 Proudový senzor KECA 80 D85 [9]

Tab. 10 Technické parametry proudových senzorů instalovaných v Medláncích

Parametr senzoru	Hodnota
Nejvyšší napětí pro zařízení	0,72 kV
Jmenovitý primární proud	80 A
Délka připojovacího kabelu	5 m
Vnitřní průměr	Až do 85 mm
Třída přesnosti	0.5/5P630
Jmenovitý převod	80 A/150 mV při 50 Hz, 80 A/180 mV při 60 Hz
Jmenovitý trvalý teplotní proud I_{cth}	4000 A
Jmenovitý krátkodobý teplotní proud I_{th}	50 kA/3s
Jmenovitý dynamický proud	125 kA
Jmenovité krátkodobé střídavé výdržné napětí	3 kV
Faktor K_{per} – (faktor rozšiřující jmen. primární proud)	50
Jmenovité břemeno	10 M Ω
Teplotní rozsah	-25 °C / +80 °C
Váha	0,25 kg

4.4 Napěťové senzory



Obr. 20 Napěťový senzor KEVA 24B21 instalovaný v Medláncích [10]

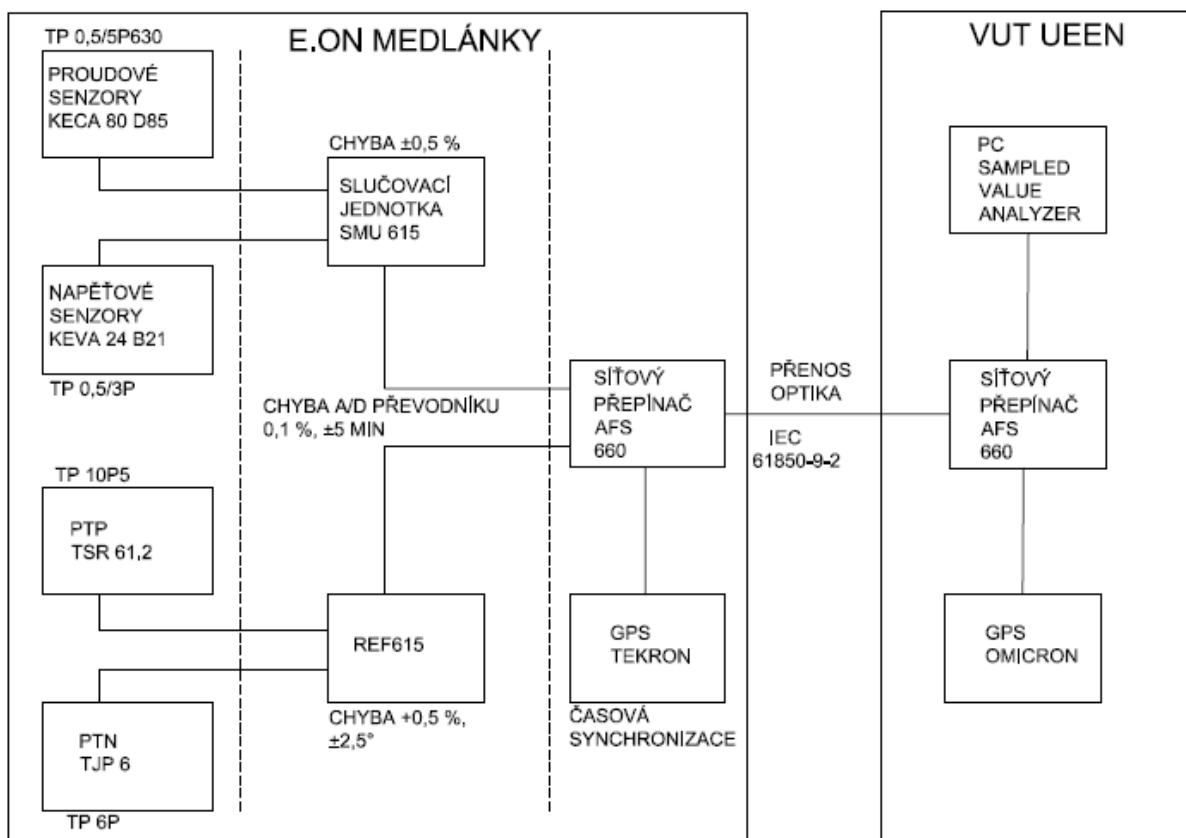
Tab. 11 Technické parametry napěťových senzorů instalovaných v Medláncích

Parametr senzoru	Hodnota
Typ provedení	KEVA 24B21
Primární napětí	22 kV
Sekundární napětí	0,1 kV
Maximální napětí pro zařízení	24 kV
Jmenovité krátkodobé střídavé výdržné napětí	125 kV
Třída přesnosti	0,5/3P
Jmenovitá frekvence	50/60 Hz
Dělicí poměr odporového děliče	1:10 000
Váha	2,52 kg
Izolační třída	E
Ve shodě s normou	IEC 60044-7

5 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část diplomové práce se zabývá zpracováním vzorku dat z převodníků zobrazených výše, které jsou instalovány v rozvodně 22 kV v Medláncích společnosti E.ON. Analýza je provedena z výsledků měřicích jednotek využívaných k měření napětí a proudů v rozvodnách elektrické energie. Cílem je srovnat data získaná z měřicího přístrojového transformátoru proudu s daty ze senzoru proudu respektive data z měřicího transformátoru napětí s daty ze senzoru napětí a vyhodnotit zda naměřené odchylky korespondují s uvedenými třídami přesnosti, kterým musí přístroje vyhovět dle výrobních štítků.

Signál je přenášen z PTP, PTN a elektronických senzorů za běžného provozu pomocí kabelu a adaptéru ke slučovacím jednotkám MUs a k IED (Intelligent Electronic Devices), které zpracovávají a vyhodnocují měřený signál. Adaptéry slouží k úpravě slabého výstupního signálu ze senzorů do takové podoby, aby tento signál mohl být dále využit v jednotkách MU a v IED, ve kterých je signál převeden do digitální podoby na tzv. hodnoty Sampled Values (SV). Ty jsou pomocí Ethernetu přenášeny k dalším zařízením v měřicím a řídicím řetězci. Koncept SV popisuje standart IEC 61850-9-2. Signál je vzorkován 80 krát každou periodu. Důležitá je časová synchronizace dat. Data jsou přenesena a následně přijímána v laboratoři ochran UEEEN v programu Sampled Value Analyzer. Tento program ověří, zda jsou splněny požadavky standardu a pokud ano, tak jsou data dekodována a zobrazena.



Obr. 21 Schéma celého měřicího řetězce s vyznačením tříd přesnosti převodníků a dalších prvků, kde mohou vzniknout chyby měření

Ze schématu na obr. 21 vyplývá, že při porovnání měřicích převodníků musíme počítat se všemi jednotkami, které se nacházejí v celém měřicím řetězci. Případné difference ve srovnávaných datech mohou vzniknout také vlivem chyby digitální ochrany REF 615 (chyba amplitudy až 0,5 %, fázová chyba až $\pm 2,5^\circ$) nebo při zpracování ve slučovacích jednotkách MUs (případná chyba až 0,5 %). Chyba vzniká i při digitalizaci dat v těchto zařízeních. Chyba digitalizací závisí na velikosti procenta jmenovitého proudu I_{pn} (respektive napětí U_{pn}) použitého měřicího převodníku. Při 100 % jmenovitého proudu (napětí) může chyba amplitudy ε_U dosahovat maximálně 0,1 % a chyba fáze $\delta_U \pm 5$ minut. Případné chyby, vzniklé přenosem dat, jsou eliminovány časovou synchronizací. [11]

Tab. 12 Chyby způsobené digitalizací dat z proudových převodníků [13]

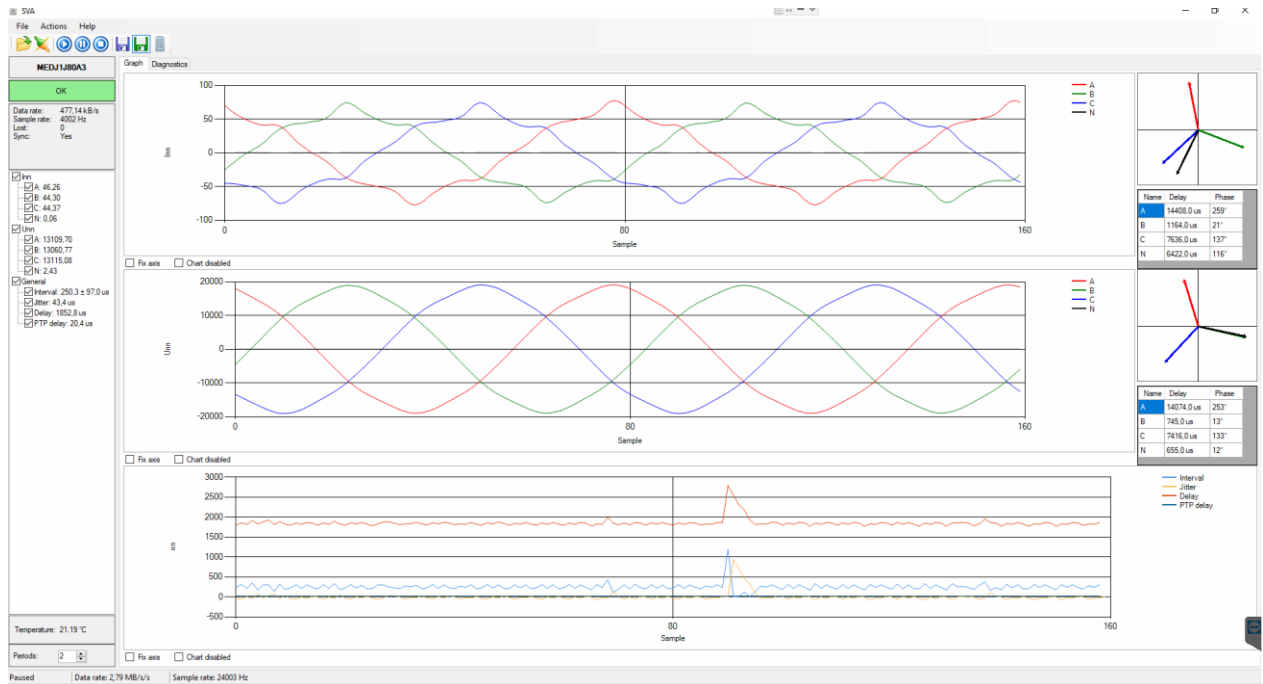
I_{pn} (%)	1	5	20	100	120
ε_U (%)	2	0,4	0,1	0,1	0,1
δ_U (min)	15	8	6	5	5

Tab. 13 Chyby způsobené digitalizací dat z napěťových převodníků [13]

U_{pn} (%)	1	2	5	50	80	100	120	190
ε_U (%)	10	6	3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
δ_U (min)	360	240	120	5	5	5	5	5

5.1 Postup zpracování

Hlavní cílem diplomové práce bylo zpracovat a vyhodnotit naměřená data během 3 měsíčního měření od poloviny ledna do poloviny dubna 2019. Data byla exportována a ukládána průběžně během měření z programu SVA do souborů formátu csv (comma separated values). Náhled do prostředí programu SVA poskytuje následující obrázek. Kromě textového výstupu program umožňuje i vizualizovat průběhy měřených veličin v grafu.



Obr. 22 Prostředí programu SVA

5.1.1 Vzorkovací frekvence

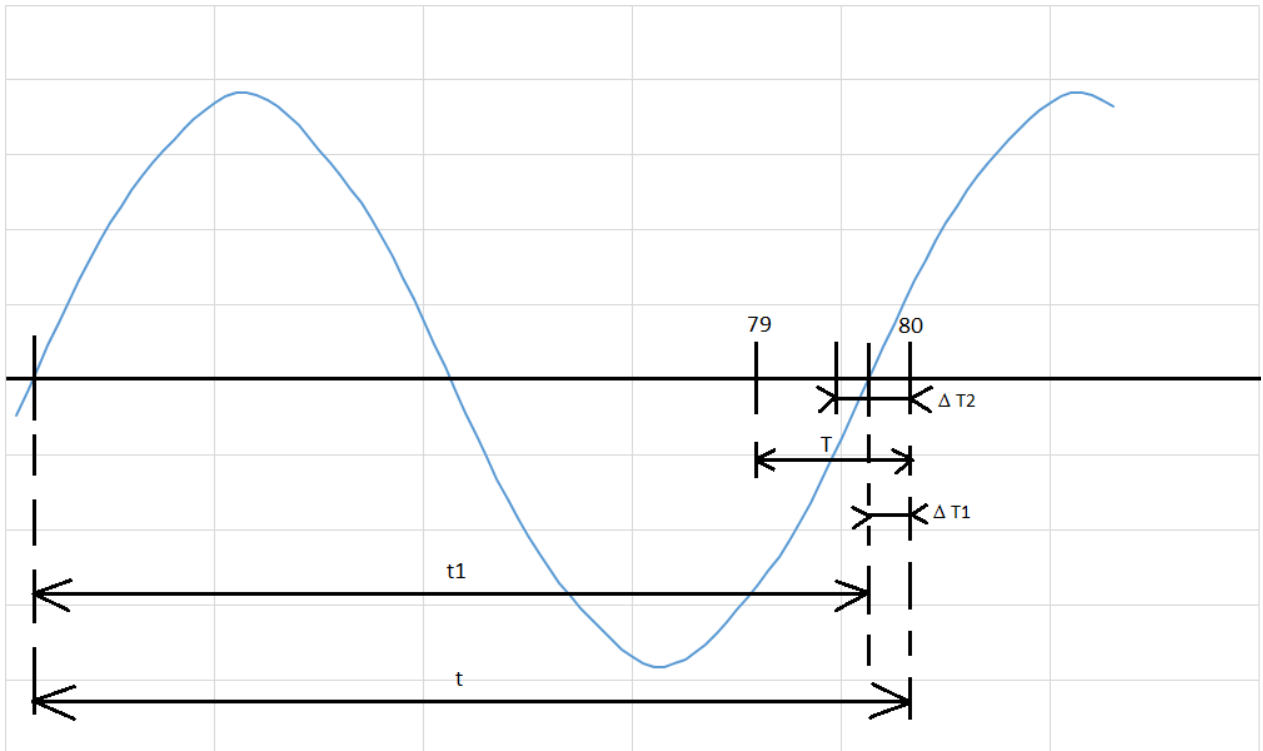
Počet zaznamenaných vzorků byl roven 80 každou periodu, tedy každých 20 ms. Každou jednu sekundu (50 period) jsme dostali $50 \cdot 80 = 4000$ vzorků. Čas mezi jednotlivými vzorky byl roven 250 μs .

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,000250} = 4000 \text{ Hz} = 4 \text{ kHz} \quad (5.1)$$

Vzorkovací frekvence f byla dostačující pro účely měření a vyhodnocení, neboť dle požadavků na kvalitu elektrické energie v síti, v distribučních sítích NN dovolené odchylky kmitočtu mohou být max. 1 % po dobu 99, 5 % roku. To odpovídá minimální povolené frekvenci 49,5 Hz, respektive maximální povolené hodnotě 50,5 Hz. Za normálních provozních podmínek se však daří frekvenci držet v úzkém pásmu mezi 49,9 Hz a 50,1 Hz.

$$t_1 = \frac{1}{f} = \frac{1}{50,1} = 0,01996 \text{ s} = 19,96 \text{ ms} \quad (5.2)$$

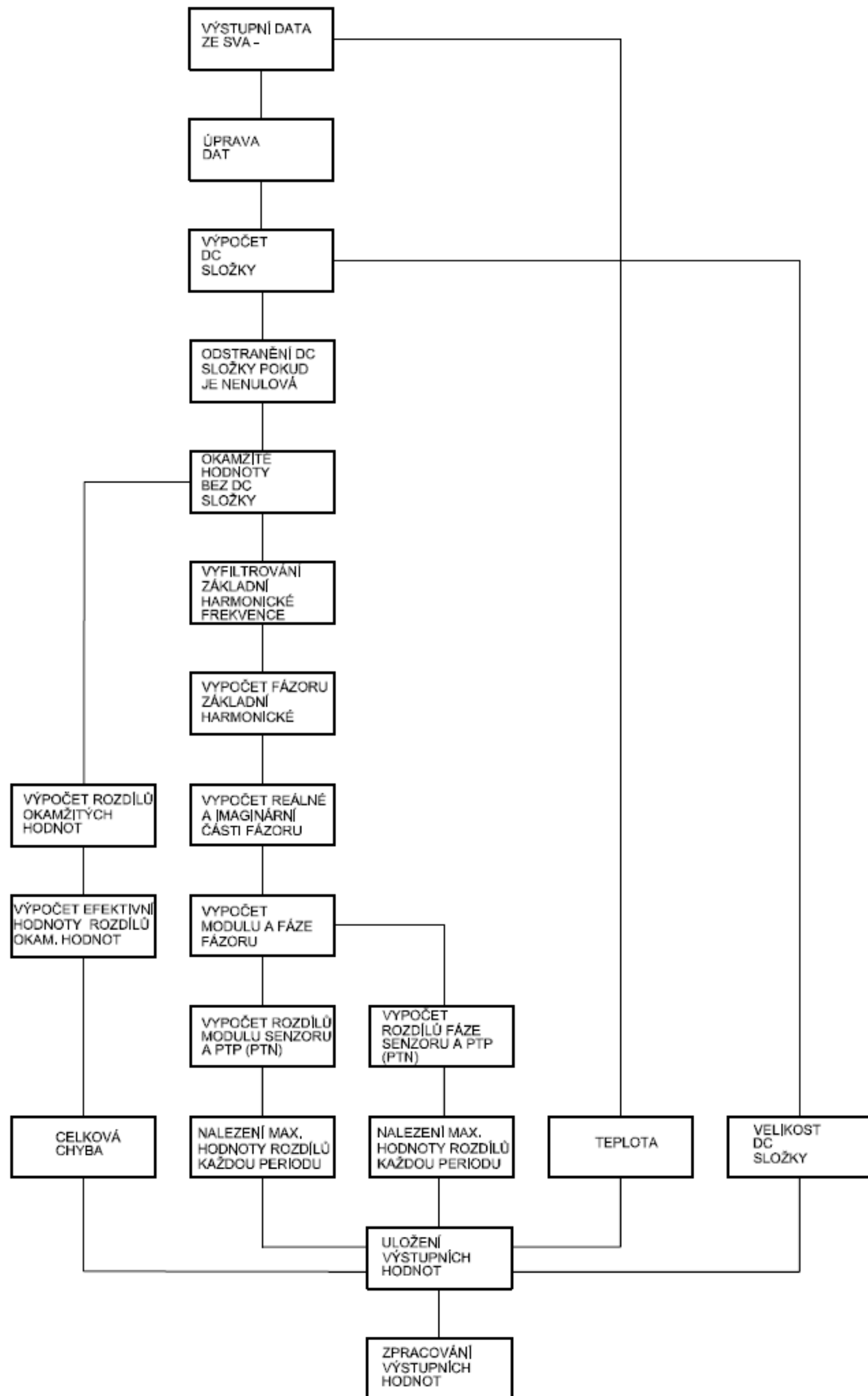
Zvýší-li se frekvence na 50,1 Hz, zkrátí se délka periody z $t = 20$ ms na $t_1 = 19,96$ ms. ΔT_1 na obrázku je rovna 0,04 ms, je tedy menší než ΔT_2 , které odpovídá 125 ms ($250/2$). Tímto je zaručeno, že každá změřená perioda byla vzorkována 80 vzorky, nikoliv 79.



Obr. 23 Ilustrační obrázek – vzorkovací frekvence

To stejné platí v případě snížení frekvence sítě na 49,9 Hz. Perioda se zvýší na $t_2 = 20,04$ ms a bude tak stále obsahovat 80 vzorků, nikoliv 81.

Po exportu dat ze SVA se s daty pracuje dle schématu zpracování na obrázku.



Obr. 24 Schéma zpracování dat

5.1.2 Oprava chybných dat

Nejdříve byla data ze souborů csv přenesena a uložena do matic (Iaa, Ibb ...) ve výpočetním programu Matlab.

```
1 - close all
2 - clear all
3 - clc
4
5 - % načtení dat z csv souborů
6
7 - mydata = cell(1, 1);
8 - mydatas = cell(1, 1);
9
10 - k=1013;
11 -     myfilename = sprintf('00-21-C1-2C-CF-20_01-0C-CD-04-00-03_%04d.csv', k);
12 -     mydata{1}= importdata(myfilename);
13 - U=1013;
14 -     myfilename = sprintf('00-21-C1-27-A4-0A_01-0C-CD-04-00-01_%04d.csv', U);
15 -     mydatas{1}= importdata(myfilename);
16
17 - Iaa=[];
18 - Ibb=[];
19 - Icc=[];
20 - Iaas=[];
21 - Ibbs=[];
22 - Iccs=[];
23
24 - Uaa=[];
25 - Ubb=[];
26 - Ucc=[];
27 - Uaas=[];
28 - Ubbs=[];
29 - Uccs=[];
```

Obr. 25 Načtení výstupních dat a tvorba prázdných matic


```
36     Ics=[];
37
38     Ua=[];
39     Ub=[];
40     Uc=[];
41     Uas=[];
42     Ubs=[];
43     Ucs=[];
44
45
46     T=[];
47
48     for k=1:1
49         Ia=[Ia;mydata{1,k}(1,1).data(1:end,1)];
50         Ib=[Ib;mydata{1,k}(1,1).data(1:end,2)];
51         Ic=[Ic;mydata{1,k}(1,1).data(1:end,3)];
52         Ua=[Ua;mydata{1,k}(1,1).data(1:end,5)];
53         Ub=[Ub;mydata{1,k}(1,1).data(1:end,6)];
54         Uc=[Uc;mydata{1,k}(1,1).data(1:end,7)];
55     end
56
57     for k=1:1
58         Ias=[Ias;mydatas{1,k}(1,1).data(1:end,1)];
59         Ibs=[Ibs;mydatas{1,k}(1,1).data(1:end,2)];
60         Ics=[Ics;mydatas{1,k}(1,1).data(1:end,3)];
61         Uas=[Uas;mydatas{1,k}(1,1).data(1:end,5)];
62         Ubs=[Ubs;mydatas{1,k}(1,1).data(1:end,6)];
63         Ucs=[Ucs;mydatas{1,k}(1,1).data(1:end,7)];
64     end
65
```

Obr. 26 Nahrání hodnot proudů a napětí do matic

Po úvodní orientaci ve velkém množství dat byl zjištěn výskyt chyb při ukládání. Během ukládání dat docházelo k častým výpadkům záznamu. Výpadky v některých situacích způsobovaly časovou desynchronizaci.

5.1.2.1 Časová synchronizace

Při výpadcích záznamu k opětovnému naběhnutí senzoru docházelo v jiný čas než u PTP (PTN). To způsobilo nesoulad mezi daty z různých převodníků v jednotlivých datových souborech. Musel být nalezen způsob, kterým data časově synchronizovat. Ke každému času v matici s údaji z PT (timet) musel být nalezen shodný čas v matici s údaji ze senzoru (times) a podle pozice ve které se nacházel, byl přiřazen odpovídající proud respektive napětí pomocí funkce ismember. Do proměnné Lia1 byla ukládána hodnota 1 anebo 0, dle toho zda se čas z matice timet nacházel či nenacházel i v matici times. Pokud se nacházel (Lia1 bylo rovno 1), tak do proměnné Locb1 byla uložena pozice tohoto času.

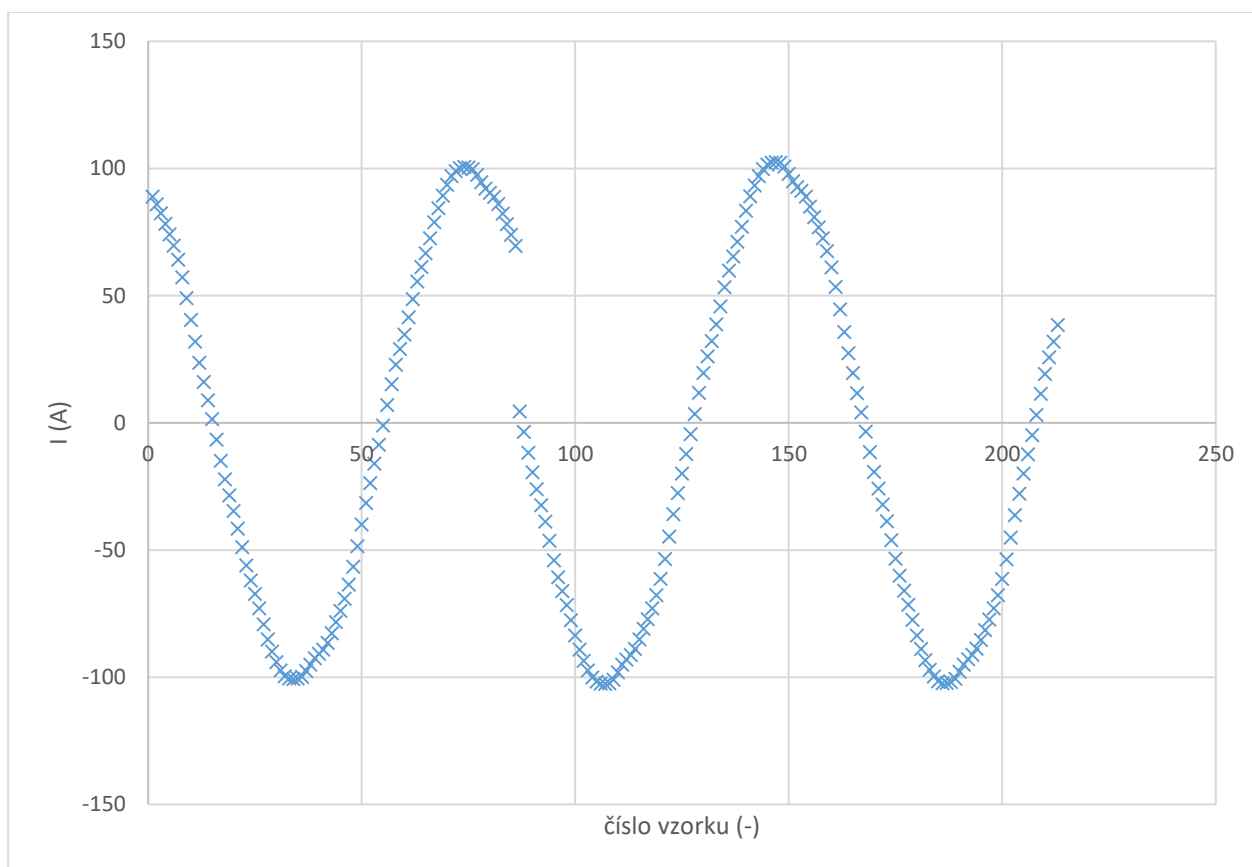
```

129 - timet=[];
130 - times=[];
131
132 - for k=1:l
133 -     timet=[timet;mydata{l,k}.textdata(2:100000,8)];
134 -     times=[times;mydatas{l,k}.textdata(2:100000,8)];
135 - end
136 - [rt,s]=size(timet);
137 - [rs,s]=size(times);
138
139 - rr=[rt,rs];
140 - rr=min(rr);
141 - l1=[];
142 - l2=[];
143 - tt={};
144 - Iaa=[];
145 - count=0;
146
147 - for x=1:rr
148 -     [Lia1,Locb1] = ismember(timet(x,1),times);
149 -     if Lia1==1
150 -         count=count+1;
151 -         tt(count,1)=timet(x,1);
152 -         Iaa(count,1)=Ia(x,1);
153 -         Iaas(count,1)=Ias(Locb1,1);
154 -         Ibb(count,1)=Ib(x,1);
155 -         Ibbs(count,1)=Ibs(Locb1,1);
156 -         ICC(count,1)=Ic(x,1);
157 -         ICCs(count,1)=Ics(Locb1,1);
158
159 -         Uaa(count,1)=Ua(x,1);
160 -         Uaas(count,1)=Uas(Locb1,1);
161 -         Ubb(count,1)=Ub(x,1);
162 -         Ubbs(count,1)=Ubs(Locb1,1);
163 -         Ucc(count,1)=Uc(x,1);
164 -         Uccs(count,1)=Ucs(Locb1,1);
165 -     end
166 -     l1(x)=Lia1;
167 -     l2(x)=Locb1;
168 - end

```

Obr. 27 Nahrání času do matic a přiřazení proudů a napětí dle času (s – senzor)

Časovou synchronizaci ovšem nebyl problém zcela vyřešen. Pouze jsme dosáhli toho, že v tento moment už jednoduše můžeme vypočítat difference v periodách mezi jednotlivými přerušeními záznamu. Ve všech periodách, ve kterých nedošlo k výpadku záznamu. To znamená, že velkou většinu sledovaného období už lze považovat za korektní. Problém ovšem nastává v periodách, ve kterých k výpadku dat dochází (viz. obr. 28). V těchto periodách v následujících výpočtech jsou chyby. Při výpočtu velikosti fázorů se totiž vychází ze vzorků z předcházející periody. Chyba je také zanesena do výpočtu stejnosměrné složky, při kterém se získává průměrná hodnota z 80 vzorků každou periodu. Z tohoto důvodu k vyhodnocení byly použity soubory dat, ve kterých se přerušení záznamu vyskytuje minimálně anebo vůbec. Takových souborů bohužel bylo velice málo. Vyskytovaly se zejména na začátku měření, čím déle měření probíhalo, tím více byla data vůči sobě rozhozena a přerušování záznamu bylo častější. Nakonec bylo k rozboru dat vybráno pouhých 128 minut. 70 minut z ledna, 20 minut z února, 20 minut z března a 18 minut z dubna. Vybrané soubory dat k analýze obsahovaly každých 10 minut 0 až 5 chyb záznamu. Soubory s nejhoršími daty obsahovaly každých 10 minut tisíce až desetitisíce chyb. Navíc funkce pro časovou synchronizaci v programu Matlab, kdy je potřeba každý zaznamenaný čas v jedné matici najít v druhé matici s obrovským množstvím dat, je velice pomalá. To jsou důvody, proč je k rozboru využito tak krátkého časového úseku z celkového 3 – měsíčního měření.



Obr. 28 Ukázka vynechání záznamu dat

5.1.3 Stejnoseměrná složka

Poté co byla provedena potřebná opatření k tomu, abychom získali synchronizovaná data bez chyb se pokračovalo v dalším postupu dle schématu zpracování dat.

Vypočítala se střední hodnota pro každou změřenou periodu (pomocí funkce mean), aby se následně určilo, zda se v průbězích vyskytuje či nevyskytuje stejnosměrná složka.

Stejnoseměrná (DC – Direct Current) složka je definována dle následujícího vzorce.

$$I_{dc}(I_0) = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t) dt \quad (5.3)$$

```

185     %výpočet DC složky
186     g=0;
187     for rr=1:80:(rad-80)
188         for ss=1:s1
189             g=g+1;
190             Iaadc(g,ss)=mean(Iaa(rr:rr+79,ss));
191             Iaasdc(g,ss)=mean(Iaas(rr:rr+79,ss));
192             Ibbdc(g,ss)=mean(Ibb(rr:rr+79,ss));
193             Ibbsdc(g,ss)=mean(Ibbs(rr:rr+79,ss));
194             Iccdc(g,ss)=mean(Icc(rr:rr+79,ss));
195             Iccsdc(g,ss)=mean(Iccs(rr:rr+79,ss));
196
197             Uaadc(g,ss)=mean(Uaa(rr:rr+79,ss));
198             Uaasdc(g,ss)=mean(Uaas(rr:rr+79,ss));
199             Ubbdc(g,ss)=mean(Ubb(rr:rr+79,ss));
200             Ubbsdc(g,ss)=mean(Ubbs(rr:rr+79,ss));
201             Uccdc(g,ss)=mean(Ucc(rr:rr+79,ss));
202             Uccsdc(g,ss)=mean(Uccs(rr:rr+79,ss));
203         end
204     end
205     %odstranění DC složky |
206     gg=0;
207     for rr=1:80:(rad-80)
208         for ss=1:s1
209             gg=gg+1;
210             IaabezDC(rr:rr+79,ss)=Iaa(rr:rr+79,ss)-Iaadc(gg,ss);
211             IaasbezDC(rr:rr+79,ss)=Iaas(rr:rr+79,ss)-Iaasdc(gg,ss);
212             IbbbezDC(rr:rr+79,ss)=Ibb(rr:rr+79,ss)-Ibbdc(gg,ss);
213             IbbsbezDC(rr:rr+79,ss)=Ibbs(rr:rr+79,ss)-Ibbsdc(gg,ss);
214             IccbezDC(rr:rr+79,ss)=Icc(rr:rr+79,ss)-Iccdc(gg,ss);
215             IccsbezDC(rr:rr+79,ss)=Iccs(rr:rr+79,ss)-Iccsdc(gg,ss);
216
217             UaabezDC(rr:rr+79,ss)=Uaa(rr:rr+79,ss)-Uaadc(gg,ss);
218             UaasbezDC(rr:rr+79,ss)=Uaas(rr:rr+79,ss)-Uaasdc(gg,ss);
219             UbbbezDC(rr:rr+79,ss)=Ubb(rr:rr+79,ss)-Ubbdc(gg,ss);
220             UbbsbezDC(rr:rr+79,ss)=Ubbs(rr:rr+79,ss)-Ubbsdc(gg,ss);
221             UccbezDC(rr:rr+79,ss)=Ucc(rr:rr+79,ss)-Uccdc(gg,ss);
222             UccsbezDC(rr:rr+79,ss)=Uccs(rr:rr+79,ss)-Uccsdc(gg,ss);
223         end
224     end

```

Obr. 29 Výpočet a odstranění stejnosměrné složky

Byla – li DC složka nenulová, došlo k jejímu odstranění. Od každé naměřené okamžité hodnoty se odečetla a zaznamenala se její velikost.

$$I_{AADC} = \frac{\sum_{n=1}^{80} i(t)}{80} = \frac{-51,032 + (-56,654) + \dots + (-44,217)}{80} = -0,628 \text{ A} \quad (5.4)$$

Velikost stejnosměrné složky (I_{aadc} , I_{bbdc} ...) se vztáhla k efektivní hodnotě naměřených vzorků z PTP (PTN) a získal se její poměr.

```

287     % velikost DC složky v poměru k efektivní hodnotě
288
289 -   for rr=1:pomocna(1,1)
290 -       Iadcpomer(rr)=(100/IaabezDCrms(rr))*abs(Iaadc(rr));
291 -       Iasdcpomer(rr)=(100/IaasbezDCrms(rr))*abs(Iaasdc(rr));
292 -       Ibdcpomer(rr)=(100/IbbbezDCrms(rr))*abs(Ibbdc(rr));
293 -       Ibsdcpomer(rr)=(100/IbbsbezDCrms(rr))*abs(Ibbsdc(rr));
294 -       Icdcpomer(rr)=(100/IcbezDCrms(rr))*abs(Iccdc(rr));
295 -       Icsdcpomer(rr)=(100/IccsbezDCrms(rr))*abs(Iccsdc(rr));
296
297 -       Uadcpomer(rr)=(100/UaabezDCrms(rr))*abs(Uaadc(rr));
298 -       Uasdcpomer(rr)=(100/UaasbezDCrms(rr))*abs(Uaasdc(rr));
299 -       Ubdcpomer(rr)=(100/UbbbezDCrms(rr))*abs(Ubbdc(rr));
300 -       Ubsdcpomer(rr)=(100/UbbsbezDCrms(rr))*abs(Ubbsdc(rr));
301 -       Ucdcpomer(rr)=(100/UcbezDCrms(rr))*abs(Uccdc(rr));
302 -       Ucsdcpomer(rr)=(100/UccsbezDCrms(rr))*abs(Uccsdc(rr));
303 -   end

```

Obr. 30 Převedení stejnosměrné složky do procentuálního vyjádření

$$I_{ADCpomer} = \frac{|I_{AADC}|}{I_{aabezDCrms}} \cdot 100 = \frac{0,628}{66,650} \cdot 100 = 0,942 \% \quad (5.5)$$

5.1.4 Celková chyba

Z okamžitých hodnot bez DC složky byla určena velikost celkové chyby ε_c (Iarozdilrms...). Jedná se o efektivní hodnotu z rozdílu okamžitých hodnot mezi jednotlivými převodníky.

```
231     %výpočet celkové chyby
232     %1 rozdíl okamžitých hodnot
233 -   for rr=1:rad2-1
234 -   for ss=1:s1
235 -       Iarozdil(rr,ss)=IaabezDC(rr,ss)-IaasbezDC(rr,ss);
236 -       Ibrozdil(rr,ss)=IbbbezDC(rr,ss)-IbbsbezDC(rr,ss);
237 -       Icrozdil(rr,ss)=IccbezDC(rr,ss)-IccsbezDC(rr,ss);
238
239 -       Uarozdil(rr,ss)=UaabezDC(rr,ss)-UaasbezDC(rr,ss);
240 -       Ubrozdil(rr,ss)=UbbbezDC(rr,ss)-UbbsbezDC(rr,ss);
241 -       Ucrozdil(rr,ss)=UccbezDC(rr,ss)-UccsbezDC(rr,ss);
242 -   end
243 - end
244     %2 celková chyba - efektivní hodnota rozdílů okamžitých hodnot mezi senzorem a PTP(PTN)
245 -   for rr=2:pomocna(1,1)
246 -       Iarozdilrms(rr)=rms(Iarozdil(80*(rr-1)+1:80*rr));
247 -       Ibrozdilrms(rr)=rms(Ibrozdil(80*(rr-1)+1:80*rr));
248 -       Icrozdilrms(rr)=rms(Icrozdil(80*(rr-1)+1:80*rr));
249
250 -       Uarozdilrms(rr)=rms(Uarozdil(80*(rr-1)+1:80*rr));
251 -       Ubrozdilrms(rr)=rms(Ubrozdil(80*(rr-1)+1:80*rr));
252 -       Ucrozdilrms(rr)=rms(Ucrozdil(80*(rr-1)+1:80*rr));
253 -   end
```

Obr. 31 Výpočet celkové chyby

Z důvodu proměnlivého odběru bylo vhodnější vztáhnout celkovou chybu k efektivní hodnotě okamžitých hodnot naměřených PTP (PTN) a vyjádřit ji v procentech.


```
254     %3 efektivní hodnota okamžitých hodnot senzoru a PTP (PTN)
255 -   for rr=2:pomocna(1,1)
256 -       IaabezDCrms(rr)=rms(IaabezDC(80*(rr-1)+1:80*rr));
257 -       IaasbezDCrms(rr)=rms(IaasbezDC(80*(rr-1)+1:80*rr));
258 -       IbbbezDCrms(rr)=rms(IbbbezDC(80*(rr-1)+1:80*rr));
259 -       IbbsbezDCrms(rr)=rms(IbbsbezDC(80*(rr-1)+1:80*rr));
260 -       IccbezDCrms(rr)=rms(IccbezDC(80*(rr-1)+1:80*rr));
261 -       IccsbezDCrms(rr)=rms(IccsbezDC(80*(rr-1)+1:80*rr));
262
263 -       UaabezDCrms(rr)=rms(UaabezDC(80*(rr-1)+1:80*rr));
264 -       UaasbezDCrms(rr)=rms(UaasbezDC(80*(rr-1)+1:80*rr));
265 -       UbbbezDCrms(rr)=rms(UbbbezDC(80*(rr-1)+1:80*rr));
266 -       UbbsbezDCrms(rr)=rms(UbbsbezDC(80*(rr-1)+1:80*rr));
267 -       UccbezDCrms(rr)=rms(UccbezDC(80*(rr-1)+1:80*rr));
268 -       UccsbezDCrms(rr)=rms(UccsbezDC(80*(rr-1)+1:80*rr));
269 -   end
270     %4 celková chyba vztažena k efektivní hodnotě okamžitých hodnot PTP (PTN)
271 -   for rr=1:pomocna(1,1)
272 -       Iacelkovachyba(rr)=(100/IaabezDCrms(rr))*Iarozdilrms(rr);
273 -       Ibcelkovachyba(rr)=(100/IbbbezDCrms(rr))*Ibrozdilrms(rr);
274 -       Iccelkovachyba(rr)=(100/IccbezDCrms(rr))*Icrozdilrms(rr);
275
276 -       Uacelkovachyba(rr)=(100/UaabezDCrms(rr))*Uarozdilrms(rr);
277 -       Ubcelkovachyba(rr)=(100/UbbbezDCrms(rr))*Ubrozdilrms(rr);
278 -       Uccelkovachyba(rr)=(100/UccbezDCrms(rr))*Ucrozdilrms(rr);
279 -   end
```

Obr. 32 Celková chyba v procentuálním vyjádření

Před samotným výpočtem efektivních hodnot proudů, napětí a jejich úhlů bylo potřeba získat z naměřených průběhů pouze základní harmonickou složku (viz. další kapitola 5.1.5).

5.1.5 Potlačení vyšších harmonických

Abychom mohli posoudit, zda třídy přesnosti uvedené v předcházejících kapitolách v teoretickém úvodu korespondují se změřenými odchylkami jednotlivých převodníků, bylo zpočátku nutné provést Fourierovu transformaci (FFT) z okamžitých hodnot fázových proudů a napětí.

```

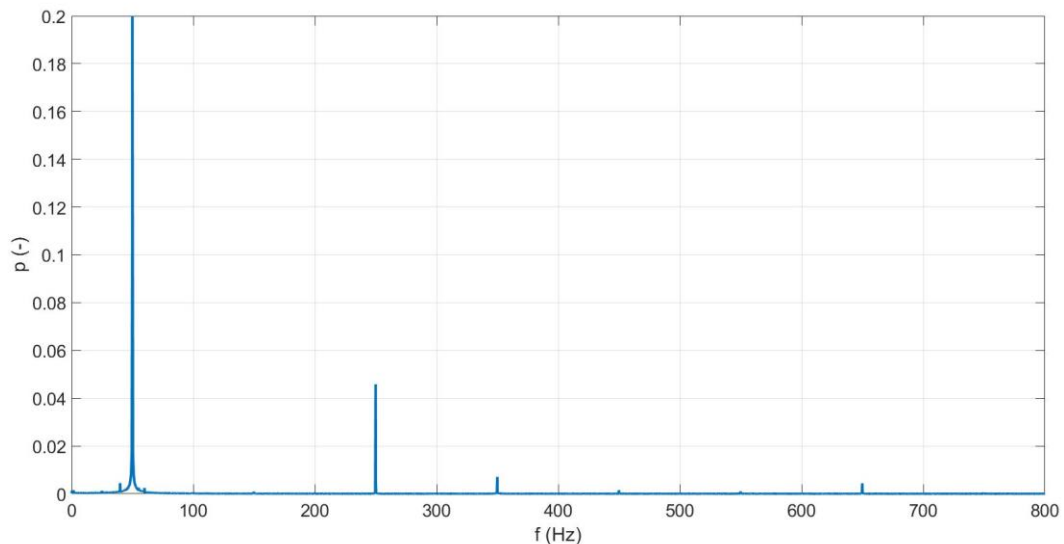
306     % fourierova transformace fft |
307
308 -   Xa = fft(IaabezDC);
309 -   Fs=4000 ;    % počet vzorků za sekundu
310 -   L=rad(1,1)-1 ;    % velikost matice IaabezDC
311 -   P1=abs(Xa/L);
312 -   P2=P1(1:L/2+1);
313 -   fff=Fs*(0:(L/2))/L;
314
315 -   figure(21)
316 -   plot(fff,P2)
317 -   grid on
318 -   figure(22)
319 -   plot(fff,P2/44.5)
320 -   grid on;
321 -   xlabel('f (Hz)');
322 -   ylabel('p (-)');

```

Obr. 33 Fourierova transformace proudu z PTP

Výsledkem transformace bylo následující spektrum, na kterém lze vidět, že obsahuje nejenom složku základní frekvence 50 Hz, ale i její násobky tzv. harmonické.

Nejvýraznějšími jsou 5., 7. a 13. harmonická.



Obr. 34 Spektrum původního neharmonického signálu proudu

Fourierovou transformací jsme tedy rozložili průběh proudu (napětí) na stejnosměrnou složku a na řadu harmonických průběhů, které jsou specifické svoji velikostí, fází a frekvencí. Frekvence jsou celistvým násobkem základní síťové frekvence 50 Hz. [14]

$$i(t) = i_{DC} + \sum_{h=1}^H i_h(t) = I_{DC} + \sum_{h=1}^H I_{h,m} \cdot \sin(h\omega_1 t + \varphi_{th}), \quad (5.6)$$

kde	$i(t)$	okamžitá velikost neharmonického proudu (A),
	I_{DC}	velikost stejnosměrné složky proudu (A),
	$I_{h,m}$	amplituda harmonické řádu h (A),
	h	řád harmonické (-),
	H	celkový počet harmonických,
	t	čas (s),
	φ_{th}	počáteční fáze h-té harmonické složky proudu (rad),
	ω_1	úhlový kmitočet základní harmonické (rad·s ⁻¹).

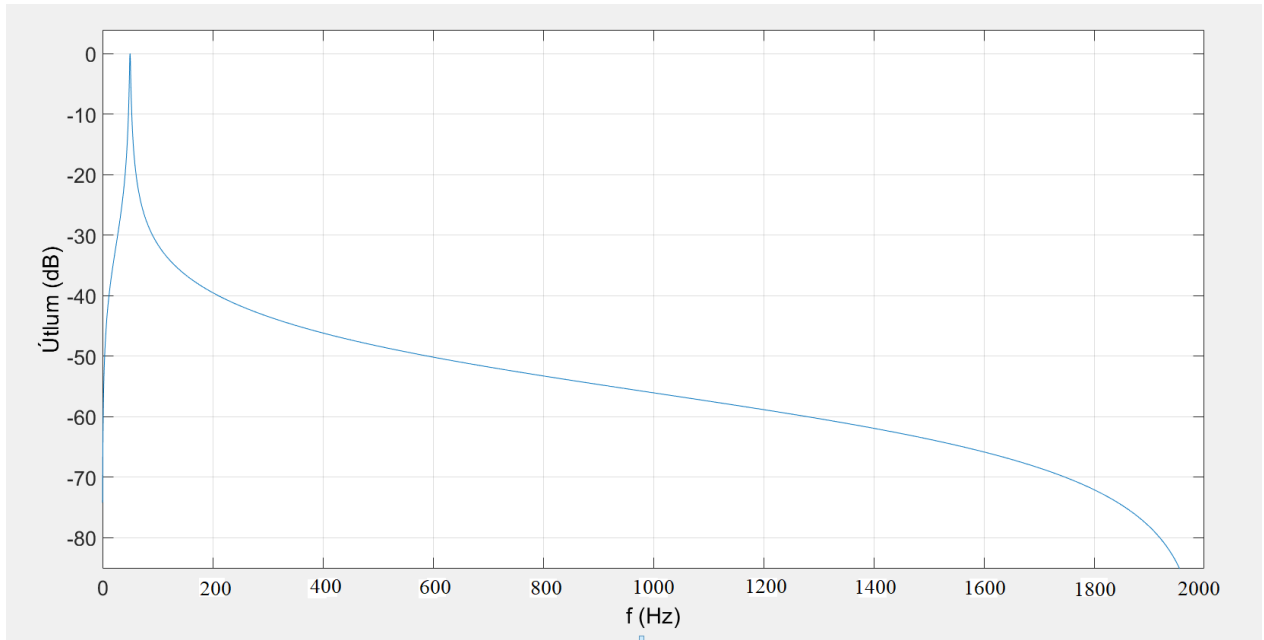
Abychom mohli posoudit, zda vyhovují třídy přesnosti převodníků, bylo potřeba vyšší harmonické potlačit. To bylo provedeno skrz filtr `iirpeak`, který propustí pouze frekvenci 50 Hz.

```

324 % filtr |
325
326 - fs = 4000; wo = 50/(fs/2); bw = 2/(fs/2);
327 - [bb,aa] = iirpeak(wo,bw);
328 - fvtool(bb,aa);
329
330 - Ia50hz=filter(bb,aa,IaabezDC);
331 - Ias50hz=filter(bb,aa,IaasbezDC);
332 - Ib50hz=filter(bb,aa,IbbbezDC);
333 - Ibs50hz=filter(bb,aa,IbbsbezDC);
334 - Ic50hz=filter(bb,aa,IccbezDC);
335 - Ics50hz=filter(bb,aa,IccsbezDC);
336
337 - Ua50hz=filter(bb,aa,UaabezDC);
338 - Uas50hz=filter(bb,aa,UaasbezDC);
339 - Ub50hz=filter(bb,aa,UbbbezDC);
340 - Ubs50hz=filter(bb,aa,UbbsbezDC);
341 - Uc50hz=filter(bb,aa,UccbezDC);
342 - Ucs50hz=filter(bb,aa,UccsbezDC);
343
344 - figure(30)
345 - plot(IaabezDC(1700:1860));
346 - grid on;
347 - hold on;
348 - plot(Ia50hz(1700:1860));
349 - xlabel('počet vzorků (-)');
350 - ylabel('I (A)');
351 - legend('Ial', 'Ial_1h');

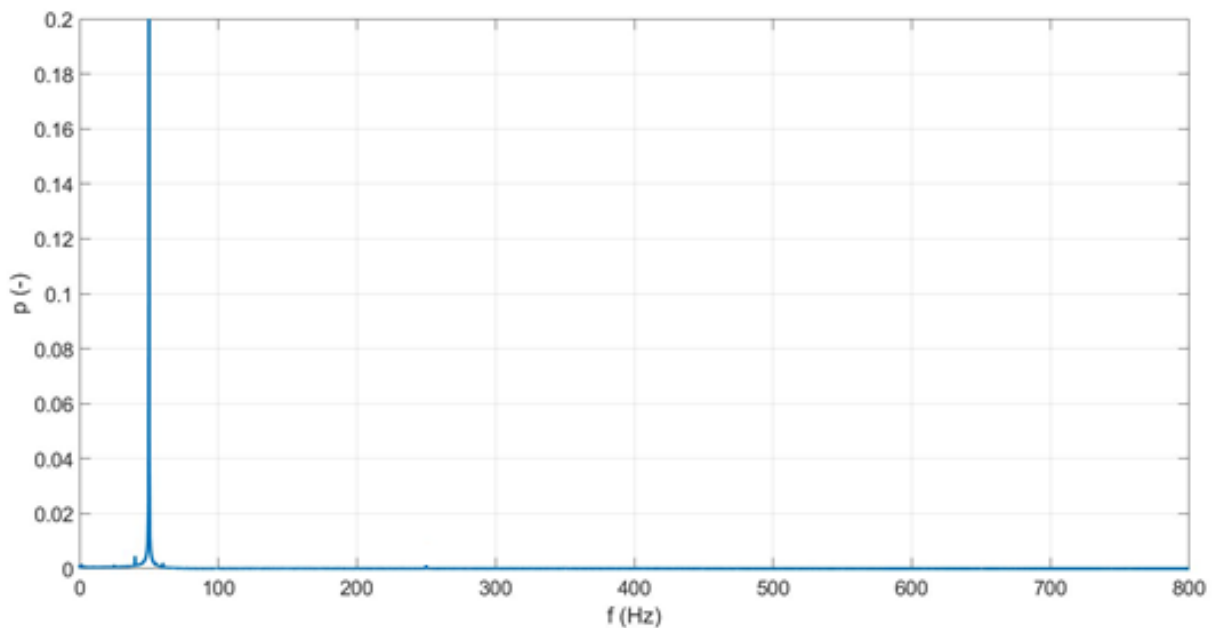
```

Obr. 35 Aplikace filtru `iirpeak`



Obr. 36 Vyfiltrování vyšších harmonických složek

Výsledné spektrum se změnilo do následující podoby.



Obr. 37 Spektrum signálu proudu po aplikaci filtru

Dosáhli jsme výpočtu první základní harmonické proudu, respektive napětí (označené jako I_{a1_1h} (U_{a1_1h}) v tab. 14 až 17). Vyfiltrovali jsme vyšší harmonické (celistvé násobky základní síťové frekvence). Výsledná hodnota poklesla zhruba o $\Delta I = 2$ A, respektive o necelých $\Delta U = 400$ V. Hodnoty v prvních řádcích tabulky jsou efektivní hodnoty původního neharmonického průběhu.

Tab. 14 Efektivní hodnoty proudů před a po aplikaci filtru

PTP	I_{a1} (A)	66,650	66,264	66,337	66,560	66,744	66,802
	I_{a1_1h} (A)	64,617	64,240	64,305	64,509	64,686	64,745
	ΔI (A)	2,033	2,024	2,032	2,051	2,058	2,057
senzor	I_{as1} (A)	66,460	66,083	66,210	66,415	66,597	66,636
	I_{as1_1h} (A)	64,442	64,058	64,186	64,373	64,540	64,594
	ΔI (A)	2,018	2,025	2,024	2,042	2,057	2,042

Tab. 15 Efektivní hodnoty proudů před a po aplikaci filtru

PTP	I_{a1} (A)	66,325	66,608	66,271	65,940	66,222	66,195
	I_{a1_1h} (A)	64,283	64,554	64,220	63,894	64,168	64,145
	ΔI (A)	2,042	2,055	2,050	2,046	2,054	2,050
senzor	I_{a1} (A)	66,175	66,432	66,099	65,814	66,044	66,033
	I_{as1_1h} (A)	64,130	64,384	64,051	63,771	64,001	63,978
	ΔI (A)	2,044	2,048	2,048	2,042	2,043	2,055

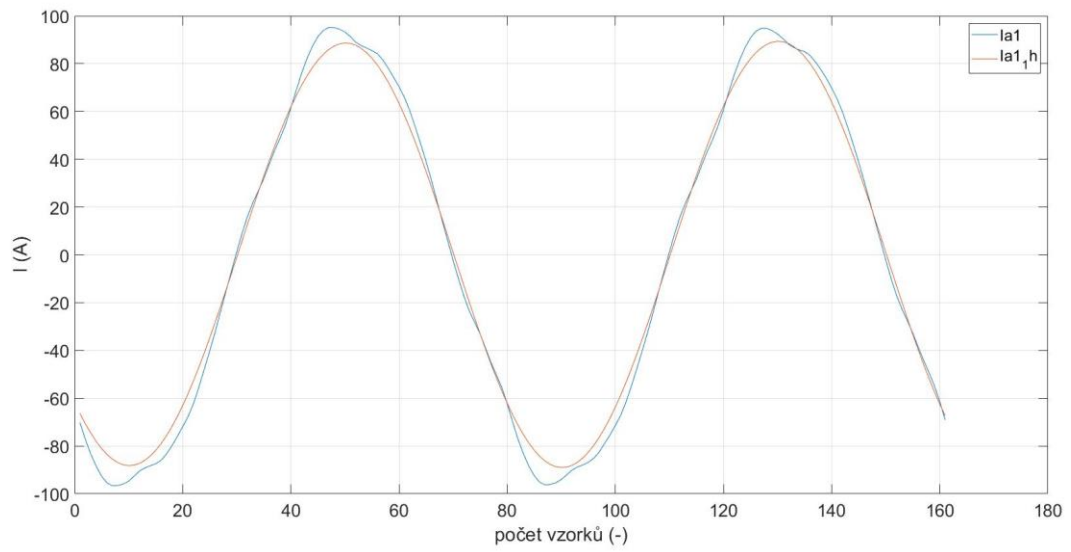
Tab. 16 Hodnoty napětí před a po aplikaci filtru

PTN	U_{a1} (V)	13361,7	13356,9	13359,9	13353,9	13351,5	13351,5
	U_{a1_1h} (V)	12964,6	12960,4	12962,5	12956,6	12954,3	12954,4
	ΔU (V)	397,1	396,6	397,4	397,3	397,2	397,1
senzor	U_{as1} (V)	13194,1	13189,2	13192,1	13185,5	13183,7	13183,2
	U_{as1_1h} (V)	12802,1	12797,5	12799,7	12793,3	12791,4	12791,2
	ΔU (V)	392,0	391,7	392,4	392,2	392,2	392,1

Tab. 17 Hodnoty napětí před a po aplikaci filtru

PTN	U_a (V)	13357,3	13363,7	13365,8	13360,5	13362,0	13372,2
	U_{a_1h} (V)	12959,6	12965,2	12967,2	12961,4	12962,8	12973,0
	ΔU (V)	397,6	398,4	398,6	399,1	399,2	399,3
senzor	U_{as} (V)	13188,7	13195,1	13197,7	13192,7	13193,5	13203,8
	U_{as_1h} (V)	12795,9	12801,8	12804,1	12798,8	12799,4	12809,3
	ΔU (V)	392,8	393,3	393,6	394,0	394,0	394,4

Na následujícím obrázku lze vidět „vyhlazení“ sinusovky po aplikaci filtru. Modrá křivka I_{a1} označuje průběh původního neharmonického signálu proudu ve fázi a, oranžová křivka I_{a1_1h} znázorňuje výsledný průběh proudu po vyfiltrování vyšších harmonických.

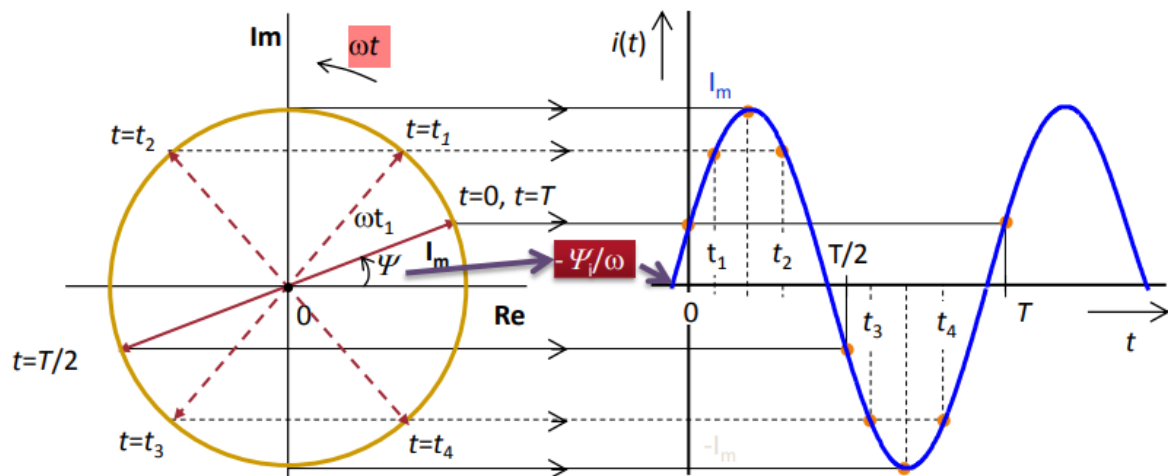


Obr. 38 Změna průběhu proudu vlivem filtru

5.1.6 Výpočet fázorů

Po získání základní harmonické jednotlivých průběhů změřených veličin nastává teprve samotný výpočet efektivních (maximálních) hodnot a fáze. Postup byl jiný, než byl zvolen na malém vzorku dat v semestrálním projektu, kde efektivní hodnota byla spočtena přímo z okamžitých hodnot. Zde jsme se k efektivní hodnotě proudů a napětí dopracovali přes velikosti fázorů. Porovnáním argumentů fázorů v polárním tvaru jsme také získali fázový posun mezi naměřenými průběhy ze senzorů a z PTP (PTN).

Fázor je vektor, který dostaneme zobrazením harmonického průběhu do Gaussovy komplexní roviny. Má svoji velikost, ta je rovna amplitudě vlny (na obr. I_m) a fázi φ (na obr. ψ), ta je rovna odchylce od rovnovážné polohy. Mluvíme-li o čase $t = 0$, jedná se tzv. počáteční fázi. Okamžitá hodnota veličiny v komplexní rovině je dána průmětem do svislé osy.



Obr. 39 Přenesení časového harmonického průběhu do Gaussovy komplexní roviny [15]

Algoritmus aplikovaný pro výpočet fázorů proudů (napětí) využívá Fourierovy transformace. Ta nám říká, že každou spojitou funkci lze rozložit do Fourierovy řady dle následujícího vzorce

$$i(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin(n\omega_0 t). \quad (5.7)$$

Při znalosti funkce $i(t)$ platí pro Fourierovy koeficienty a_n a b_n následující

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) \cdot \cos(n\omega_0 t) \cdot dt, \quad (5.8)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) \cdot \sin(n\omega_0 t) \cdot dt. \quad (5.9)$$

Pokud je funkce $i(t)$ diskretizována v základní periodě K vzorky lze pak získat reálnou a imaginární část fázoru proudu k – tého vzorku dle následujících rovnic (druhá část rovnic popisuje následné označení v programu Matlab)

$$I_{Re}(k) = \frac{2}{K} \cdot \sum_{m=0}^{K-1} i_a \cdot (k - m) \cdot \cos \frac{2\pi m}{K} = \frac{2}{K} \cdot \sum_{m=0}^{K-1} M(m) = \frac{2}{K} \cdot \text{suma}(a), \quad (5.10)$$

$$I_{Im}(k) = \frac{2}{K} \cdot \sum_{m=0}^{K-1} i_a \cdot (k - m) \cdot \sin \frac{2\pi m}{K} = \frac{2}{K} \cdot \sum_{m=0}^{K-1} M(m) = \frac{2}{K} \cdot \text{suma}(a). \quad (5.11)$$

Při výpočtu fázoru k – tého vzorku v předcházejících rovnicích se vychází z předešlé periody. [16]

Amplitudu a fázi fázorů dostaneme převodem ze složkového do polárního tvaru

$$I(k) = \sqrt{I_{Re}^2(k) + I_{Im}^2(k)}, \quad (5.12)$$

$$\varphi(k) = \arctan \left(\frac{I_{Im}(k)}{I_{Re}(k)} \right). \quad (5.13)$$

Příklad výpočtu pro vzorek k = 80:

$$\begin{aligned} I_{Re}(80) &= \frac{2}{80} \cdot ((-87,091) \cdot (80 - 0)) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot 0}{80}\right) + & (5.14) \\ &\frac{2}{80} \cdot ((-85,983) \cdot (80 - 1)) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot 1}{80}\right) + \dots + \\ &\frac{2}{80} \cdot ((-84,431) \cdot (80 - 79)) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot 79}{80}\right) = 55,103 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{im}(80) &= \frac{2}{80} \cdot ((-87,091) \cdot (80 - 0)) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot 0}{80}\right) + & (5.15) \\ &\frac{2}{80} \cdot ((-85,983) \cdot (80 - 1)) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot 1}{80}\right) + \dots + \\ &\frac{2}{80} \cdot ((-84,431) \cdot (80 - 79)) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot 79}{80}\right) = 77,482 \text{ A} \end{aligned}$$

$$I_a = \sqrt{I_{Re}^2 + I_{im}^2} = \sqrt{55,103^2 + 77,482^2} = 95,078 \text{ A} \quad (5.16)$$

$$I_{a,ef} = \frac{I_a}{\sqrt{2}} = \frac{95,078}{\sqrt{2}} = 67,230 \text{ A} \quad (5.17)$$

Uvedený postup výpočtu zapsaný v programu Matlab (pro PTP a PTN):

```
354 % výpočet fázorů (PTP,PTN)
355 % výpočet Iare a Uare
356 - for k=81:rad2(1,1)-1
357 -     sumaa=0;
358 -     sumab=0;
359 -     sumac=0;
360
361 -     sumaaU=0;
362 -     sumabU=0;
363 -     sumacU=0;
364
365 -     for m=1:80
366 -         M(m)=Ia50hz(k-m)*cos((2*pi()*m)/80);
367 -         sumaa=sumaa+M(m);
368 -         M(m)=Ib50hz(k-m)*cos((2*pi()*m)/80);
369 -         sumab=sumab+M(m);
370 -         M(m)=Ic50hz(k-m)*cos((2*pi()*m)/80);
371 -         sumac=sumac+M(m);
372
373 -         M(m)=Ua50hz(k-m)*cos((2*pi()*m)/80);
374 -         sumaaU=sumaaU+M(m);
375 -         M(m)=Ub50hz(k-m)*cos((2*pi()*m)/80);
376 -         sumabU=sumabU+M(m);
377 -         M(m)=Uc50hz(k-m)*cos((2*pi()*m)/80);
378 -         sumacU=sumacU+M(m);
379 -     end
380 -     Iare(k)=sumaa*2/80;
381 -     Ibre(k)=sumab*2/80;
382 -     Icre(k)=sumac*2/80;
383
384 -     Uare(k)=sumaaU*2/80;
385 -     Ubre(k)=sumabU*2/80;
386 -     Ucre(k)=sumacU*2/80;
387 - end
```

Obr. 40 Výpočet reálné části fázorů napětí a proudů


```
389 % výpočet Iaim a Uaim
390
391 - for k=81:rad2(1,1)-1
392 -     sumaa=0;
393 -     sumab=0;
394 -     sumac=0;
395
396 -     sumaaU=0;
397 -     sumabU=0;
398 -     sumacU=0;
399 -     for m=1:80
400 -         M(m)=Ia50hz(k-m)*sin((2*pi()*m)/80);
401 -         sumaa=sumaa+M(m);
402 -         M(m)=Ib50hz(k-m)*sin((2*pi()*m)/80);
403 -         sumab=sumab+M(m);
404 -         M(m)=Ic50hz(k-m)*sin((2*pi()*m)/80);
405 -         sumac=sumac+M(m);
406
407 -         M(m)=Ua50hz(k-m)*sin((2*pi()*m)/80);
408 -         sumaaU=sumaaU+M(m);
409 -         M(m)=Ub50hz(k-m)*sin((2*pi()*m)/80);
410 -         sumabU=sumabU+M(m);
411 -         M(m)=Uc50hz(k-m)*sin((2*pi()*m)/80);
412 -         sumacU=sumacU+M(m);
413 -     end
414 -     Iaim(k)=sumaa*2/80;
415 -     Ibim(k)=sumab*2/80;
416 -     Icim(k)=sumac*2/80;
417
418 -     Uaim(k)=sumaaU*2/80;
419 -     Ubim(k)=sumabU*2/80;
420 -     Ucim(k)=sumacU*2/80;
421
422 - end
```

Obr. 41 Výpočet imaginární části fázorů napětí a proudů

Převedení komplexního čísla ze složkového do polárního tvaru.

```
494 % výpočet modulu a fáze fázoru PTP (PTN)
495 - for k=1:rad2(1,1)-1
496 -     Iafazor(k)=sqrt(power(Iare(k),2)+power(Iaim(k),2));
497 -     Ibfazor(k)=sqrt(power(Ibre(k),2)+power(Ibim(k),2));
498 -     Icfazor(k)=sqrt(power(Icre(k),2)+power(Icim(k),2));
499
500 -     Uafazor(k)=sqrt(power(Uare(k),2)+power(Uaim(k),2));
501 -     Ubfazor(k)=sqrt(power(Ubre(k),2)+power(Ubim(k),2));
502 -     Ucfazor(k)=sqrt(power(Ucre(k),2)+power(Ucim(k),2));
503
504 - end
505
506 - for k=1:rad2(1,1)-1
507 -     Iafaze(k)=angle(Iare(k)+Iaim(k)*j)*180/pi();
508 -     Ibfaze(k)=angle(Ibre(k)+Ibim(k)*j)*180/pi();
509 -     Icfaze(k)=angle(Icre(k)+Icim(k)*j)*180/pi();
510
511 -     Uafaze(k)=angle(Uare(k)+Uaim(k)*j)*180/pi();
512 -     Ubfaze(k)=angle(Ubre(k)+Ubim(k)*j)*180/pi();
513 -     Ucfaze(k)=angle(Ucre(k)+Ucim(k)*j)*180/pi();
514 - end
```

Obr. 42 Převedení fázorů do polárního tvaru

5.1.7 Výpočet diferencí mezi senzory a PTP (PTN)

Nyní známe velikosti modulů a argumentů fázorů každého k – tého naměřeného vzorku a můžeme tedy spočítat diferenci mezi hodnotami ze senzorů a z PTP (PTN). Rozdíl modulů ΔU byl vyjádřen v procentech z modulu fázoru z přístrojových transformátorů kvůli proměnlivému zatížení vývodů, na kterých jsou instalovány převodníky.

```

538     % rozdíl modulů fázorů
539 -   for k=1:rad2(1,1)-1
540 -       deltafazorIa(k)=abs(Iafazor(k)-Iasfazor(k));
541 -       deltafazorIb(k)=abs(Ibfazor(k)-Ibsfazor(k));
542 -       deltafazorIc(k)=abs(Icfazor(k)-Icsfazor(k));
543
544 -       deltafazorUa(k)=abs(Uafazor(k)-Uasfazor(k));
545 -       deltafazorUb(k)=abs(Ubfazor(k)-Ubsfazor(k));
546 -       deltafazorUc(k)=abs(Ucfazor(k)-Ucsfazor(k));
547 -   end
548     % rozdíl modulů fázorů vztažen k modulu fázoru z PTP(PTN)
549 -   for k=81:rad2(1,1)-1
550 -       deltafazorIa(k)=(deltafazorIa(k)/Iafazor(k))*100;
551 -       deltafazorIb(k)=(deltafazorIb(k)/Ibfazor(k))*100;
552 -       deltafazorIc(k)=(deltafazorIc(k)/Icfazor(k))*100;
553
554 -       deltafazorUa(k)=(deltafazorUa(k)/Uafazor(k))*100;
555 -       deltafazorUb(k)=(deltafazorUb(k)/Ubfazor(k))*100;
556 -       deltafazorUc(k)=(deltafazorUc(k)/Ucfazor(k))*100;
557 -   end
558     % rozdíl fází fázorů
559 -   for k=1:rad2(1,1)-1
560 -       deltafazeIa(k)=abs(Iasfaze(k))-abs(Iafaze(k));
561 -       deltafazeIa(k)=abs(deltafazeIa(k));
562 -       deltafazeIb(k)=abs(Ibsfaze(k))-abs(Ibfaze(k));
563 -       deltafazeIb(k)=abs(deltafazeIb(k));
564 -       deltafazeIc(k)=abs(Icsfaze(k))-abs(Icfaze(k));
565 -       deltafazeIc(k)=abs(deltafazeIc(k));
566
567 -       deltafazeUa(k)=abs(Uasfaze(k))-abs(Uafaze(k));
568 -       deltafazeUa(k)=abs(deltafazeUa(k));
569 -       deltafazeUb(k)=abs(Ubsfaze(k))-abs(Ubfaze(k));
570 -       deltafazeUb(k)=abs(deltafazeUb(k));
571 -       deltafazeUc(k)=abs(Ucsfaze(k))-abs(Ucfaze(k));
572 -       deltafazeUc(k)=abs(deltafazeUc(k));
573 -   end

```

Obr. 43 Výpočet rozdílů fázorů

Výpočet rozdílů fází (deltafazeI(U)) nebyl jednoduchý. Fáze fázorů byla vypočtena pomocí funkce angle. Výsledkem byly hodnoty od -180° do $+180^\circ$. Tyto hodnoty byly od sebe odečteny a získali jsme jejich rozdíl. Problém však nastával v oblasti kolem 0° a v oblasti kolem 180° . Zde nestačilo pouze jednoduché vzájemné odečtení hodnot od sebe. Ale musela zde být provedena následující úprava:

Například byla-li fáze k – tého vzorku naměřená senzorem $I_{asfaze} = -178^\circ$ a zároveň fáze naměřená PTP $I_{afaze} = +179^\circ$. Postup byl následovný.

$$\text{deltafazeI}_a = |180 + I_{asfaze} + 180 - I_{afaze}| = \quad (5.18)$$

$$|180 + (-178) + 180 - (+179)| = |2 + 1| = 3^\circ$$

Nestačilo provést pouhé odečtení hodnot od sebe, výsledek by byl chybný (viz. následující rovnice).

$$\left| |I_{asfaze}| - |I_{afaze}| \right| = \left| |-178| - |179| \right| = |-1| = 1^\circ \quad (5.19)$$

Zde je uveden zápis v programu Matlab – pro proud ve fázi A.

```

576     % doladění výpočtu rozdílů fází fázorů
577     % deltafazeIa
578 -   for k=1:rad2(1,1)-11
579 -       if ((Iasfaze(k)<0) && Iafaze(k)>0 && Iafaze(k)>-50 && Iafaze(k)<50)
580 -           deltafazeIa(k)=abs(0+Iasfaze(k)+0-Iafaze(k));
581 -       end
582
583 -       if ((Iasfaze(k)>0) && (Iafaze(k)<0) && Iafaze(k)>-50 && Iafaze(k)<50)
584 -           deltafazeIa(k)=abs(0-Iasfaze(k)+0+Iafaze(k));
585 -       end
586 -   end
587
588 -   for k=1:rad2(1,1)-11
589 -       if ((Iasfaze(k)<0) && Iafaze(k)>0 && Iafaze(k)>160)
590 -           deltafazeIa(k)=abs(180+Iasfaze(k)+180-Iafaze(k));
591 -       end
592
593 -       if ((Iasfaze(k)>0) && (Iafaze(k)<0) && Iafaze(k)<-160)
594 -           deltafazeIa(k)=abs(180-Iasfaze(k)+180+Iafaze(k));
595 -       end
596 -   end

```

Obr. 44 Výpočet rozdílů fázorů

Dosavadním postupem jsme získali hodnoty, které nám už přímo vyjadřují naměřené rozdíly mezi jednotlivými převodníky, a už jsme mohli posoudit, jaké jsou výsledky vzhledem k povoleným odchylkám danými třídami přesnosti. Pro lepší přehlednost a snadnější zpracování byly však vypočteny maximální (m) a průměrné (p) dosažené hodnoty každou periodu, každých 80 vzorků. Zde na obrázku pro rozdíly modulů fázorů, stejný postup byl použit i pro rozdíly fází.

```
749 % nalezení maximálního rozdílu modulů fázorů každou periodu
750 - g=0;
751 - for rr=1:80:(rad2-1-80)
752 -     g=g+1;
753 -     mdeltafazorIa(g)=max(deltafazorIa(rr:rr+80));
754 -     mdeltafazorIb(g)=max(deltafazorIb(rr:rr+80));
755 -     mdeltafazorIc(g)=max(deltafazorIc(rr:rr+80));
756 -
757 -     mdeltafazorUa(g)=max(deltafazorUa(rr:rr+80));
758 -     mdeltafazorUb(g)=max(deltafazorUb(rr:rr+80));
759 -     mdeltafazorUc(g)=max(deltafazorUc(rr:rr+80));
760 - end
761
762 % nalezení průměrného rozdílu modulů fázorů každou periodu
763 - g=0;
764 - for rr=1:80:(rad2-1-80)
765 -     g=g+1;
766 -     pdeltafazorIa(g)=mean(deltafazorIa(rr:rr+80));
767 -     pdeltafazorIb(g)=mean(deltafazorIb(rr:rr+80));
768 -     pdeltafazorIc(g)=mean(deltafazorIc(rr:rr+80));
769 -
770 -     pdeltafazorUa(g)=mean(deltafazorUa(rr:rr+80));
771 -     pdeltafazorUb(g)=mean(deltafazorUb(rr:rr+80));
772 -     pdeltafazorUc(g)=mean(deltafazorUc(rr:rr+80));
773 - end
```

Obr. 45 Nalezení maximálních rozdílů fázorů

5.2 Vyhodnocení dat

Teprve v tento moment po vypočtení maximálních a průměrných odchylek jsme se mohli začít věnovat hlavní podstatě analýzy dat a tím je grafické zobrazení a vyhodnocení výsledků. Nejprve byly vyhodnoceny naměřené hodnoty proudů, poté následují napětí.

5.2.1 Velikost fázorů

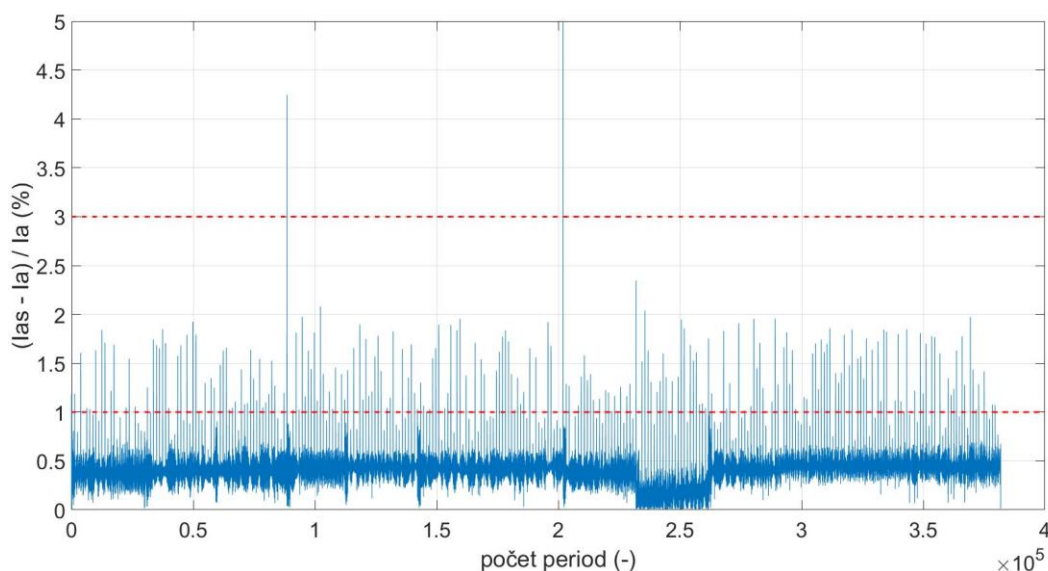
Následující grafy zobrazují odchylky modulů fázorů z PTP (PTN v případě napětí) a ze senzorů.

5.2.1.1 Proudů

Je zde zobrazeno 6 grafů, pro každou fázi 2. První graf vyjadřuje hodnoty vztažené vzhledem ke třídám přesnosti. Jistící jádro transformátoru TSR 61.2 patří do třídy přesnosti 10 P, což značí, že jeho maximální chyba převodu by neměla přesáhnout hranici $\pm 3\%$. Proudový senzor KECA 80 D85 s třídou přesnosti 0,5/5P630 může měřit nepřesně max. $\pm 1\%$. Tyto hranice jsou znázorněny přerušovanými červenými křivkami. Na ose y je pro každou změřenou periodu vynesena maximální rozdílnost modulů fázorů proudu ze senzoru I_{as} a modulů fázorů proudu I_a z PTP vztažen právě k tomuto proudu I_a (v programu Matlab popsáno jako mdeltafazorIa). Osa x vyjadřuje, o kolikátou periodu se jedná. V grafu máme možnost pozorovat, kolikrát a v jaké periodě byly překročeny třídy přesnosti převodníků.

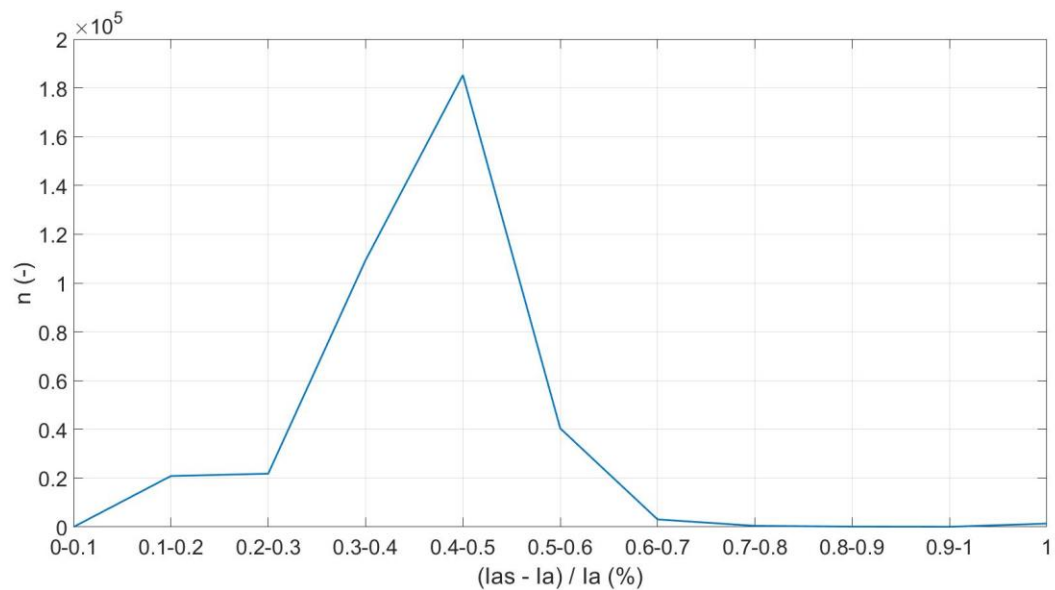
Největší diference byly zaznamenány v časech 23.1.2019 8:58:41.162 a 31.1.2019 22:53:00.064.

Fáze A



Obr. 46 Diference v modulech fázorů proudů – fáze A

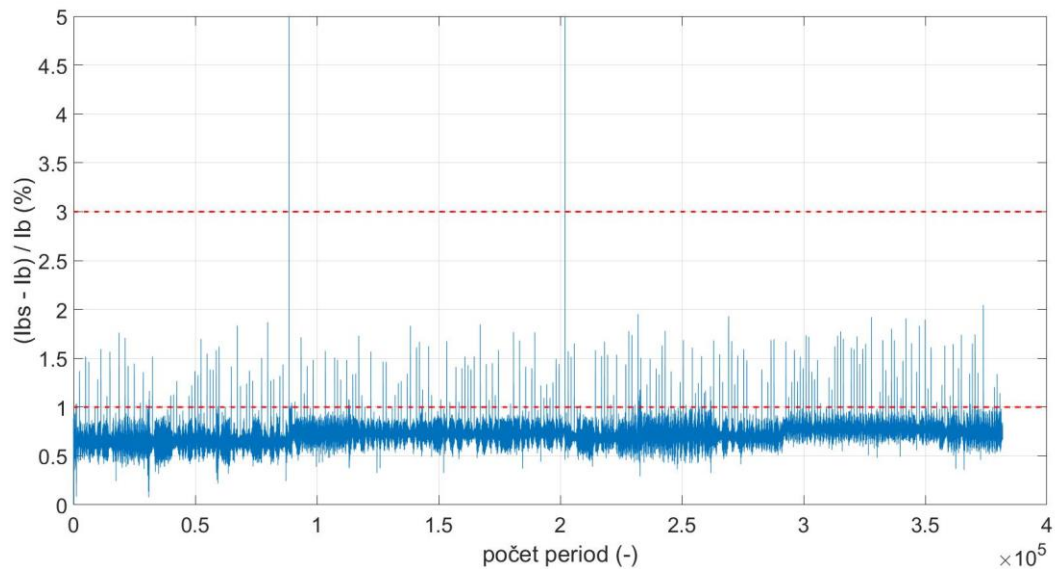
Druhý graf představuje histogram, který přesněji znázorňuje v kterém rozmezí a jak často (n – počet) se daná odchylka změřených hodnot objevuje. Průměrná odchylka za sledované období ve fázi A je 0,4051 %, což představuje 0,38 A.



Obr. 47 Diference v modulech fázorů proudů – histogram – fáze A

Stejným způsobem byly zpracovány ostatní dvě fáze.

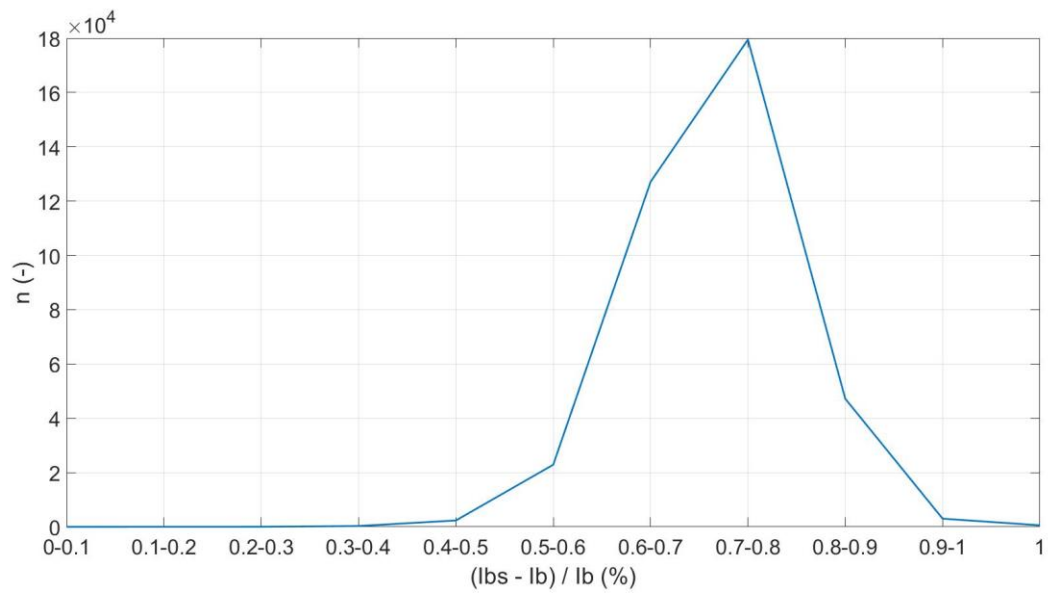
Fáze B



Obr. 48 Diference v modulech fázorů proudů – fáze B

Histogram

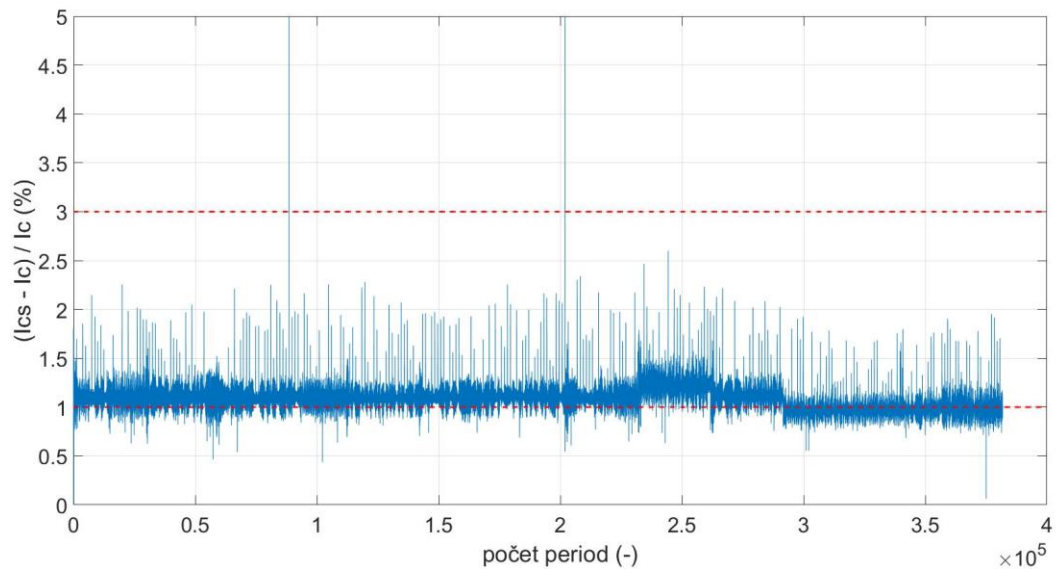
Ve fázi B se nejčastěji difference pohybovala v rozmezí mezi 0,7 – 0,8 %.



Obr. 49 Diference v modulech fázorů proudů – histogram – fáze B

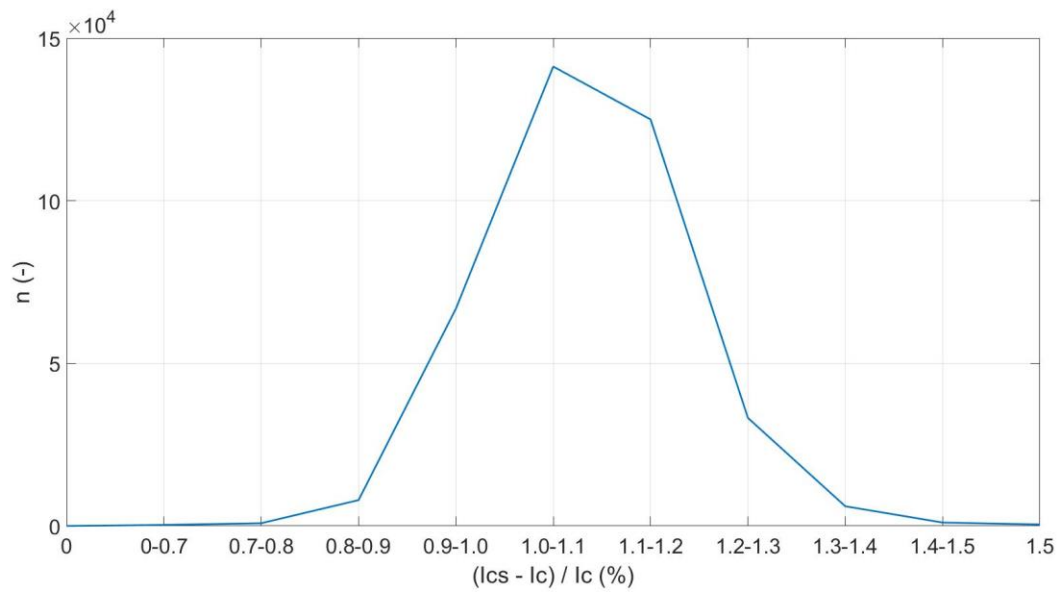
Fáze C

Ve fázi C byly zaznamenány největší odchylky. Přes 1 %.



Obr. 50 Diference v modulech fázorů proudů – fáze C

Histogram



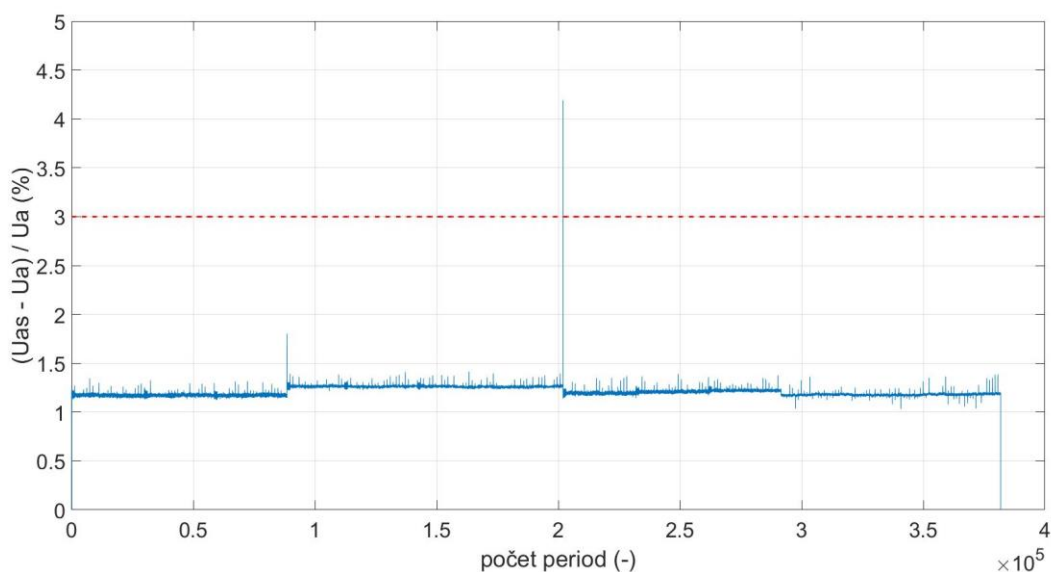
Obr. 51 - Diference v modulech fázorů proudů – histogram – fáze C

5.2.1.2 Napětí

Po vyhodnocení naměřených diferencí modulů fázorů proudů následují výsledky diferencí modulů fázorů napětí. Pohybují se v užším pásmu, než tomu bylo u proudů. Je to v rozmezí zhruba 0,1 % až 0,2 % z efektivní hodnoty napětí naměřeném pomocí PTN. Diference jsou podstatně menší než maximální přípustné chyby dané třídami přesnosti. Instalované senzory v rozvodně se mohou mýlit až o 3 % efektivní hodnoty napětí (červená přerušovaná křivka), přístrojové transformátory napětí dokonce až o 6 % efektivní hodnoty napětí.

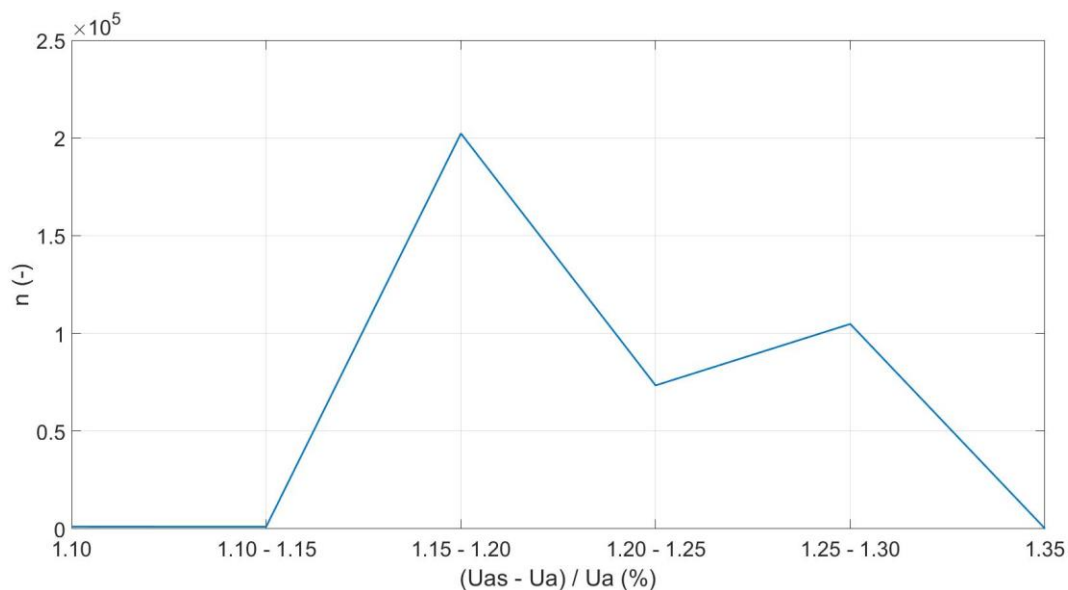
Fáze A

Ve fázi A byla odchylka nejvíce mezi 1,15 % – 1,20 %, to představuje 210 V – 220 V.

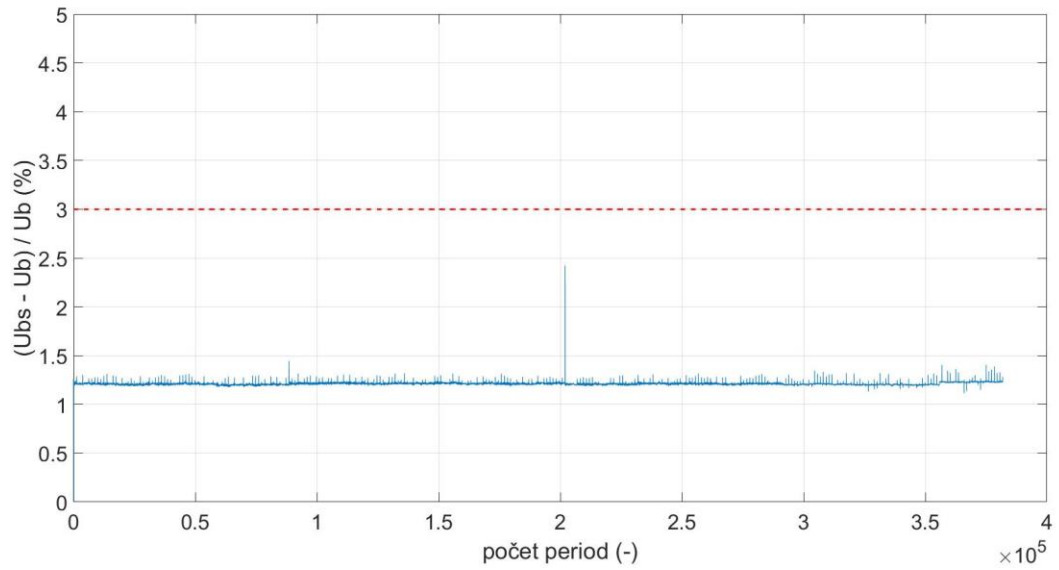
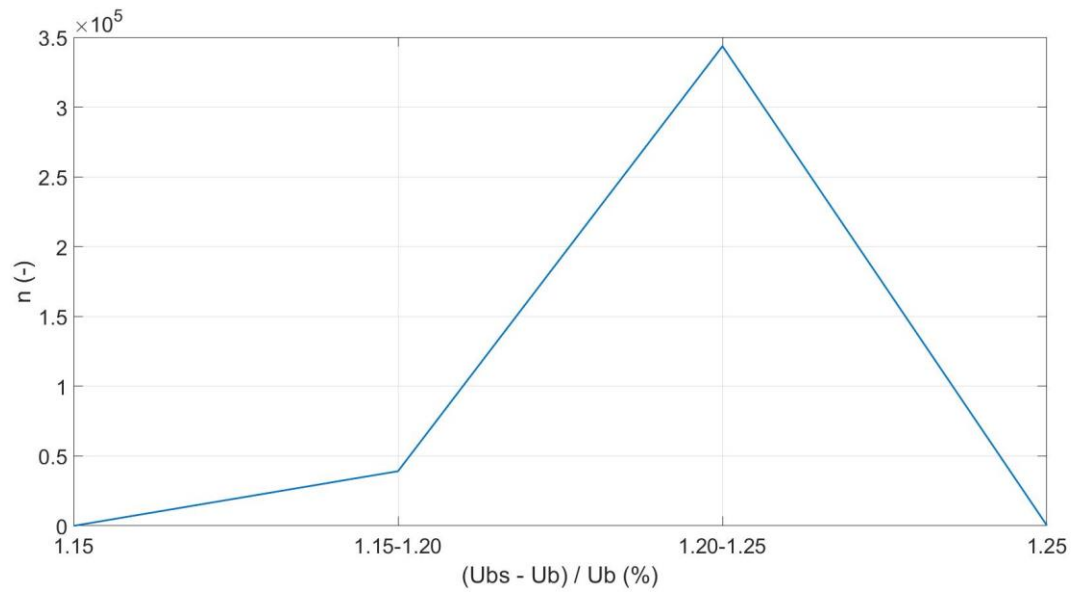


Obr. 52 Diference v modulech fázorů napětí – fáze A

Histogram

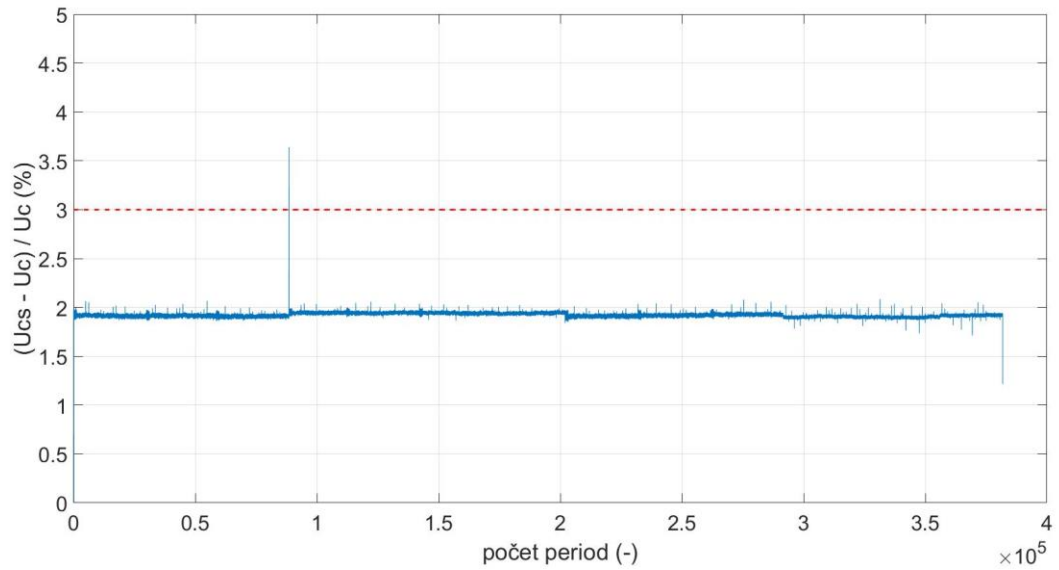


Obr. 53 Diference v modulech fázorů napětí – histogram – fáze A

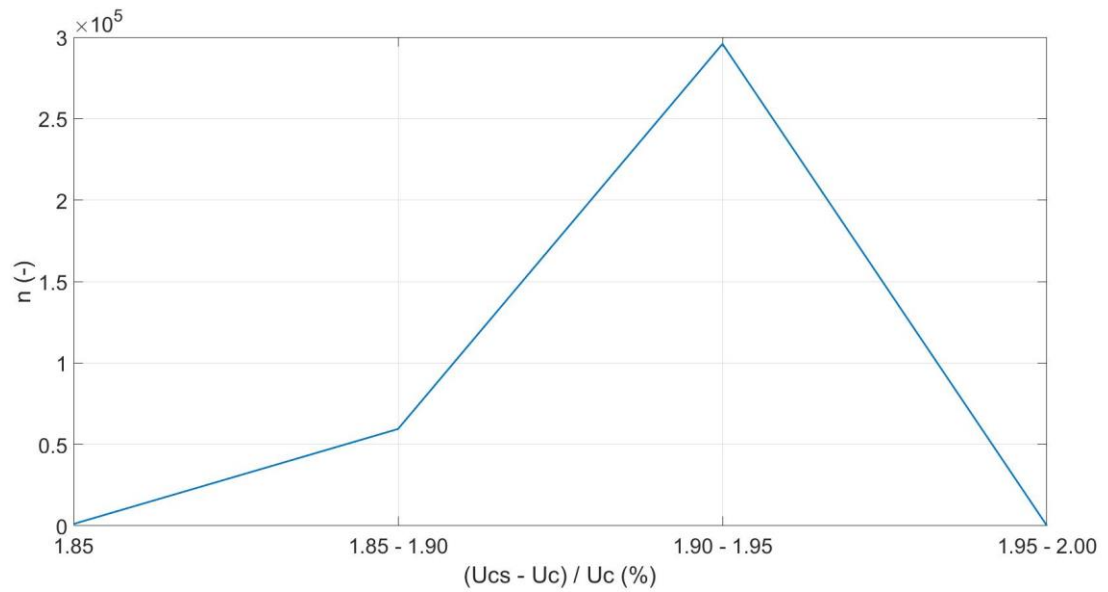
Fáze B*Obr. 54 Diference v modulech fázorů napětí – fáze B***Histogram***Obr. 55 Diference v modulech fázorů napětí – histogram – fáze B*

Fáze C

Obdobně jako u modulů proudů i zde byly největší odchylky ve fázi C.



Obr. 56 Diference v modulech fázorů napětí – fáze C

Histogram

Obr. 57 Diference v modulech fázorů napětí – histogram – fáze C

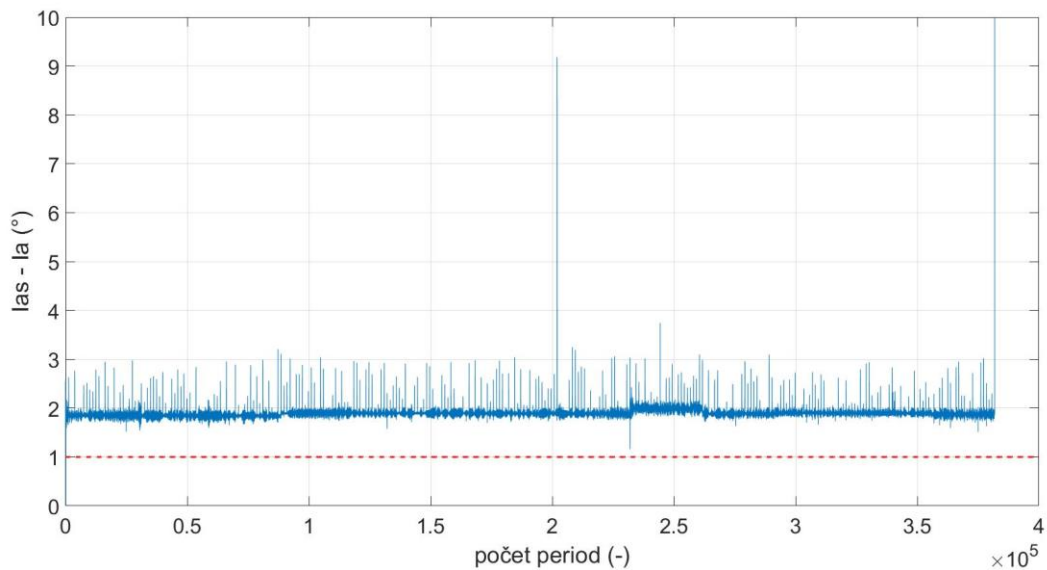
5.2.2 Fáze fázorů

Po výpočtu fázorů jednotlivých naměřených vzorků a jejich převedení ze složkového do polárního tvaru jsme kromě velikosti modulů fázorů získali k porovnání také úhly fázorů.

5.2.2.1 Proudý

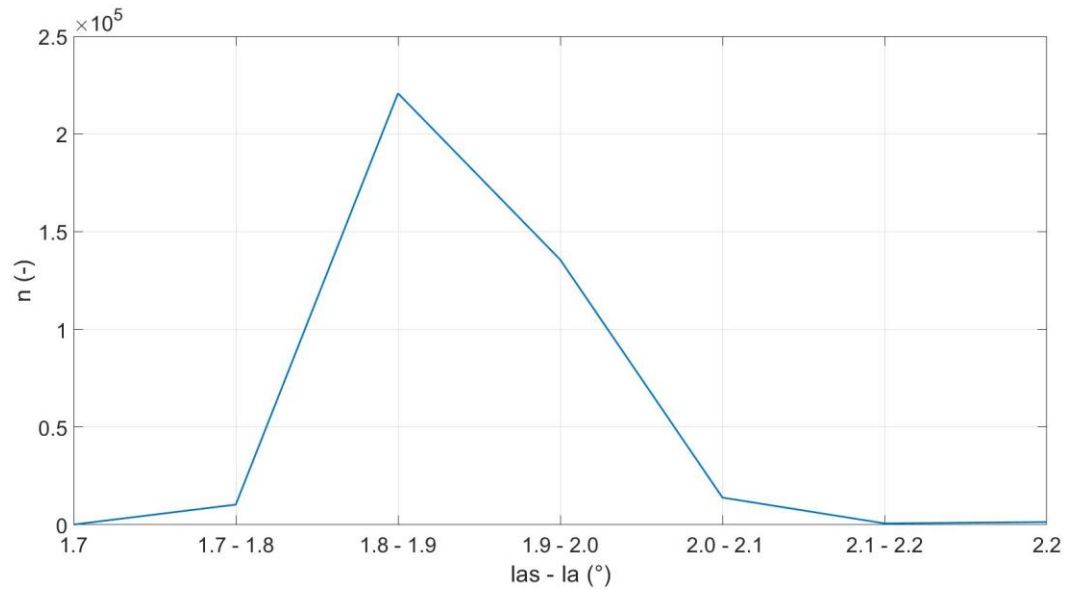
Na následujícím grafu na ose y je vynesena rozdíl fází fázorů proudů I_{as} ze senzoru a fází fázorů proudů I_a z PTP. Tento rozdíl je vztažen k fázím fázorů proudů I_a a je vyjádřený v procentech obdobně jako v předcházejících grafech u modulů fázorů. Ve fázi A se difference po většinu sledovaného období pohybuje mírně pod 2° . Což představuje méně než procento. Avšak tato hodnota překračuje jeden stupeň neboli 60 minut, což je maximální dovolená odchylka pro třídu přesnosti 5P, dle tab. 5 v kapitole 2.2.3 s názvem Měření s PTP. Avšak jelikož maximální dovolená chyba úhlu přístrojového transformátoru proudu instalovaného v rozvodně s třídou přesnosti 10P není garantována, lze tvrdit, že naměřené odchylky nepřekračují garantovanou přesnost udávanou výrobcem. Přerušovanou červenou čarou je vyznačena dovolená odchylka třídy přesnosti 5P senzoru v rozvodně.

Fáze A



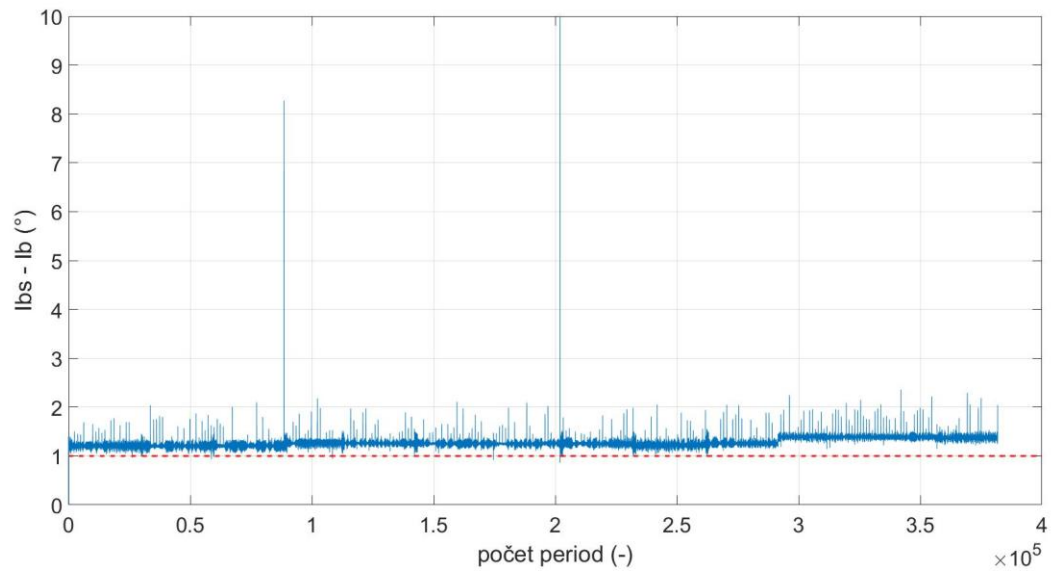
Obr. 58 Diference v úhlech fázorů proudů – fáze A

Z následujícího histogramu pozorovat, že difference úhlů fázorů proudů ve fázi A se pohybovala nejčastěji mezi $1,8^\circ$ a $1,9^\circ$. Ve zbyvajících dvou fázích v rozmezí $1,2^\circ$ až $1,3^\circ$.



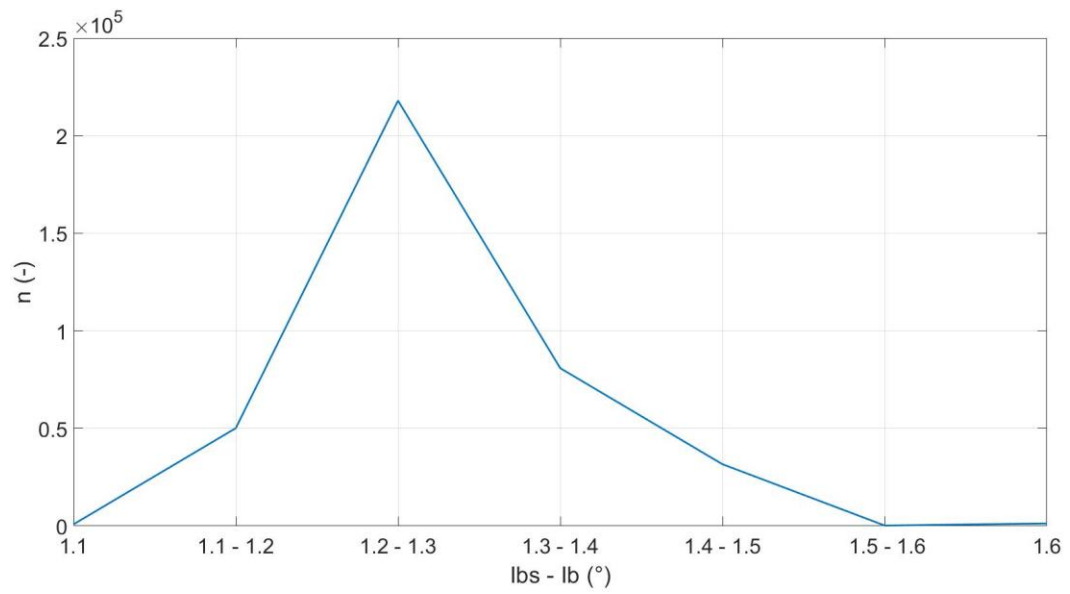
Obr. 59 Difference v úhlech fázorů proudů – histogram – fáze A

Fáze B



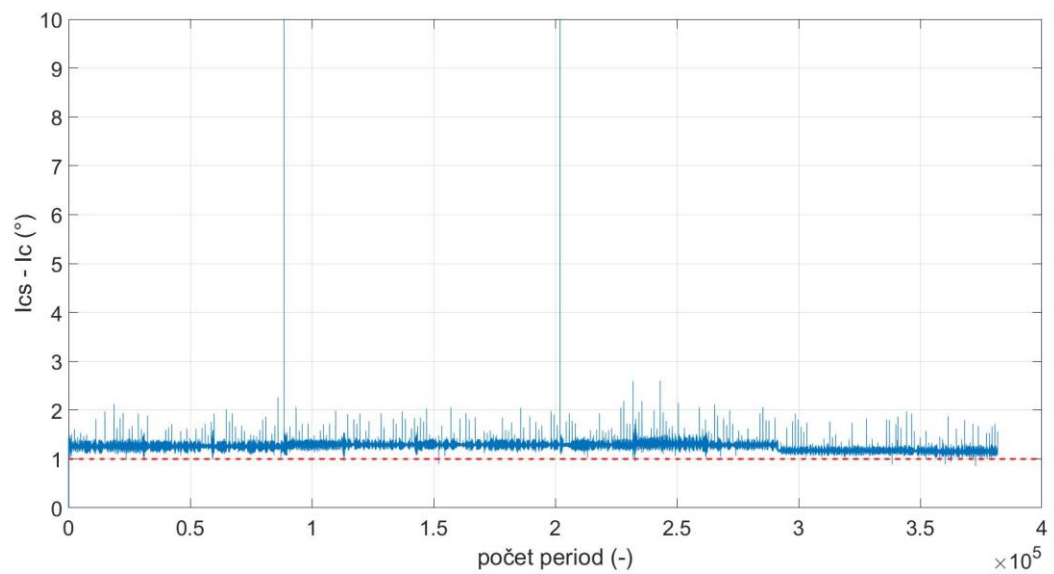
Obr. 60 Difference v úhlech fázorů proudů – fáze B

Histogram



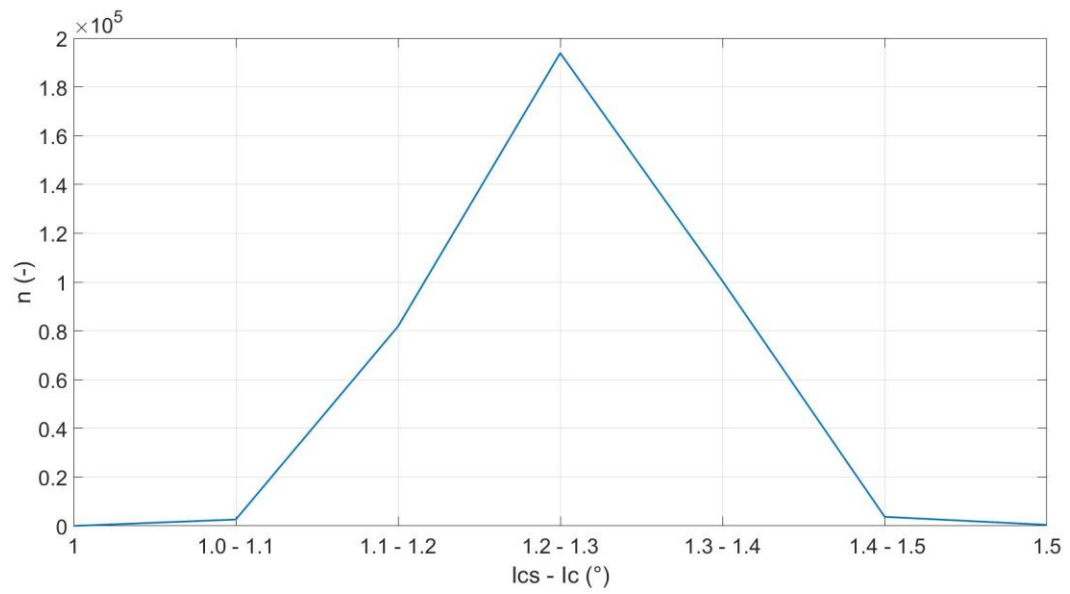
Obr. 61 Diference v úhlech fázorů proudů – histogram – fáze B

Fáze C



Obr. 62 Diference v úhlech fázorů proudů – fáze C

Histogram

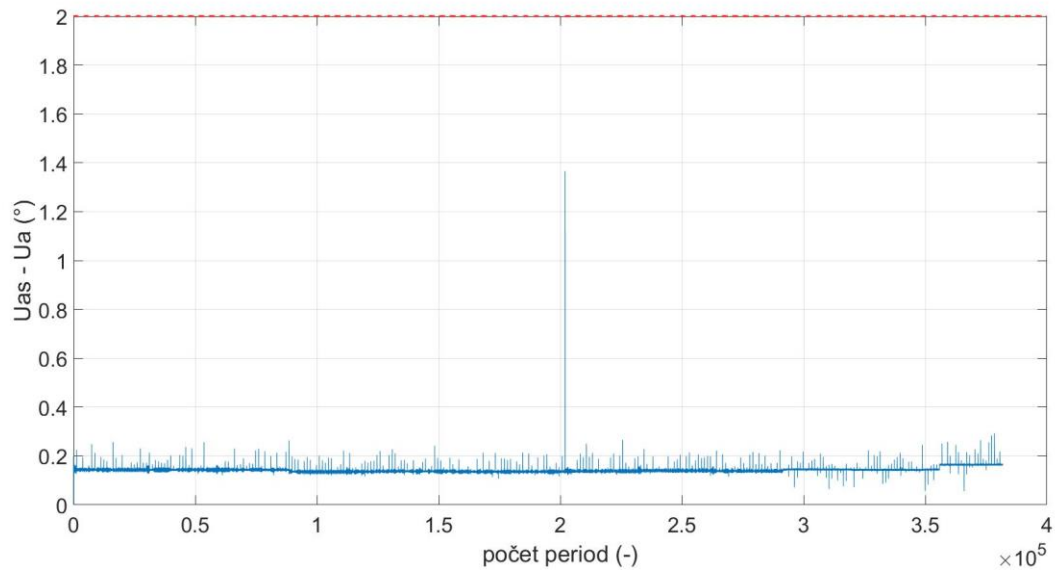


Obr. 63 Diference v úhlech fázorů proudů – histogram – fáze C

5.2.2.2 Napětí

Stejným způsobem byly vyneseny do grafů fáze fázorů napětí. Diference mezi senzory a přístrojovými transformátory napětí v tomto případě jsou velmi malé. Ve všech 3 fázích se většinou pohybují pod hranici $0,2^\circ$. To představuje $0,04\%$, můžeme tedy říci, že rozdíl je zanedbatelný vzhledem k povoleným odchylkám dle tříd přesnosti. Ty povolují 2° , respektive 4° v případě třídy 6P. Tyto hranice nebyly ani jednou překročeny za celé sledované období (viz následující grafy).

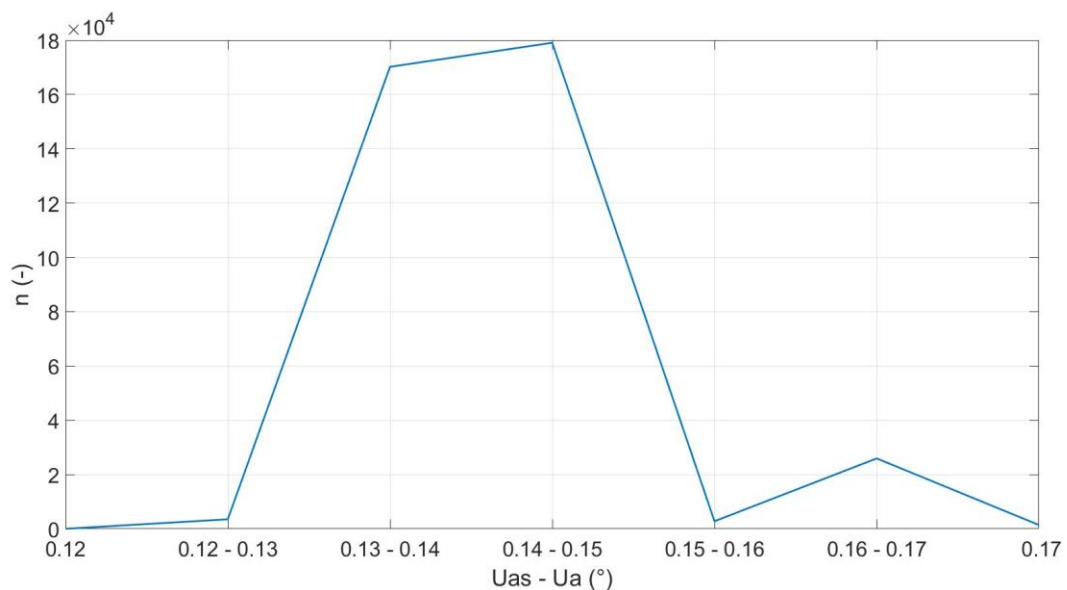
Fáze A



Obr. 64 Diference v úhlech fázorů napětí – fáze A

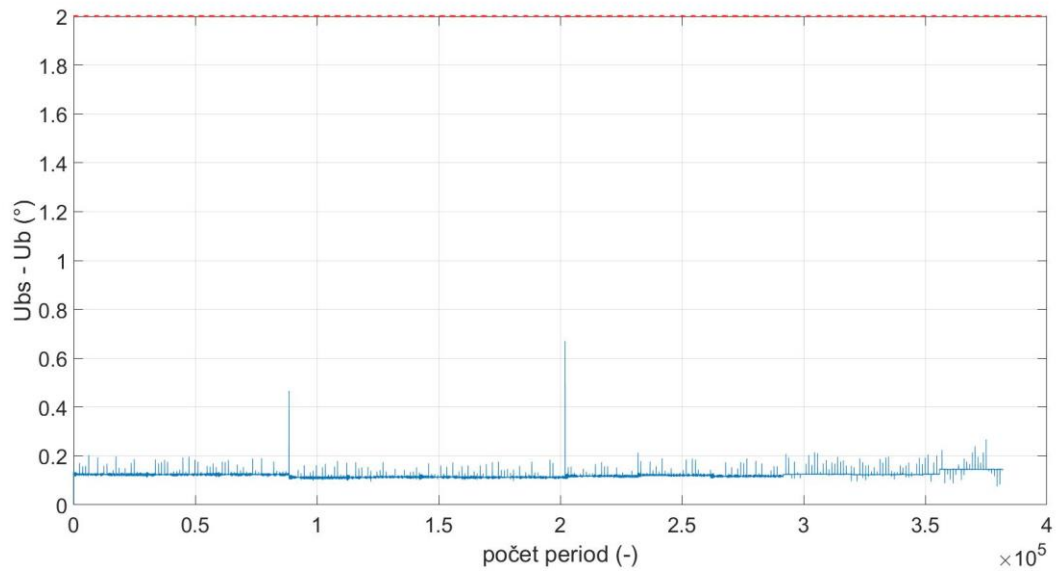
Histogram

Ve fázi A se odchylka pohybovala nejčastěji v rozmezí $0,14^\circ - 0,15^\circ$.



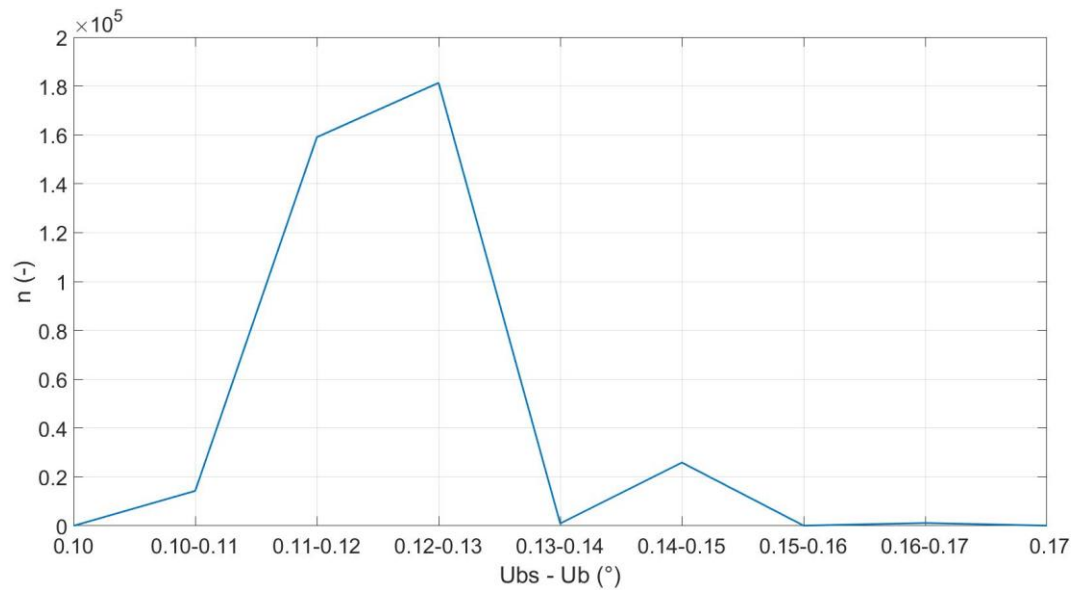
Obr. 65 Diference v úhlech fázorů napětí – histogram – fáze A

Fáze B



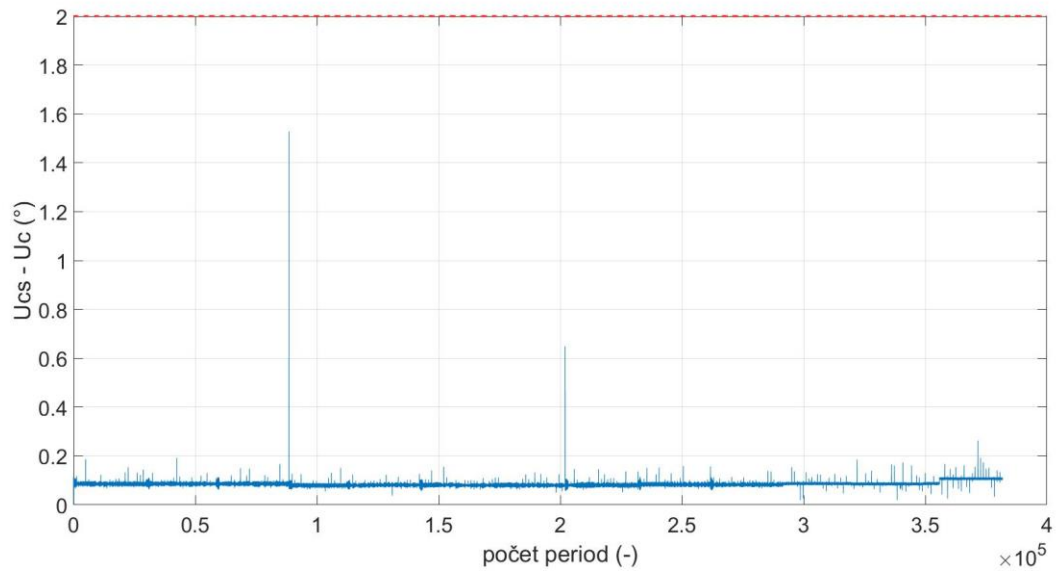
Obr. 66 Diference v úhlech fázorů napětí – fáze B

Histogram



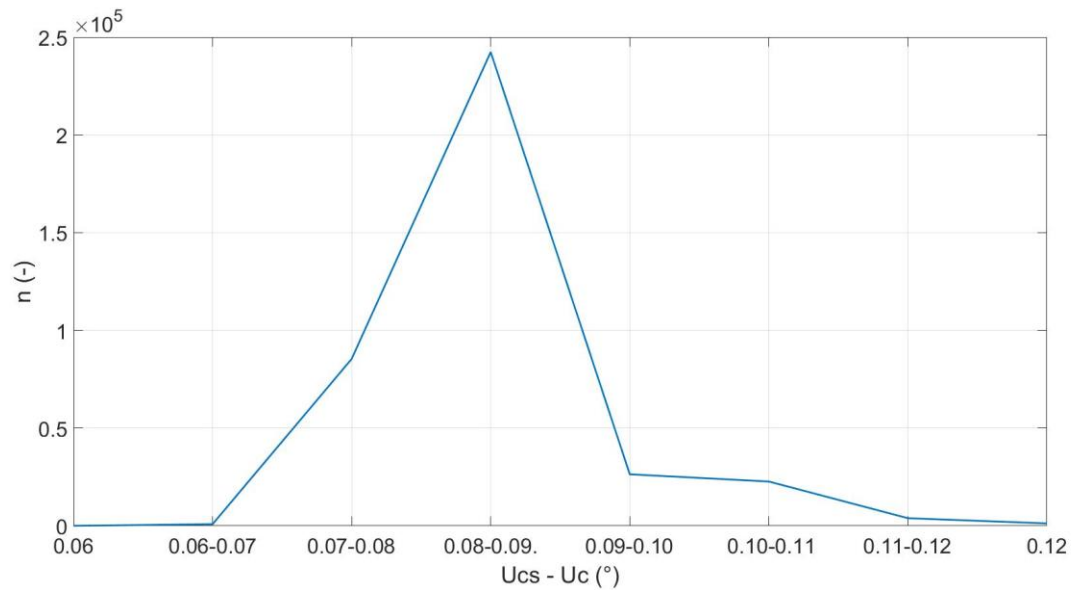
Obr. 67 Diference v úhlech fázorů napětí – histogram – fáze B

Fáze C



Obr. 68 Diference v úhlech fázorů napětí – fáze C

Histogram



Obr. 69 Diference v úhlech fázorů napětí – histogram – fáze C

5.2.3 Celková chyba

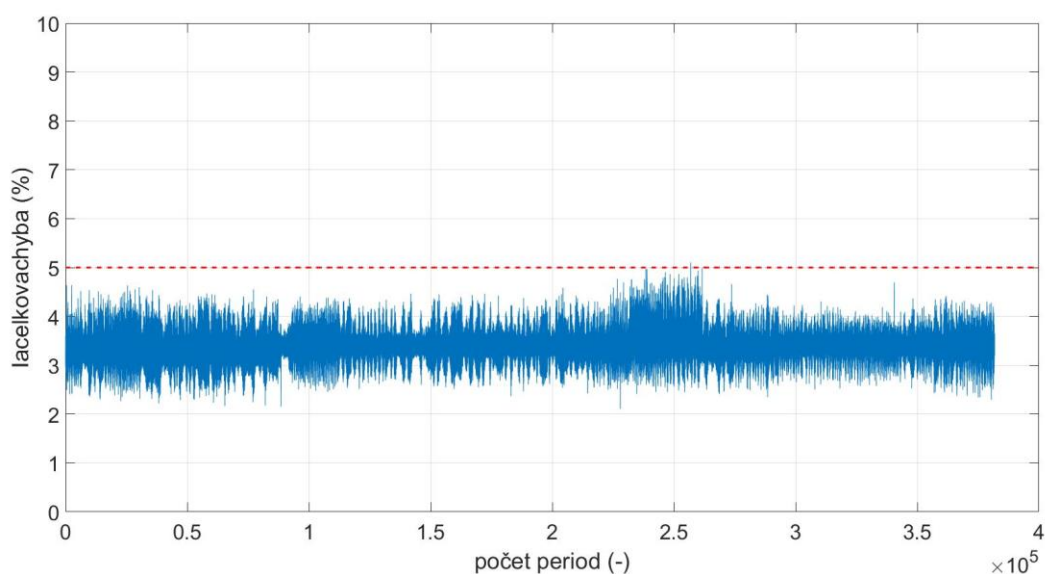
Před samotným výpočtem modulů a úhlů fázorů a před aplikací filtru, který potlačil vyšší harmonické, byly vypočteny celkové chyby z okamžitých hodnot bez DC složky.

5.2.3.1 Proudů

Jak udává tab. 5 v kapitole 2.2.3 Měření s PTP, maximální přípustná celková chyba pro měřící transformátor proudu s třídou přesnosti 5P je 5 %, pro třídu přesnosti 10P platí 10 %. Na následujících 3 grafech vidíme, že se celková chyba ve všech fázích pohybovala nejčastěji mezi 2 % – 4 %. V každé fázi došlo jednou k překročení 5% hranice.

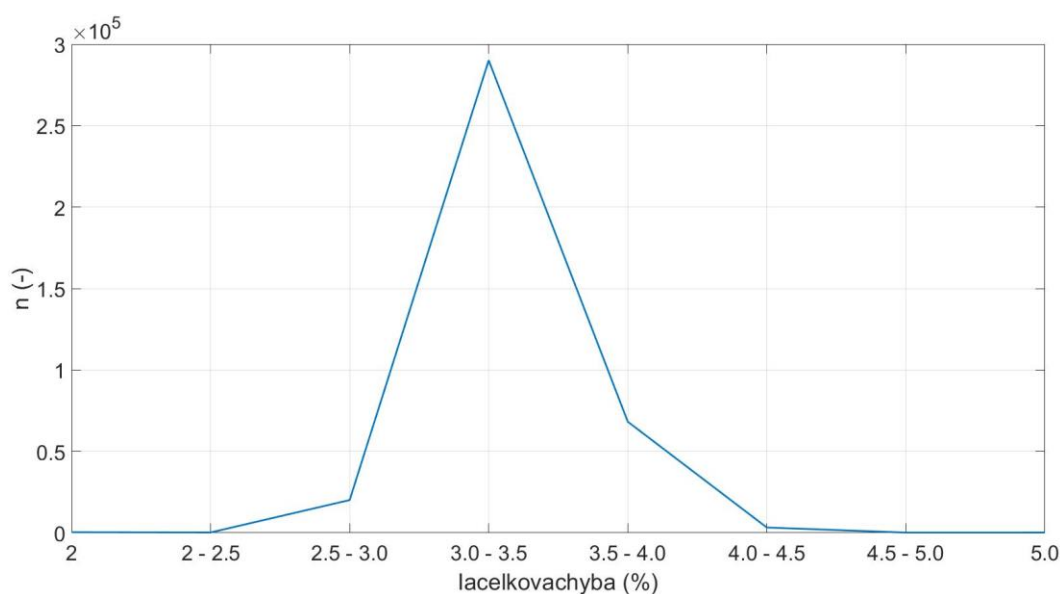
Fáze A

Ve fázi A, ve které se vyskytly největší chyby, to bylo v čase 6.2.2019 9:04:59.091.

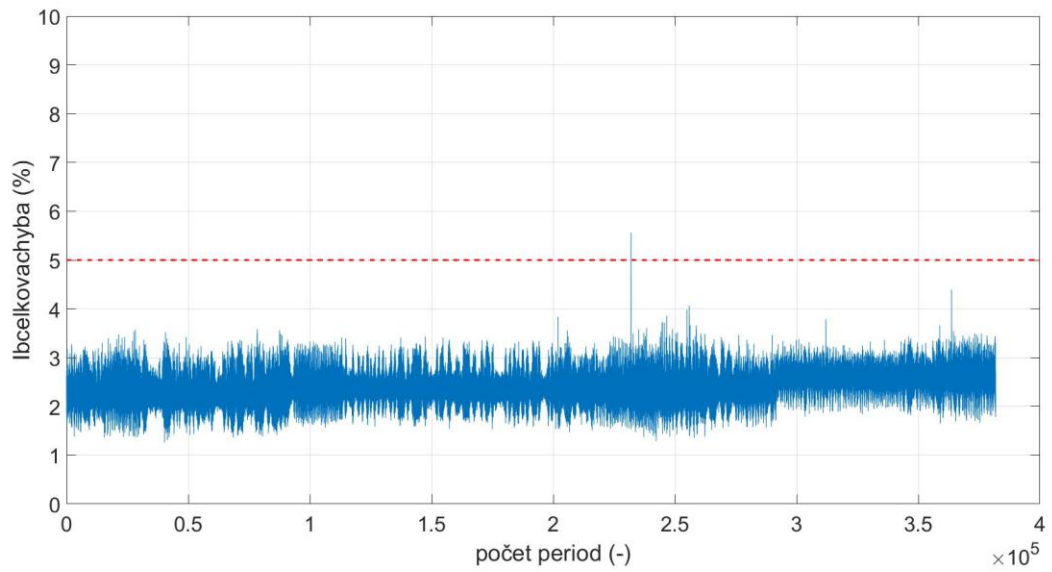


Obr. 70 Celková chyba proudu ve fázi A

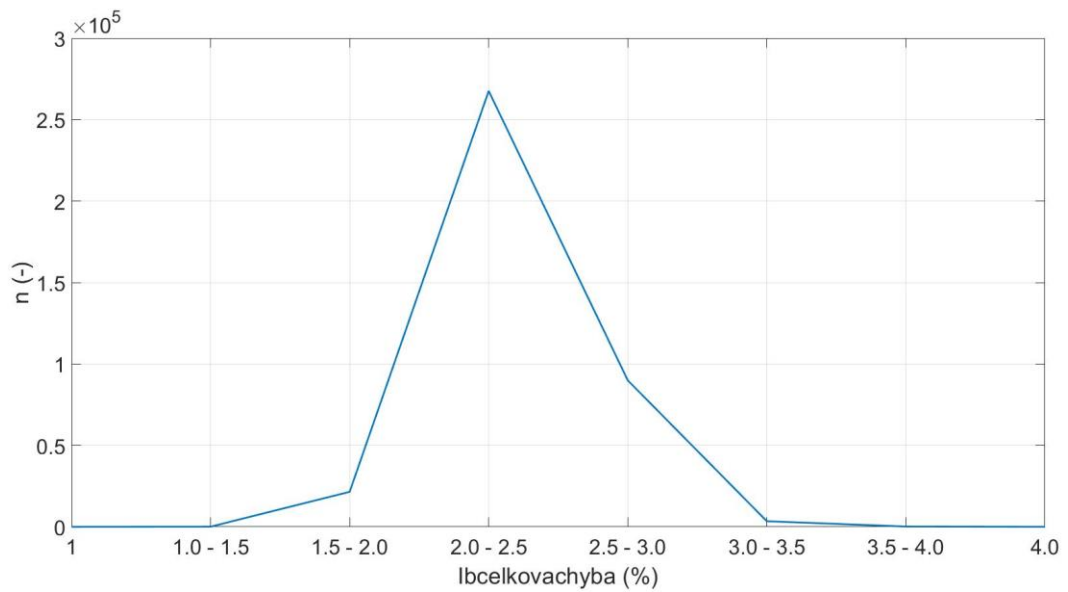
Ve fázi A celková chyba byla nejčastěji v rozmezí 3 % – 3,5 %.



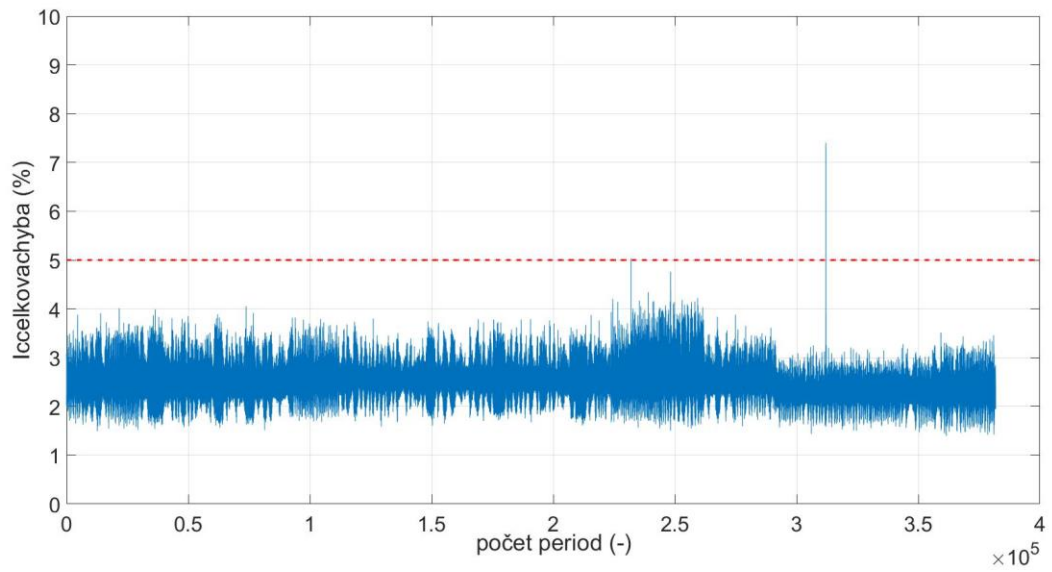
Obr. 71 Celková chyba proudu ve fázi A – histogram

Fáze B*Obr. 72 Celková chyba proudu ve fázi B*

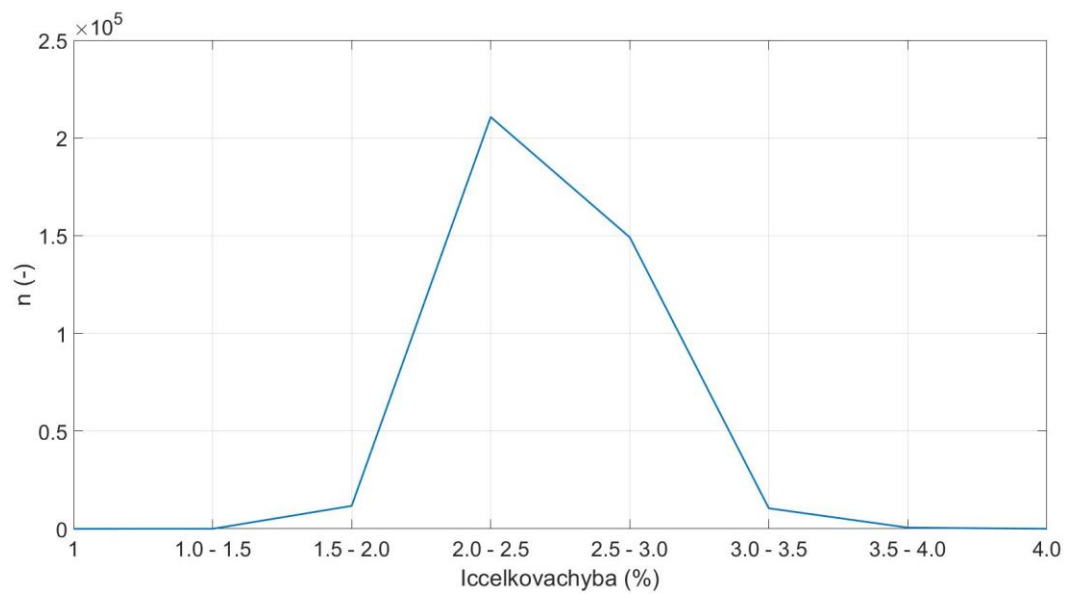
Ve fázi B celková chyba byla nejčastěji v rozmezí 2,0 % – 2,5 %.

*Obr. 73 Celková chyba proudu ve fázi B – histogram*

Fáze C

*Obr. 74 Celková chyba proudu ve fázi C*

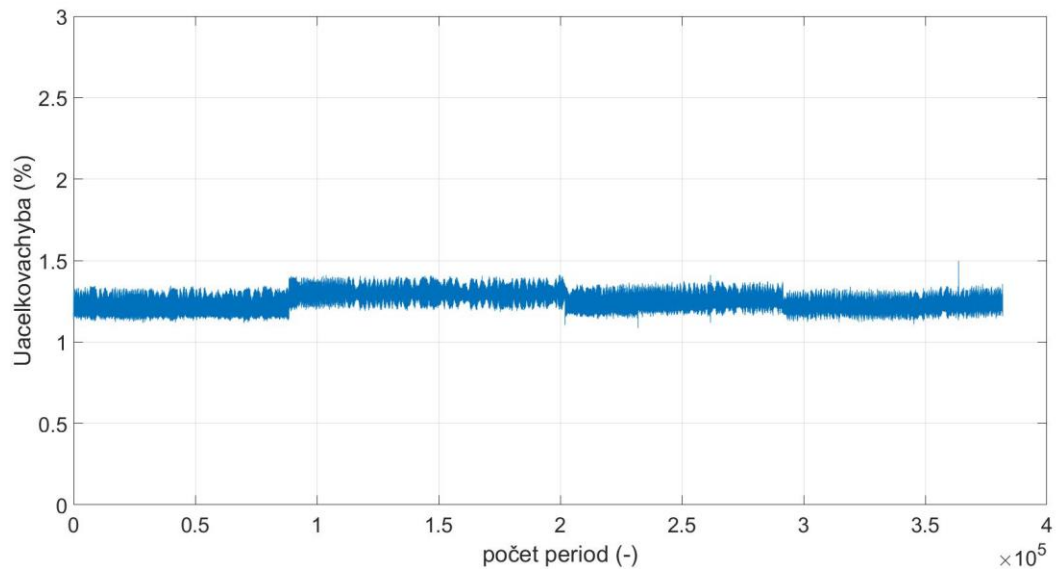
Ve fázi C celková chyba byla taky nejčastěji v rozmezí 2,0 % - 2,5 %.

*Obr. 75 Celková chyba proudu ve fázi C – histogram*

5.2.3.2 Napětí

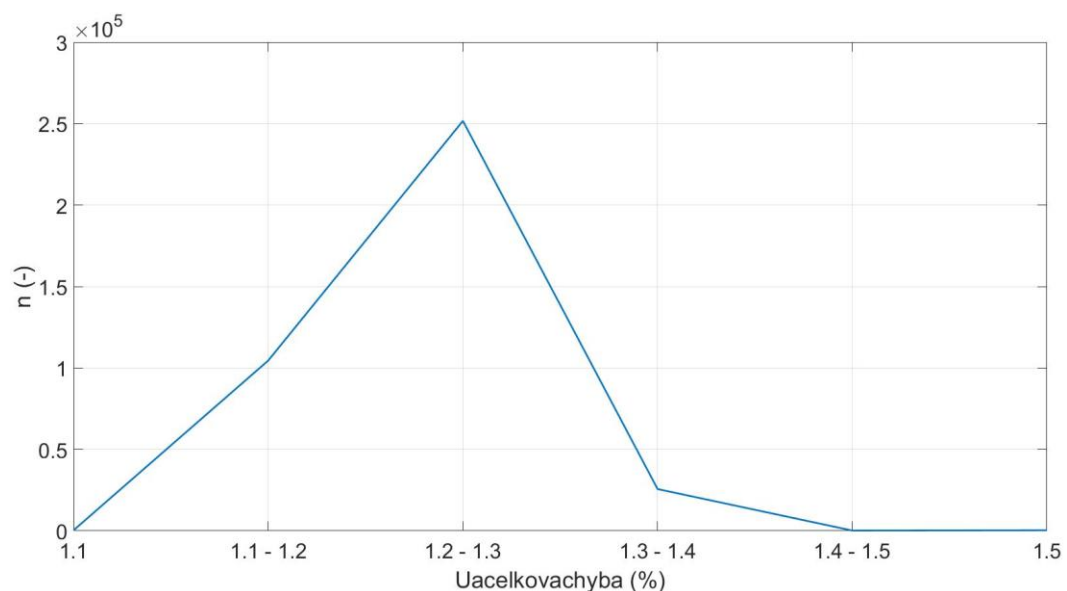
Celková chyba analyzovaných hodnot, efektivní hodnota z rozdílu okamžitých hodnot napětí vyjádřena v procentech vzhledem k efektivní hodnotě z okamžitých hodnot naměřených PTN, dosahuje menších rozměrů než je tomu u proudových převodníků. Celkové chyby napětí jsou v průměru zhruba dvakrát menší než celkové chyby proudů. Dosahují hodnot v oblasti kolem 1 % a 2 % a hranice daná třídou přesnosti nebyla překročena ani jednou.

Fáze A



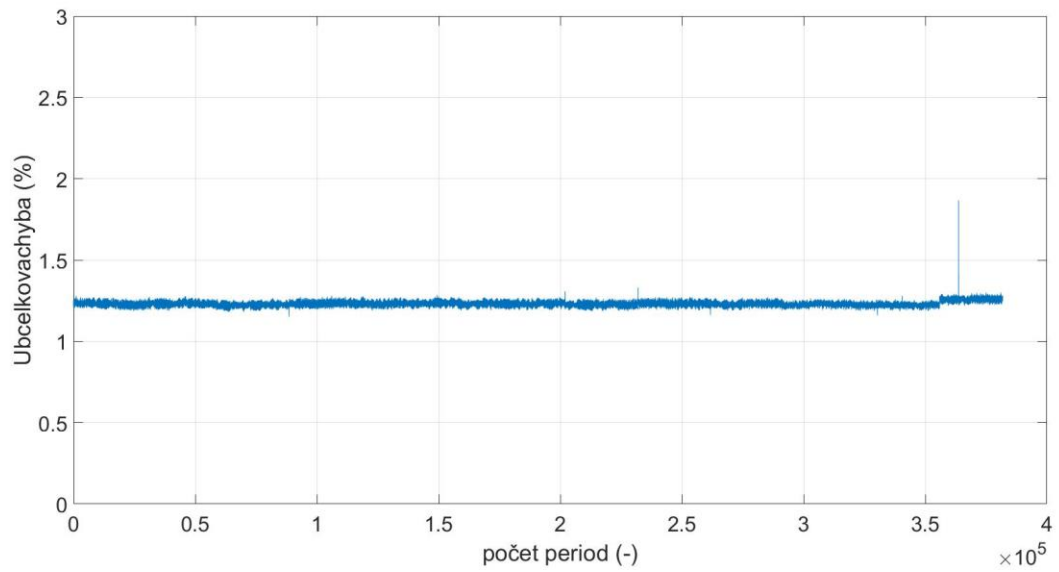
Obr. 76 Celková chyba napětí ve fázi A

Histogram



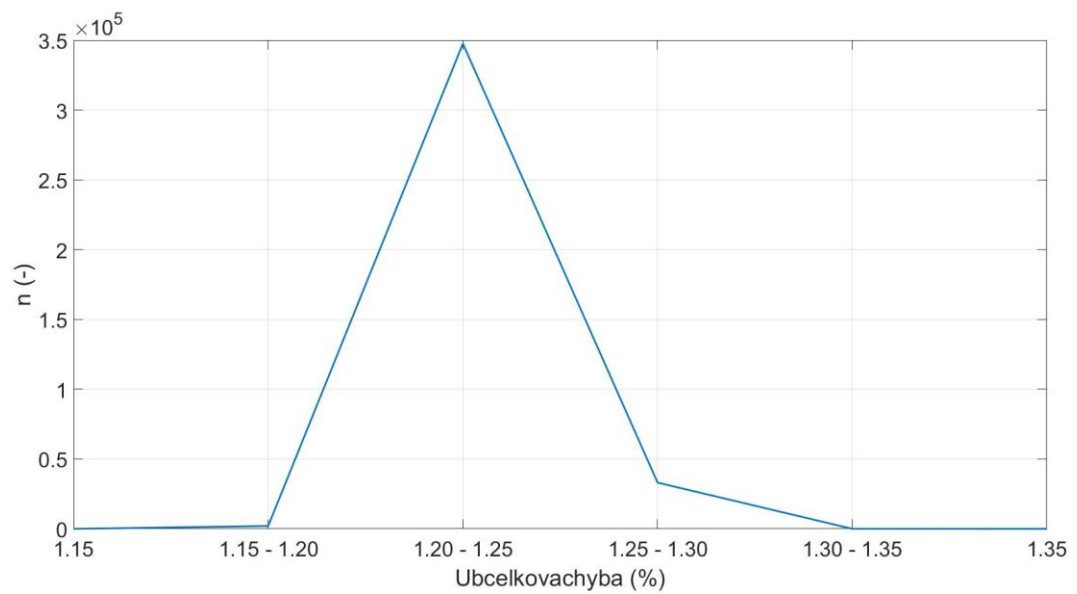
Obr. 77 Celková chyba napětí ve fázi A – histogram

Fáze B



Obr. 78 Celková chyba napětí ve fázi B

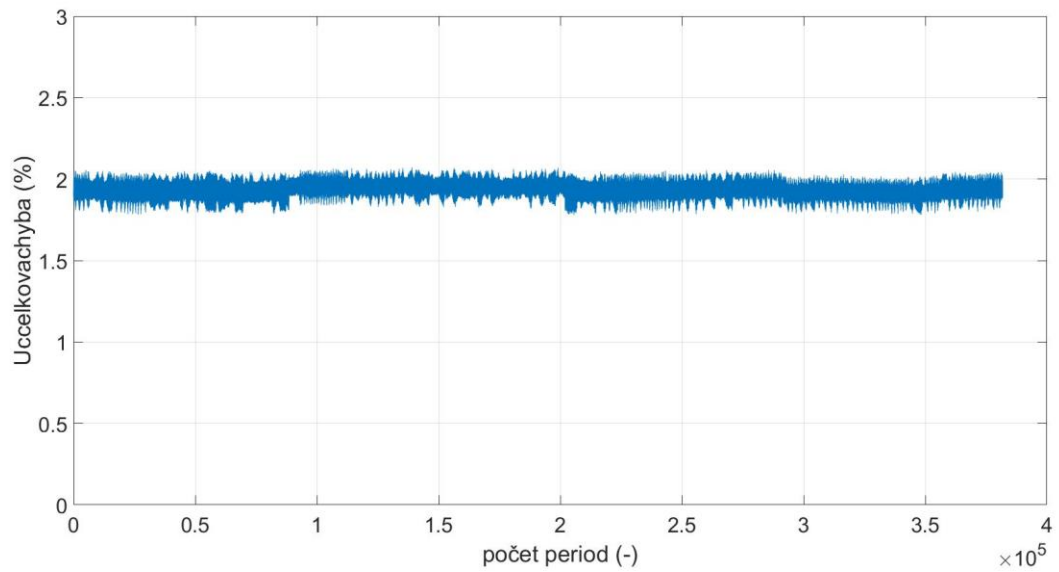
Histogram



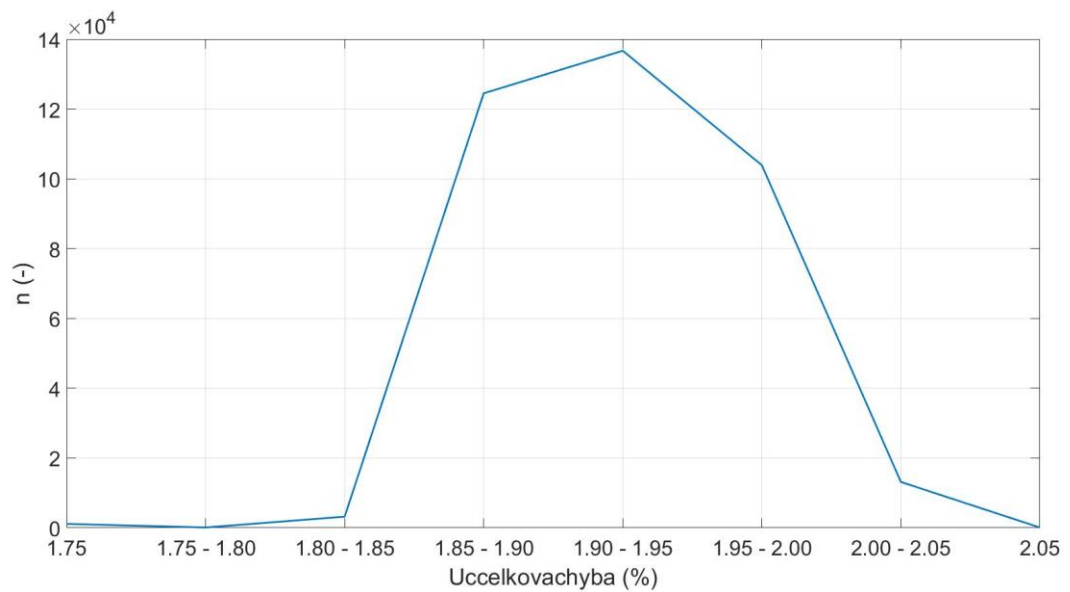
Obr. 79 Celková chyba napětí ve fázi B – histogram

Fáze C

Největší diference byly zaznamenány ve fázi C.



Obr. 80 Celková chyba napětí ve fázi C

Histogram

Obr. 81 Celková chyba napětí ve fázi C – histogram

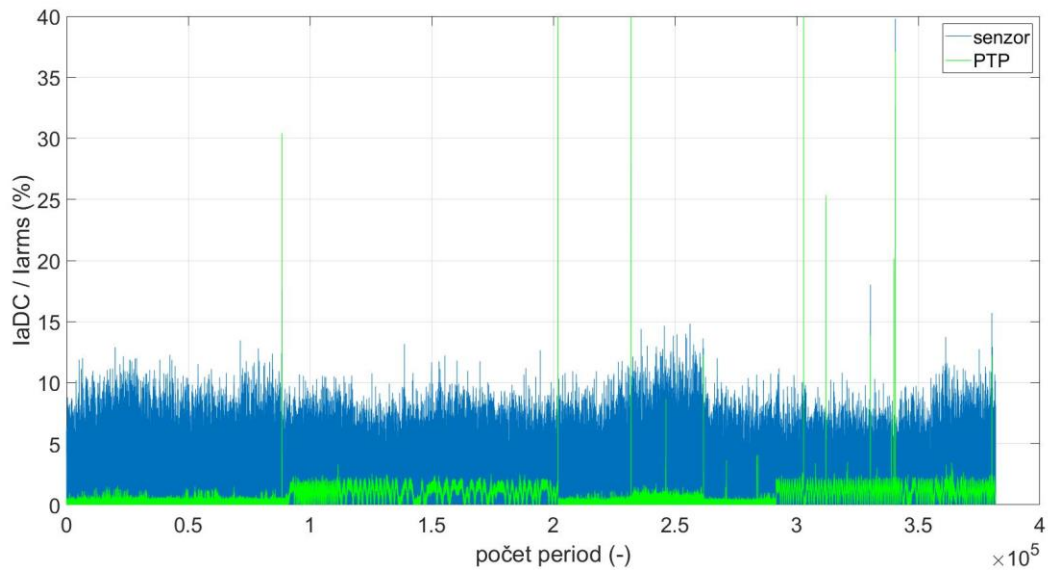
5.2.4 Stejnoseměrná složka

Další proměnnou, která byla získána a zaznamenávána, je poměr stejnosměrné složky.

5.2.4.1 Proudů

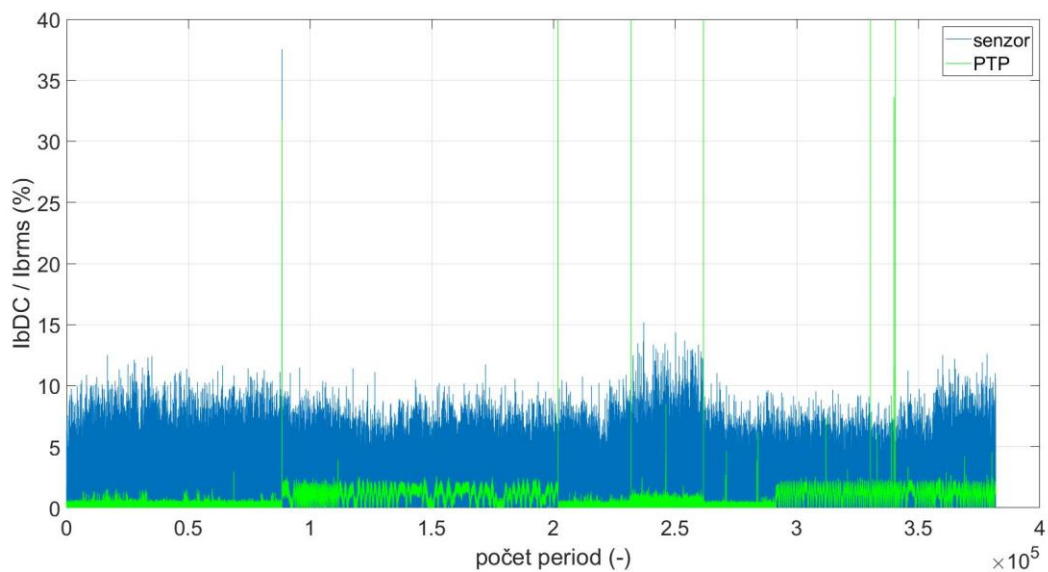
Stejnoseměrná složka byla vztažena k efektivní hodnotě naměřených vzorků z PTP I_{rms} a vyjádřena v procentech (I_{DC}/I_{rms}). Na grafech lze vidět, že poměr stejnosměrné složky u PTP se pohyboval maximálně na úrovni kolem 2 % z efektivní hodnoty proudu, zatímco u proudového senzoru dosahoval poměr hodnot až nad 10 % ve všech třech fázích.

Fáze A



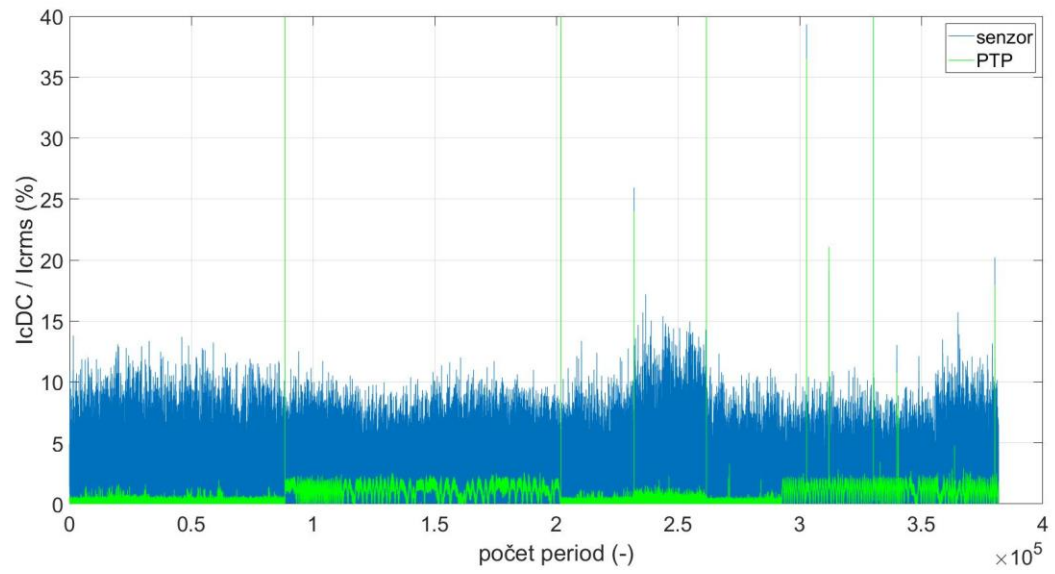
Obr. 82 Poměr stejnosměrné složky u proudů ve fázi A

Fáze B



Obr. 83 Poměr stejnosměrné složky u proudů ve fázi B

Fáze C



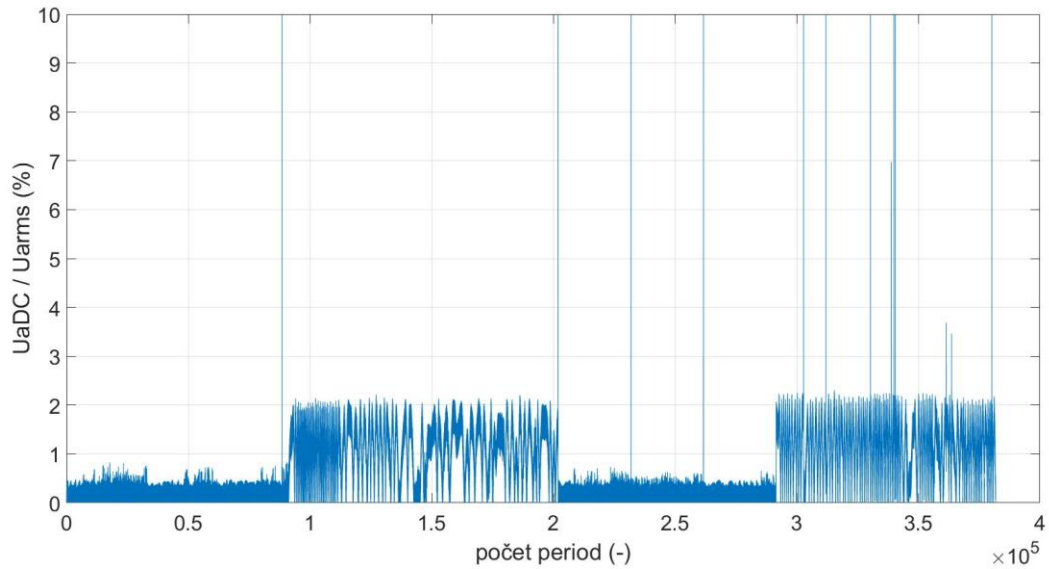
Obr. 84 Poměr stejnosměrné složky u proudů ve fázi C

5.2.4.2 Napětí

Poměry stejnosměrné složky u proudového senzoru a u PTP se výrazně lišily. Avšak z analýzy napětí můžeme vidět, že poměr DC složky u napěťového senzoru a u přístrojového transformátoru napětí byl velice podobný. Maximální hodnoty se pohybovaly kolem oblasti 2 %. Rozdíly v jednotlivých fázích byly minimální.

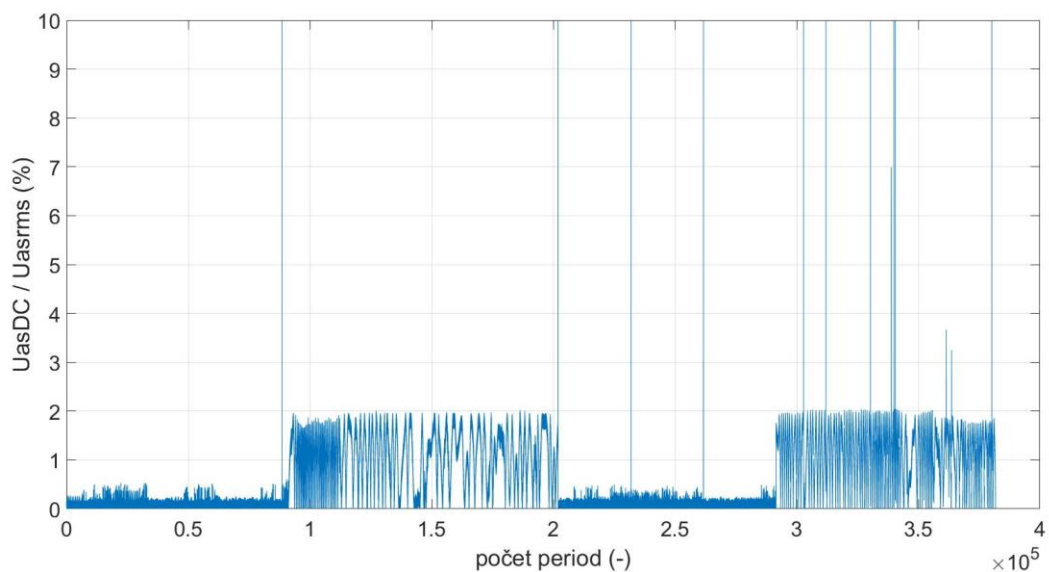
Fáze A

PTN



Obr. 85 Poměr stejnosměrné složky napětí ve fázi A (PTN)

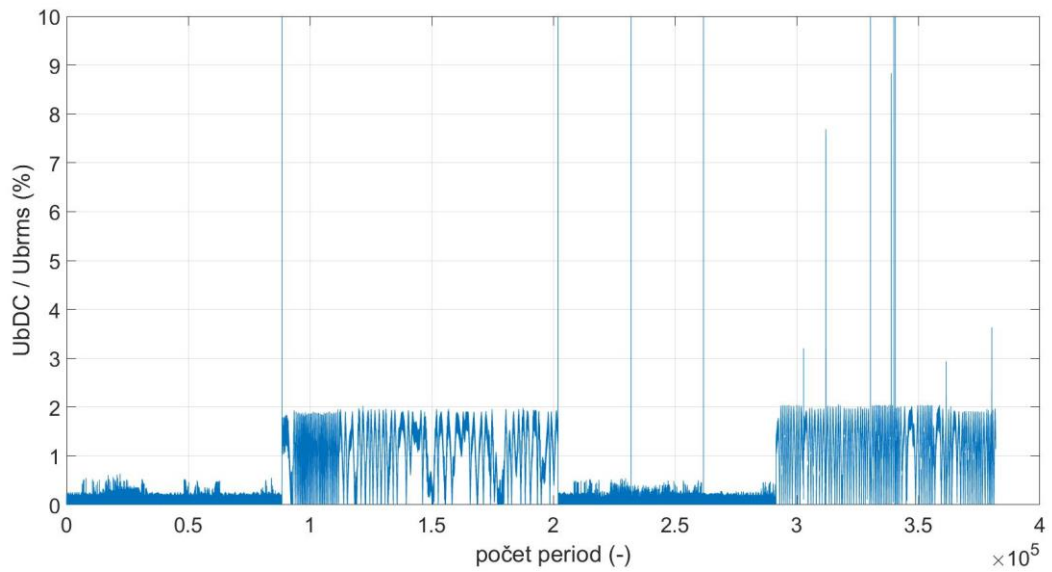
Senzor



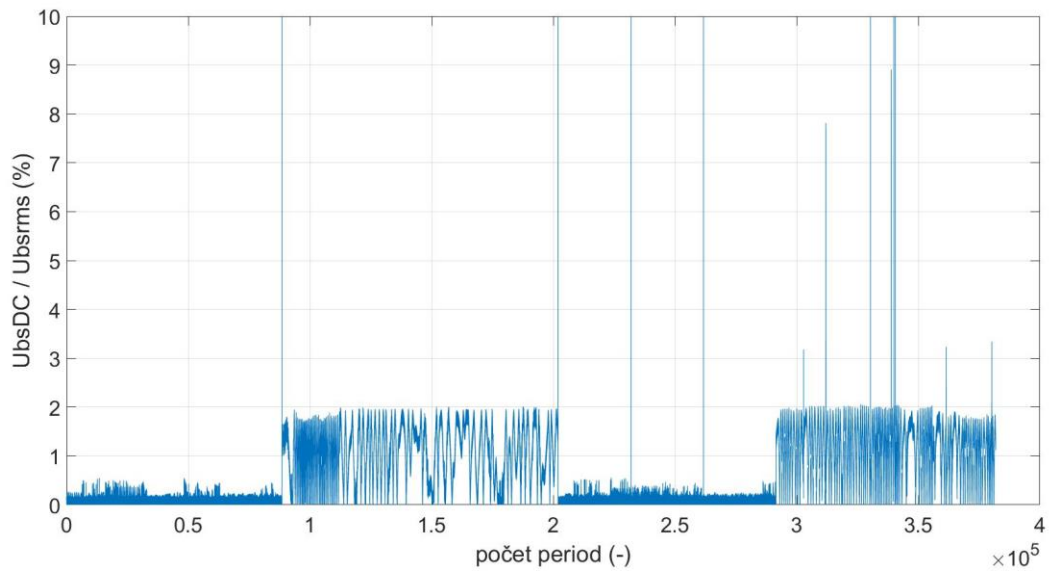
Obr. 86 Poměr stejnosměrné složky napětí ve fázi A (senzor)

Fáze B

PTN

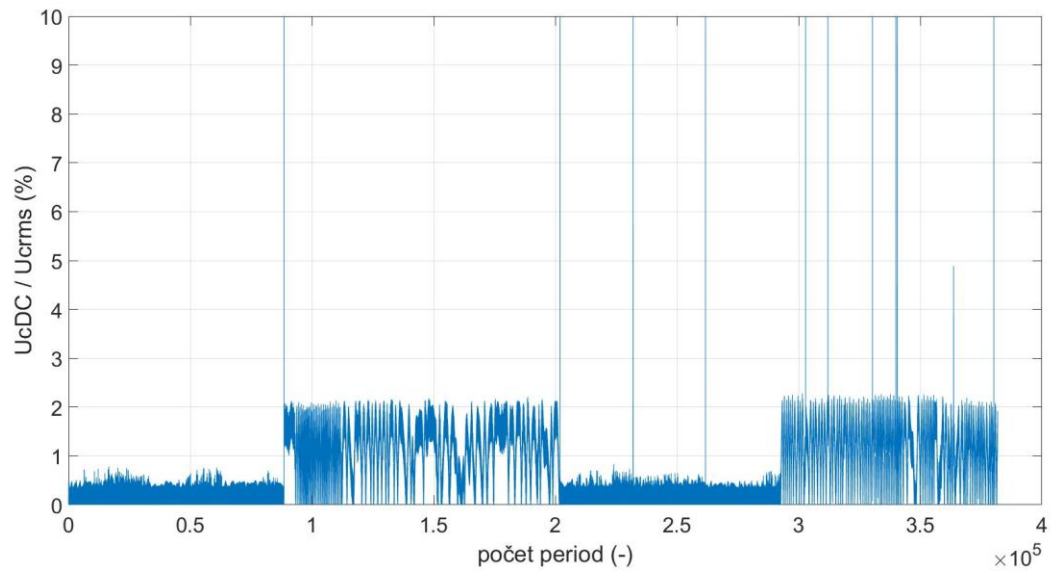
*Obr. 87 Poměr stejnosměrné složky napětí ve fázi B (PTN)*

Senzor

*Obr. 88 Poměr stejnosměrné složky napětí ve fázi B (senzor)*

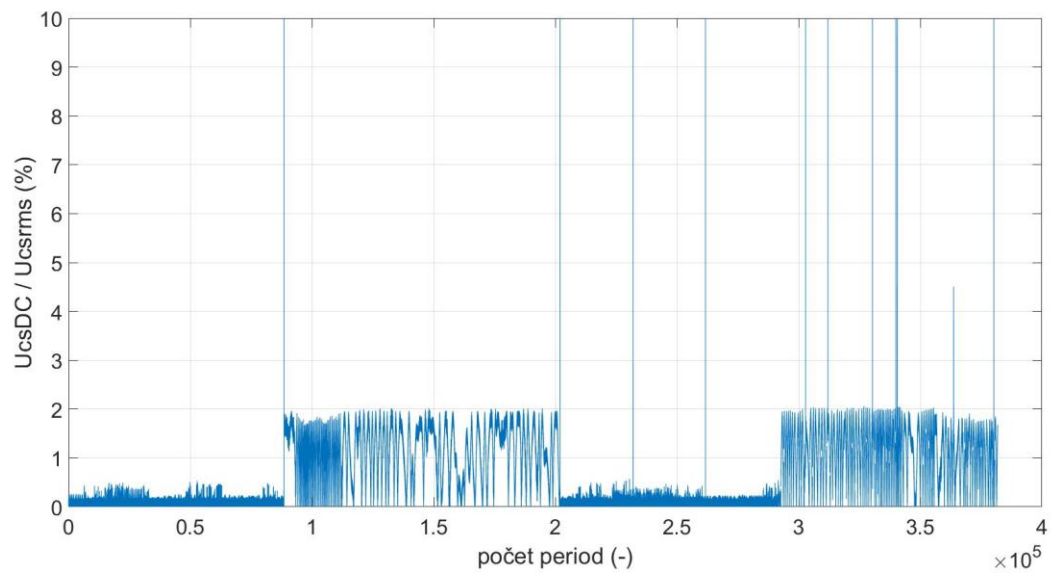
Fáze C

PTN



Obr. 89 Poměr stejnosměrné složky napětí ve fázi C (PTN)

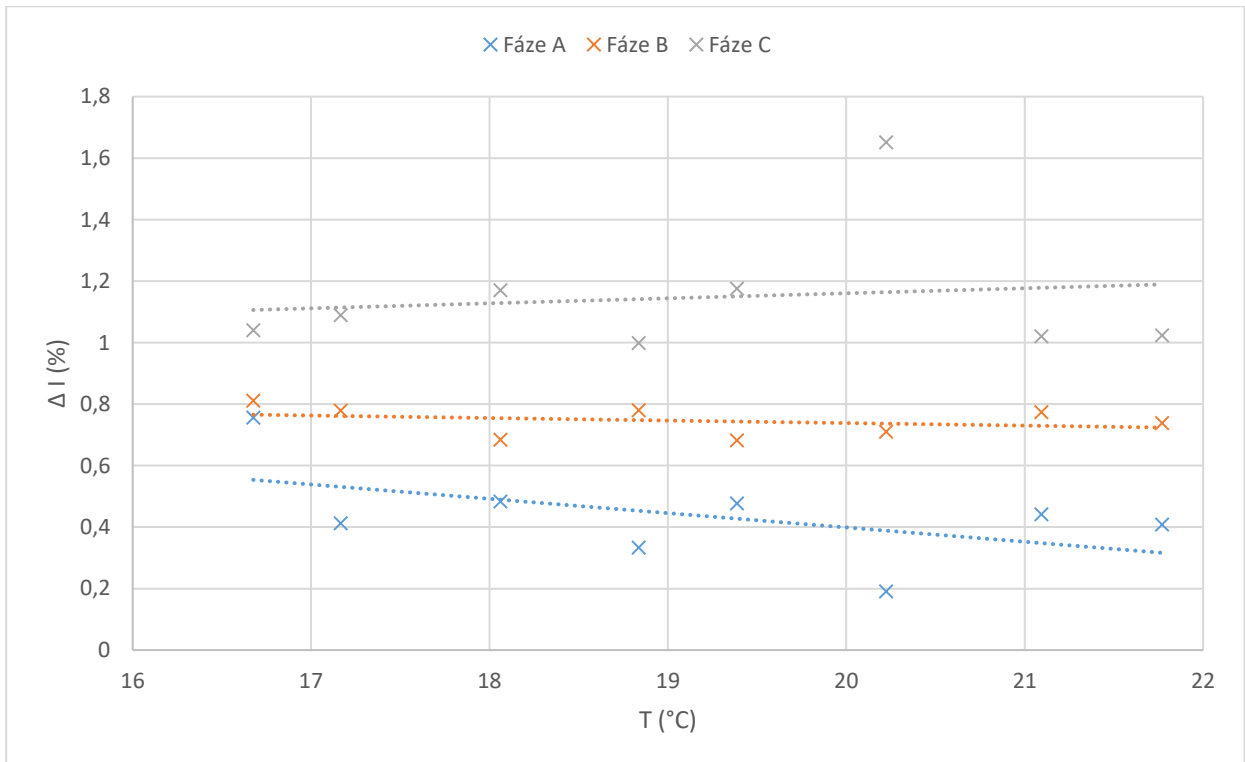
Senzor



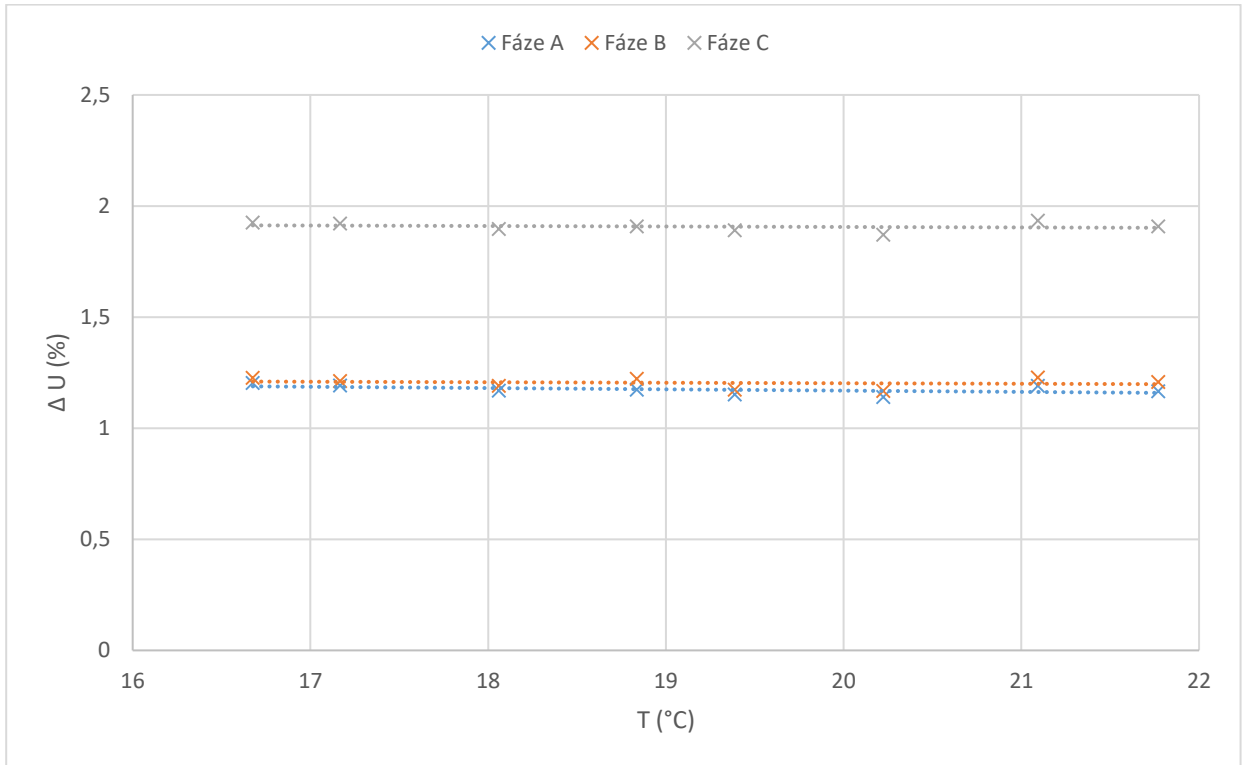
Obr. 90 Poměr stejnosměrné složky napětí ve fázi C (senzor)

5.2.5 Teplota

K výstupním datům proudů a napětí z programu Sampled Value Analyzator (SVA) od poloviny února byla přidána i data zaznamenávající aktuální teplotu v rozvodně v místě instalace analyzovaných převodníků. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2, teplota po teoretické stránce patří mezi prvky, které mohou ovlivňovat přesnost měření. Avšak po námi sledovanou dobu nedocházelo v rozvodně k výrazným teplotním změnám. Teplota se pohybovala pouze v rozmezí od 15 °C do 22 °C. V následujících grafech nemůžeme vypořizovat žádnou závislost modulů fázorů proudů a napětí na teplotě.



Obr. 91 Závislost modulů fázorů proudů na teplotě



Obr. 92 Závislost modulů fázorů napětí na teplotě

5.3 Návrh dalšího postupu

Z výsledných grafických závislostí z předcházející kapitoly zřetelně vyplývá, že ve výsledcích jsou chyby způsobené nedořešením problému s periodami, ve kterých dochází k přerušení záznamu dat. Zejména u grafů, které znázorňují velikost poměru DC složky, je patrné, že poměr občas dosahuje nesmyslně vysokých hodnot. Této záležitosti byl také věnován prostor, ale bohužel se prozatím nepodařilo vymyslet algoritmus, který by vyřešil tento nedostatek analýzy dat. Cílem je vymyslet způsob, pomocí něhož nezahrnout do výpočtů poškozené periody, a zároveň neovlivnit výpočty v nepoškozených periodách. Byl vymyšlen následující algoritmus, který se o toto pokoušel, avšak cíl byl splněn jen z části.

Bylo potřeba vymazat zaznamenané periody, během kterých došlo k přerušení záznamu a následnému opětovnému naběhnutí, abychom nezanášeli chyby do dalšího postupu. Bylo zde využito toho, že v ukládaných datech bylo na každém řádku zaznamenáno číslo vzorku během každé sekundy od 0 do 3999, které bylo uloženo do matic s názvem poradit (poradis pro senzor). Nejdříve muselo dojít ke konverzi z textového formátu na číselný formát. Čísla vzorků byla uložena do proměnné ZZZ (PTP, PTN) a do proměnné QQQ (senzor).

```

66     % odstranění period během kterých došlo k přerušení záznamu dat
67     %1
68 -   poradit=[];
69 -   poradis=[];
70
71 -   for k=1:l
72 -       poradit=[poradit;mydata{1,k}.textdata(2:100000,3)];
73 -       poradis=[poradis;mydatas{1,k}.textdata(2:100000,3)];
74 -   end
75     %2
76 -   [rt,s]=size(poradit);
77 -   [rs,s]=size(poradis);
78
79 -   zz=[rt,rs];
80 -   zz=min(zz);
81
82 -   for rr=1:zz
83 -       for ss=1:s1
84 -           x=char(poradit(rr,ss));
85 -           xx=char(poradis(rr,ss));
86 -           datt_new(rr,1)=string(x(1:end));
87 -           dats_new(rr,1)=string(xx(1:end));
88 -       end
89 -   end
90     %3
91 -   for k=1:zz
92 -       vvv=char(datt_new(k));
93 -       vvv=string(vvv(1:end));
94 -       vv(k)=vvv;
95 -       vvv2=char(dats_new(k));
96 -       vvv2=string(vvv2(1:end));
97 -       vv2(k)=vvv2;
98 -       ZZZ(k)=str2double(vv(k));
99 -       QQQ(k)=str2double(vv2(k));
100 -   end

```

Obr. 93 Nahrání čísla vzorku do matice a následná konverze z textového na číselný formát

Při vynechání záznamu rozdíl mezi čísly na sousedních řádcích $[ZZZ(k+1) - ZZZ(k)]$ byl větší než 1 a zároveň nemohl být roven 3999, protože po tomto čísle následovala opět 0. Například, pokud došlo k výpadku dat po vzorku číslo 3500 a data naběhla opětovně se vzorkem číslo 3600, bylo smazáno 60 předcházejících řádků před vzorkem 3500, aby rozdíl mezi čísly vynechaných vzorků byl celočíselný násobek 80. Výsledný počet smazaných vzorků je h

$$h = |(ZZZ_{k+1} - ZZZ_k) - 80 \cdot i| = |(3600 - 3500) - 80 \cdot 2| = 60. \quad (5.20)$$

Proměnná i byla spočtena následovně

$$i \doteq \frac{(ZZZ_{k+1} - ZZZ_k)}{80} = \frac{uu - u}{80} = \frac{3600 - 3500}{80} = \frac{100}{80} \doteq 2. \quad (5.21)$$

Podíl $100/80$ byl zaokrouhlen pomocí funkce ceil směrem k nejbližšímu vyššímu celému číslu. Celkový počet vymazaných řádků byl ukládán do proměnné h_2 (r_2 v případě senzoru).

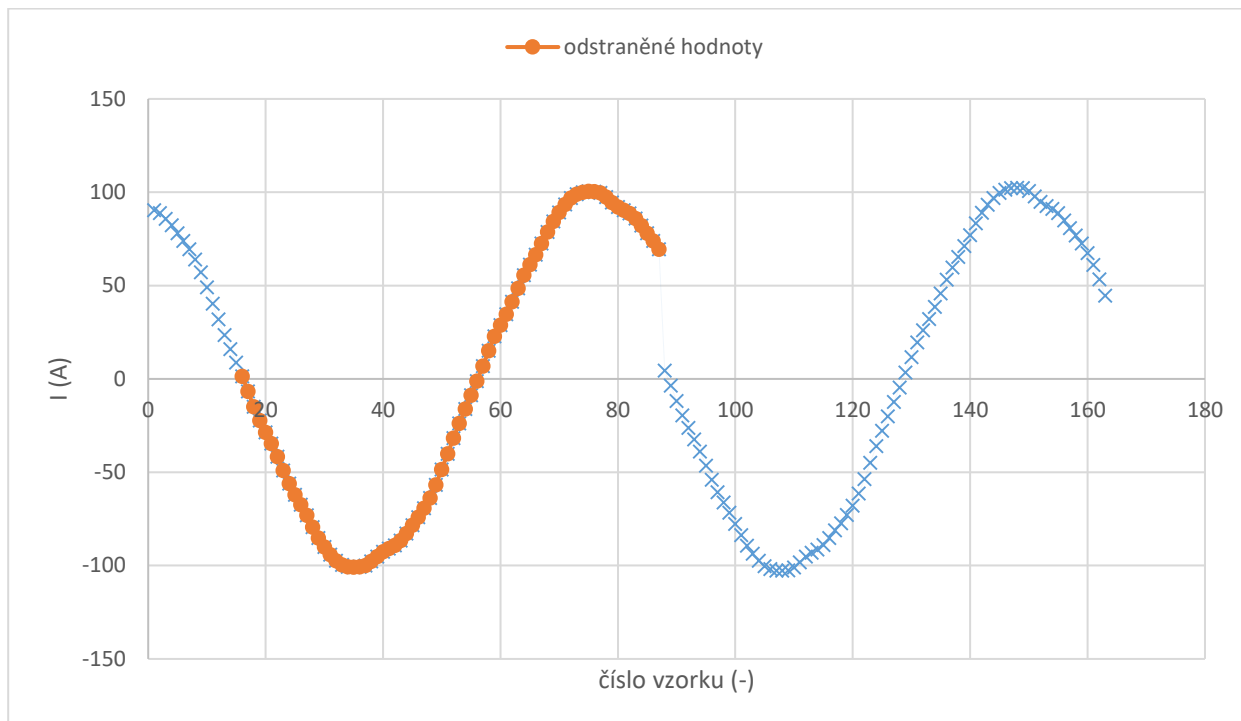
```

102 %4
103 - Ia=Ia;
104 - Ias=Ias;
105 - h2=0;
106 - r2=0;
107 - for k=1:zz-1
108 -     u=ZZZ(k);
109 -     uu=ZZZ(k+1);
110 -     t=QQQ(k);
111 -     tt=QQQ(k+1);
112 -     if (ZZZ(k+1)-ZZZ(k))==1 || (ZZZ(k+1)-ZZZ(k))== -3999;
113 -     else
114 -         i=abs((uu-u))/80;
115 -         i=ceil(i);
116 -         h=abs((ZZZ(k+1)-ZZZ(k))-(80*i));
117 -         h2=h2+h;
118 -         Ia(k-(h2):k-(h2-h))=[];
119 -         Ib(k-(h2):k-(h2-h))=[];
120 -         Ic(k-(h2):k-(h2-h))=[];
121 -         Ua(k-(h2):k-(h2-h))=[];
122 -         Ub(k-(h2):k-(h2-h))=[];
123 -         Uc(k-(h2):k-(h2-h))=[];
124
125 -     end
126 -     if (QQQ(k+1)-QQQ(k))==1 || (QQQ(k+1)-QQQ(k))== -3999;
127 -     else
128 -         i=(tt-t)/80;
129 -         i=ceil(i);
130 -         h=abs((QQQ(k+1)-QQQ(k))-(80*i));
131 -         r2=r2+h;
132 -         Ias(k-(r2):k-(r2-h))=[];
133 -         Ibs(k-(r2):k-(r2-h))=[];
134 -         Ics(k-(r2):k-(r2-h))=[];
135 -         Uas(k-(r2):k-(r2-h))=[];
136 -         Ubs(k-(r2):k-(r2-h))=[];
137 -         Ucs(k-(r2):k-(r2-h))=[];
138 -     end
139 - end

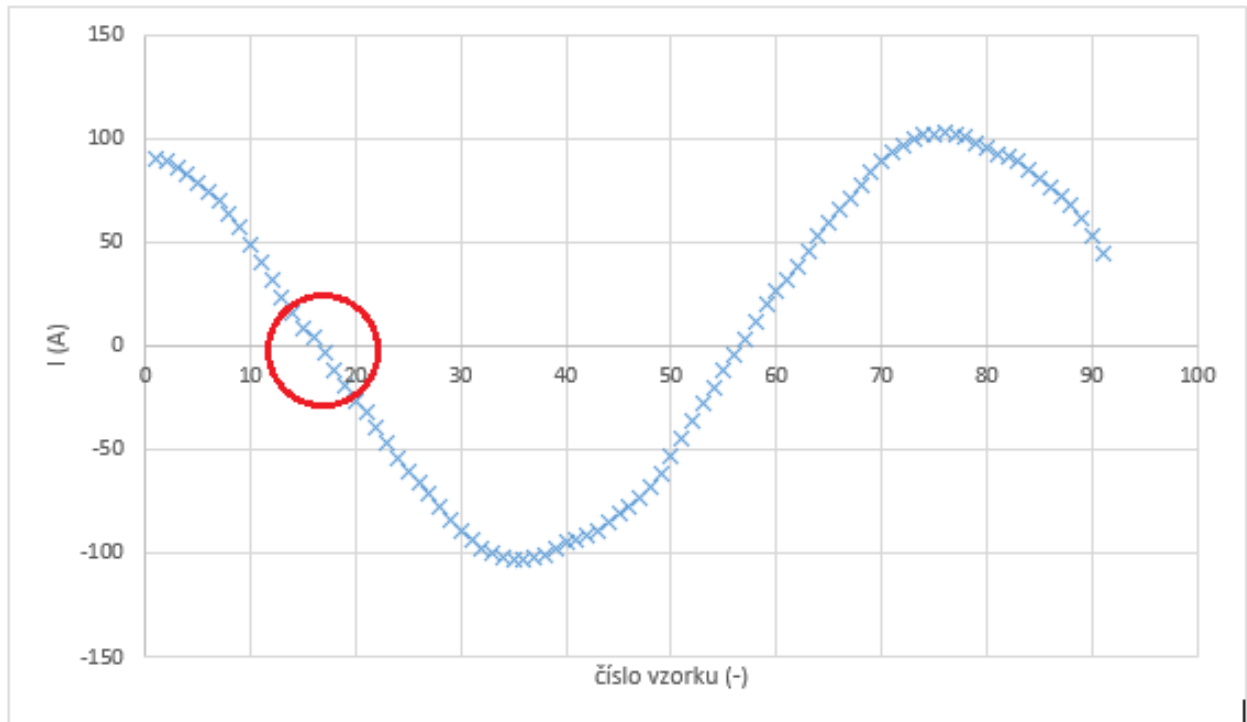
```

Obr. 94 Vymazání period, ve kterých došlo k výpadku záznamu

Na následujících dvou obrázcích lze pozorovat, co zde předvedený algoritmus provede s průběhem proudu během periody, při které došlo k přerušení záznamu. Dojde k odstranění hodnot, které jsou vyznačeny oranžově. Obrázek 95 značí průběh hodnot před aplikací algoritmu, obrázek 96 po aplikaci algoritmu.



Obr. 95 Perioda, při které došlo k přerušení záznamu



Obr. 96 Průběh proudu po odstranění periody, při které došlo k přerušení záznamu

Čísla vzorků na ose x v předešlých grafických průbězích se liší od čísel vzorků, na kterých je postaven princip fungování algoritmu. V algoritmu se jedná o číslování vzorků během každé sekundy měření. V grafech se jedná o celkový počet vzorků zaznamenaných od počátku měření.

Tímto prezentovaným postupem, kdy po vymazání části chybných period, bylo dosaženo kontinuální návaznosti naměřených dat. To ovšem vyřešilo pouze problém s výpočtem stejnosměrné složky. Nepřesnosti při výpočtu modulů a úhlů fázorů proudů a napětí přetrvávají. Je to způsobeno neideální návazností periody předcházející periodě s přerušením záznamu s periodou navazující po vymazané periodě. Během přerušení záznamu dochází ke změnám, které pokud jsou významné, tak způsobí velké nepřesnosti při výpočtu fázorů proudů a napětí a ty se přenáší do dalších změřených period. Oblast, ve které k tomuto dochází, je vyznačena červenou kružnicí v předcházejícím průběhu proudu.

Závěrem je potřeba si uvědomit, že je nutné vymyslet lepší postup, kterým odstranit problémy, které jsou vnášeny do vyhodnocení vlivem výpadků záznamů. Výše popsany algoritmus není vhodný a slouží spíše pro inspiraci pro další postup jak naložit s daty, ve kterých se vyskytuje mnoho chyb. Množství chyb v datech za celé 3 – měsíční měření, které mělo být kompletně zanalyzováno je skutečně obrovské. Chyby v záznamech pravděpodobně vznikaly příliš pomalým zápisem na diskové uložení. Pokud tomu je skutečně tak, a chyby záznamu již nebudou vznikat po změně způsobu ukládání dat, nastává otázka, zda nebude výhodnější celé měření provést znovu a zanalyzovat data nová, namísto již změřených dat s chybami. Osobně bych se přikláněl k této variantě, tedy celé měření opakovat.

6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo porovnat převodníky sloužící k měření elektrických veličin v soustavách vysokého napětí. Zejména jsme se v této práci zaměřili na rozbor změřených dat za určité období a na výrobci deklarované přesnosti měření a zda – li jsou tyto udávané technické parametry splněny během běžného provozu v rozvodně 22 kV v Medláncích.

Nejdříve jsme si vizuálně znázornili celý měřicí řetězec s převodníky. Z této vizualizace je patrné, že difference dat není způsobena jen samotnými převodníky, ale také dalšími prvky v soustavě. Například určité nepřesnosti vnáší do měření také analogově – digitální (A/D) převodník, slučovací jednotka SMU615 a ochrana REF615.

Před samotným porovnáním dat bylo nutné odstranit stejnosměrnou složku a vyšší harmonické ze změřených okamžitých hodnot proudů a napětí, jelikož převodníky se zkouší na přesnost při základním sinusovém průběhu s frekvencí 50 Hz – při základní harmonické. Zde je také potencionálně místo, kde mohly vzniknout některé nepřesnosti, jelikož použitý filtr není zcela přesný.

Ze zpracovaných výsledků měření vyplývá, že rozdíl modulů fázorů proudů ve sledovaném období byl mezi 0,1 % až 1,5 % z efektivní hodnoty naměřené PTP. Rozdíl 1,5 % znamená rozdíl v amplitudě proudů o 1,425 A. Rozdíl modulů fázorů napětí byl mezi 1,2 % až 2 % z efektivní hodnoty naměřené PTN. Rozdíl 2 % představuje rozdíl v amplitudě napětí 366 V.

Rozdíl ve fázi fázorů změřených proudů se pohyboval mezi 1 ° a 2 °. U napětí rozdíly byly 10 krát menší – 0,1 ° až 0,2 °.

Celkové chyby, vyjadřující rozdíly mezi okamžitými změřenými hodnotami, u proudů dosahovaly velikosti 1 % až 4 % z efektivní hodnoty naměřené PTP, u napětí byly celkové chyby menší – 1 % až 2 % z efektivní hodnoty naměřené PTN.

Hlavním výsledkem práce kromě vyhodnocení, že naměřené odchylky proudů a napětí mezi přístrojovými transformátory a senzory splňují třídy přesnosti, je upozornění na výskyt vysokého poměru stejnosměrné složky u proudových senzorů. Po celé sledované období se pohyboval v oblasti kolem 10 %, zatímco u PTP, PTN i napěťových senzorů se poměr pohyboval mezi 0 % až 2 % z efektivní hodnoty měřené veličiny. Stejnosměrná složka pravděpodobně vzniká při digitalizaci v A/D převodníku, ale u proudových senzorů příčina vysokého obsahu stejnosměrné složky bude nejspíš i na jiném místě v celkovém měřicím řetězci.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ZOLICH, L. *Nízkovýkonový přístrojový transformátor proudu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 85 s.
- [2] ZIEGLER, J. *Testování jednotek Merging Unit v sestavě s proudovými a napěťovými převodníky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 78 s.
- [3] JANÍČEK, F. *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2004. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 80-227-2135-2
- [4] SMĚŠNÝ M. *Diagnostika přístrojových transformátorů*. Bakalářská práce. Plzeň: Katedra technologií a měření, Západočeská univerzita v Plzni, 2013, 72 stran
- [5] HRYCÍK, T. *Porovnání použití přístrojových transformátorů a senzorů v aplikacích s ochranou REF542plus*. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2010, 60 stran.
- [6] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, *Přístrojové transformátory – Část 8: Elektronické transformátory proudu*, rev. ČSN EN 60044-8.
- [7] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, *Přístrojové transformátory – Část 7: Elektronické transformátory napětí*, rev. ČSN EN 60044-8
- [8] ABB. *Přístrojové transformátory a senzory pro vnitřní použití: Přehled výrobků* [online]. ABB, 2018 [cit. 2019-01-14]. 1VLC000574. Dostupné z: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VLC000574&LanguageCode=cs&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [9] ABB, KECA 80D85 Indoor current sensor (split core type), ABB, 05/2015, 1VLC000722 Rev.en
- [10] ABB, KEVA B Indoor voltage sensor, ABB, 12/2014, 1VLC000714. Rev.1.en
- [11] BAJÁNEK, T. *Systém chránění s využitím výstupu z elektronického senzorického systému měření proudu a napětí*. Dizertační práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2017, 136 stran.
- [12] ORSÁGOVÁ, J.; TOMAN, P.; MLÝNEK, P.; SUMEC, S.; TOPOLÁNEK, D. *Analýza možností využití sampled values v R22kV Medlánky, fáze 1*. 2017
- [13] UCA INTERNATIONAL USERS GROUP, *Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers Using IEC 61850-9-2*, Raleigh, NC 27614, 07/2004
- [14] DRÁPELA, J., ŠLEZINGR, J. a BOK, J. *Ověření sčítání harmonických složek proudů* [online]. Květen 2013 [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/OPVK_ePower/MPQ1/Laboratorni_navod_MPQ1_2.pdf
- [15] SEDLÁČEK, J., STEINBAUER, M., a DREXLER, P. *Časově proměnné veličiny a jejich parametry, harmonická analýza*. Výukové materiály k předmětu BEL1. Brno: Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky FEKT VUT v Brně, 2018.
- [16] WU, Q., Z. LU a T. JI. *Protective relaying of power systems using mathematical morphology*. 1. London: Springer, 2009. ISBN 978-1-84882-498-0.