

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016

Bc. Jiří Ziegler



# 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

## TESTOVÁNÍ JEDNOTEK MERGING UNIT V SESTAVĚ S PROUDOVÝMI A NAPĚŤOVÝMI PŘEVODNÍKY

TESTING OF MERGING UNIT COMPRISING VOLTAGE AND CURRENT  
TRANSDUCERS IN THE SET

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Ziegler

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Topolánek, Ph.D.

BRNO 2016



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**  
Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Jiří Ziegler

**ID:** 147546

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

## Testování jednotek Merging Unit v sestavě s proudovými a napěťovými převodníky

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište aktuální stav poznání v oblasti testovacích systémů a způsobů testování proudových a napěťových převodníků s digitalizovaným výstupem při uvážení celého měřicího řetězce - proudový/napěťový převodník - digitalizační jednotka - slučovací jednotka. Vlastní popis bude vycházet z dostupné literatury a platných či připravovaných standardů.
2. Popište již realizované testovací systémy, uveďte hodnocené charakteristické parametry, jejich způsob vyhodnocení a způsob testování.
3. Definujte charakteristické parametry a jejich kritéria, které je nutné i vhodné v rámci testovacího řetězce hodnotit pro stanovení výsledné chyby měření fáze a amplitudy navrhovaným testovacím systémem.
4. Na základě definovaných parametrů navrhnete testovací systém, který by byl využit pro komplexní testování řetězce U a I převodníků - digitalizační jednotky a slučovací jednotky, která poskytuje digitalizovaný výstup v souladu s IEC 61850-9-2 pro 4 napěťové převodníky a 4 proudové převodníky.
5. Navrhnete výstupní protokol hodnotící funkci sestavy a jejich charakteristických parametrů či vlastností.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 20.5.2016

**Vedoucí práce:** Ing. David Topolánek, Ph.D.

**Konzultant diplomové práce:**

**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:

ZIEGLER, J. *Testování jednotek Merging Unit v sestavě s proudovými a napětovými převodníky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 78 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Topolánek, Ph.D..

Jako autor uvedené diplomové (bakalářské) práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové (bakalářské) 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.

.....



---

## ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na testování a návrh testovací sestavy proudových a napěťových převodníků napojených na slučovací jednotku, která poskytuje digitalizovaný výstup v souladu s IEC 61850-9-2. Parametry a charakteristické vlastnosti testovací sestavy jsou stanoveny na základě principu funkce slučovací jednotky a standardů zabývajících se testováním převodníků. Navržená testovací sestava je založena na modulárním systému PXI Express od společnosti National Instruments. Její návrh je proveden s ohledem na možnosti generování a měření zkušebních signálů pro napětí až 38,4 kV a proudu až 2000 A. Navržená sestava splňuje kritéria pro účely testování převodníků třídy přesnosti až 0,5. Za předpokladu kalibrace navržené sestavy jako celku, má tato sestava potenciál pro splnění technických požadavků, pro testování převodníků třídy přesnosti až 0,1.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Testovací sestava; Slučovací jednotka; IEC 61850-9-2; Třída přesnosti, Kalibrační systém

## ABSTRACT

The diploma thesis is focused on testing and design of a test system of merging unit which provides digital output according to IEC 61850-9-2. The parameters and distinguishing features of the test system are based on functional principles of merging unit and standards dealing with the testing of transducers. The proposed test system is based on modular PXI Express system from National Instruments. The desing is performed with respect to the possibility of generating test signals and measurements for voltage up to 38.4 kV and current up to 2000 A. The proposed test system meets the criteria for testing transducers of accuracy class up to 0.5. Assuming of calibration designed test system as a whole, this test setup has the potential to meet the technical requirements for testing transducers of accuracy class up to 0.1.

**KEY WORDS:** Test system; Merging unit; IEC 61850-9-2; Accuracy class; Calibration system

# OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK .....	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD.....	17
2 DEFINICE DŮLEŽITÝCH POJMŮ .....	18
2.1 DEFINICE POJMŮ PRO PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY A ELEKTRONICKÉ PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY.....	18
2.2 DEFINICE POJMŮ PRO ELEKTRONICKÉ TRANSFORMÁTORY S DIGITÁLNÍM VÝSTUPEM .....	19
2.3 DEFINICE POJMŮ ČASOVÁNÍ A SYNCHRONIZACE.....	19
3 ELEKTRONICKÉ PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY.....	21
3.1 MODERNÍ TECHNOLOGIE PROUDOVÉHO MĚŘENÍ.....	21
3.1.1 PROUDOVÉ TRANSFORMÁTORY NÍZKÉHO VÝKONU (LPCT).....	22
3.1.2 MĚŘENÍ PROUDU POMOCÍ ROGOWSKÉHO CÍVKY .....	22
3.1.3 PROUDOVÉ MĚŘENÍ VYUŽÍVAJÍCÍ FARADAYŮV OPTICKÝ JEV .....	23
3.2 MODERNÍ TECHNOLOGIE MĚŘENÍ NAPĚTÍ .....	24
3.2.1 MĚŘENÍ NAPĚTÍ POMOCÍ DĚLIČŮ .....	24
3.3 DIGITÁLNÍ ROZHRANÍ ELEKTRONICKÝCH PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ .....	25
3.4 SLUČOVACÍ JEDNOTKA - <i>MERGING UNIT</i> (MU) .....	27
3.4.1 PPS ( <i>PULSE PER SECOND</i> ).....	29
3.4.2 PTP ( <i>PRECISION TIME PROTOCOL</i> ) .....	29
3.5 IEC 61850-9-2 .....	31
4 PŘÍRAZENÍ TŘÍDY PŘESNOSTI.....	32
4.1 MĚŘICÍ A JISTICÍ ÚČELY.....	32
4.1.1 FÁZOVÁ CHYBA ( $\Phi_E$ ) .....	32
4.1.2 AMPLITUDOVÁ CHYBA.....	33
4.1.3 TŘÍDY PŘESNOSTI DLE IEC 60044 .....	33
4.2 CHARAKTERISTICKÉ ZKUŠEBNÍ HODNOTY .....	36
4.2.1 CHARAKTERISTICKÉ ZKUŠEBNÍ HODNOTY NAPĚTÍ.....	37
4.2.2 CHARAKTERISTICKÉ ZKUŠEBNÍ HODNOTY PROUDU .....	37
4.2.3 SOUHRN CHARAKTERISTICKÝCH ZKUŠEBNÍCH HODNOT .....	38
5 REALIZOVANÉ TESTOVACÍ SESTAVY .....	39
5.1 OBECNÉ SCHÉMA TESTOVACÍ SESTAVY .....	39
5.1.1 KOMPONENTY SESTAVY A JEJICH FUNKCE .....	40
5.1.2 ZPŮSOB VYHODNOCENÍ .....	42
5.2 KOMERČNÍ TESTOVACÍ SESTAVA.....	43
6 NÁVRH TESTOVACÍ SESTAVY .....	47
6.1 KOMPONENTY NAVRŽENÉ SESTAVY .....	48



---

6.1.1 MODULÁRNÍ SYSTÉM NI PXIE-1062Q .....	48
6.1.2 ZDROJE PRIMÁRNÍHO SIGNÁLU .....	50
6.1.3 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ .....	51
6.1.4 ZAŘÍZENÍ PRO SYNCHRONIZACI MĚŘENÍ .....	56
<b>6.2 ZPŮSOB SYNCHRONIZACE A AKVIZICE DAT .....</b>	<b>56</b>
<b>6.3 ROZBOR AMPLITUDOVÉ CHYBY A CHYBY ÚHLU .....</b>	<b>57</b>
6.3.1 VÝPOČET AMPLITUDOVÉ A FÁZOVÉ CHYBY .....	59
6.3.2 ZDROJE FÁZOVÉ CHYBY NAVRŽENÉ SESTAVY .....	59
6.3.3 METROLOGICKÉ POŽADAVKY NAVRŽENÉ SESTAVY .....	67
<b>7 DEFINOVÁNÍ TESTŮ .....</b>	<b>68</b>
7.1 TESTY PŘESNOSTI .....	68
7.2 DLOUHODOBÉ TESTY .....	71
7.3 TESTY DIGITÁLNÍHO VÝSTUPU .....	71
<b>8 ZÁVĚR.....</b>	<b>72</b>
<b>9 ZDROJE.....</b>	<b>74</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>77</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Hodiny</i> .....	19
<i>Obrázek 2: Akvizice dat pomocí vzorkovacích hodin</i> .....	20
<i>Obrázek 3: Princip funkce konvenčního transformátoru proudu [17]</i> .....	21
<i>Obrázek 4: Princip funkce proudového transformátoru nízkého výkonu [17]</i> .....	22
<i>Obrázek 5: Rogowského cívka [1]</i> .....	23
<i>Obrázek 6: Proudový senzor pracující na principu Faradayova optického jevu [18]</i> .....	23
<i>Obrázek 7: Zjednodušené schéma RC děliče [17]</i> .....	25
<i>Obrázek 8: Propojení mezi převodníky a sekundárním zařízením - konvenční rozhraní (vlevo), digitální rozhraní (vpravo)[17]</i> .....	26
<i>Obrázek 9: Slučovací jednotka [17]</i> .....	26
<i>Obrázek 10: Schéma řetězce převodníku s digitálním výstupem</i> .....	27
<i>Obrázek 11: Zjednodušené blokové schéma slučovací jednotky [19]</i> .....	28
<i>Obrázek 12: Časové zpoždění způsobené slučovací jednotkou</i> .....	28
<i>Obrázek 13: Signál 1 PPS</i> .....	29
<i>Obrázek 14: Jednoduchý systém podle IEEE 1588 s komponenty OC a BC [20]</i> .....	30
<i>Obrázek 15: Obecné schéma testovací sestavy [16]</i> .....	39
<i>Obrázek 16: Chyba reprezentovaná jako fázor</i> .....	42
<i>Obrázek 17: Schéma testovací sestavy Omicron pro proudové převodníky</i> .....	44
<i>Obrázek 18: Schéma testovací sestavy Omicron pro napěťové převodníky</i> .....	44
<i>Obrázek 19: Zařízení TICRO 100 [9]</i> .....	45
<i>Obrázek 20: Zařízení DANEO 400 [10]</i> .....	45
<i>Obrázek 21: Navržená testovací sestava</i> .....	48
<i>Obrázek 22: Schéma uspořádání hodinových a spouštěcích signálů v šasi PXI a PXIe [24]</i> .....	49
<i>Obrázek 23: Navržená sestava modulárního systému PXIe-1062Q [14].</i> .....	49
<i>Obrázek 24: Generátorová karta PXI-5421 [14]</i> .....	50
<i>Obrázek 25: Digitizér PXI-4462 [27]</i> .....	52
<i>Obrázek 26: Referenční proudový převodník LEM ITZ 5000-SB FLEX UTRASTAB[28]</i> .....	53
<i>Obrázek 27: Průběh vzorkování hodnot</i> .....	57
<i>Obrázek 28: Zjednodušené schéma sestavy</i> .....	58
<i>Obrázek 29: Chyba fáze vyplývající ze zpoždění A/D převodníku a reakčního času digitizéru [32]</i> .....	60
<i>Obrázek 30: Porovnání synchronně měřených signálů před kompenzací [33]</i> .....	60

---

<i>Obrázek 31: Porovnání synchronně měřených signálů po kompenzaci zpoždění filtru A/D převodníku [33].....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 32: Stanovení reakčního času .....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 33: Porovnání synchronně měřených signálů po kompenzaci zpoždění filtru A/D převodníku a reakčního času[33].....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 34: Blokové schéma obvodů analogového vstupu PXI-4462 [36].....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 35: Obecný cyklus klimatického testu .....</i>	<i>70</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Třídý přesnosti a jejich mezní hodnoty dle IEC 60044-7 [2] .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 2: Maximální příspěvek k amplitudové a fázové chybě převodu analogu na SV [5] .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 3: Zkušební napětí pro zkoušky vzhledem k harmonickým [3].....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 4: Třídý přesnosti a jejich mezní hodnoty pro vyšší harmonické [3].....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 5: Dovolené meze amplitudové chyby pro ECT třídy přesnosti 3 a 5 [3].....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 6: Třídý přesnosti a jejich mezní hodnoty dle IEC 60044-8 [3] .....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 7: Maximální příspěvek k amplitudové a fázové chybě převodu analogu na SV [5] .....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 8: Zkušební napětí pro měřicí a jisticí třídy přesnosti EVT dle jmenovitých primárních napětí.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 9: Maximální chyby měření analogových vstupů DANEO 400 [10] .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 10: Výstupní hodnoty proudu a napětí zesilovače .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 11: Technické parametry karty PXI-4462 [14] .....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 12: Hlavní parametry proudového referenčního převodníku LEM ITZ 5000-SB.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 13: Hlavní parametry proudových referenčních převodníků pro 600 a 200 A.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 14: Přehled přesnosti měření převodníků v závislosti na velikosti <math>I_{p\_p}</math>.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 15: Jednotvárnost analogového vstupu karty PXI-4462 .....</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 16: Velkosti DC offsetu v závislosti na zvoleném rozsahu .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 17: Přehled metody zpracování signálu v závislosti na nastaveném rozsahu [36] .....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 18: Souhrnné hodnoty chyb měření.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 19: Souhrnné hodnoty chyb měření.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 20: Koncepce testů proudové linearity.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 21: Koncepce testů napětové linearity .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 22: Koncepce testů frekvenční odezvy.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 23: Kombinace klimatických testů proudových převodníků.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 24: Kombinace klimatických testů napětových převodníků .....</i>	<i>71</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\nu$	Okolní teplota	[°C]
$\vec{I}_{r(s)}$	Fázor proudu měřeného referencí	[A]
$\vec{I}_{x(s)}$	Fázor měřeného proudu převodníkem	[A]
$\vec{\epsilon}_{(s)k}$	Fázor chyby dané harmonické	[%]
$\Delta t_{trig}$	Časové zpoždění triggeru	[s]
$C_1$	Kapacita primárního kapacitoru	[F]
$C_2$	Kapacita sekundárního kapacitoru	[F]
$f$	Frekvence	[Hz]
$f_r$	Jmenovitá frekvence	[Hz]
$I_{cth}$	Trvalý tepelný proud	[A]
$I_p$	Efektivní hodnota primárního proudu	[A]
$I_{p(n)}$	TRMS hodnota primárního proudu n-tého vzorku	[A]
$I_{p\_p}$	Primární proud měřený převodníkem	[A]
$I_{pr}$	Jmenovitý primární proud	[A]
$I_{pr\_p}$	Jmenovitý primární proud převodníku	[A]
$I_{sr}$	Jmenovitý sekundární proud	[A]
$N_1$	Počet závitů primárního vinutí	[z]
$N_2$	Počet závitů sekundárního vinutí	[z]
$R_1$	Odpor primárního rezistoru	[Ω]
$R_2$	Odpor sekundárního rezistoru	[Ω]
$R_{sh}$	Odpor bočnicku	[Ω]
$T$	Doba jedné periody	[s]
$t$	Čas	[s]
$T_s$	Časové rozmezí mezi dvěma vzorky primárního proudu	[s]
THD	Celkové harmonické zkreslení	[%]
$U_{S\_ref}$	Sekundární napětí referenčního převodníku	[V]
$U_p$	Efektivní hodnota primárního napětí	[V]
$U_{p(n)}$	TRMS hodnota primárního napětí n-tého vzorku	[V]
$U_{pn}$	Jmenovitá hodnota primárního napětí	[V]
$U_{pr}$	Primární napětí	[V]

$U_s$	Efektivní hodnota sekundárního napětí	[V]
$U_{s(n)}$	Hodnota sekundárního napětí n-tého vzorku	[V]
$U_{SR}$	jmenovité sekundární napětí	[V]
$U_t$	Testovací napětí	[V]
$V_{P-P}$	Hodnota napětí špička-špička	[V]
$f_r$	Jmenovitý kmitočet	[Hz]
$i_{p\_RC}$	Okamžitá hodnota primárního proudu Rogowského cívky	[A]
$k$	Řád měřené harmonické	[-]
$k_r$	Jmenovitý převod převodníku	[-]
$M$	Vzájemná indukčnost	[H]
$N$	Počet vzorků	[-]
$n$	Vzorek	[-]
$s$	Identifikátor daného vzorku, pro který je chyba počítána	
$t_{dr}$	Jmenovité zpoždění	[s]
$t_n$	Čas, kdy byl měřen n-tý vzorek primárního proudu	[s]
$u_{s\_RC}$	Sekundární napětí Rogowského cívky	[V]
$\varepsilon$	Amplitudová chyba	[%]
$\varepsilon_{4462}$	Amplitudová chyba rozsahu karty PXI-4462	[%]
$\varepsilon_{9-2LE}$	Amplitudová chyba převodu signálu na IEC 61850-9-2LE	[%]
$\varepsilon_{A/D}$	Amplitudová chyba A/D převodu	[%]
$\varepsilon_{DC-offset}$	Amplitudová chyba způsobená DC offsetem	[%]
$\varepsilon_{Flatness}$	Amplitudová chyba jednotvárnosti analogového vstupu	[%]
$\varepsilon_{Gain}$	Amplitudová chyba daného rozsahu	[%]
$\varepsilon_{RS\_I}$	Amplitudová chyba proudového měření	[%]
$\varepsilon_{RS\_U}$	Amplitudová chyba napěťového měření	[%]
$\varepsilon_{Ref\_A}$	Amplitudová chyba referenčního převodníku	[%]
$\varepsilon_{analog}$	Amplitudová chyba analogové části převodníku	[%]
$\varepsilon_{c(s)}$	Kompozitní chyba	[%]
$\varepsilon_{i(n)}$	Amplitudová chyba proudu n-tého vzorku	[%]
$\varepsilon_r$	Amplitudová chyba převodníku	[%]
$\varepsilon_{ref\_I}$	Amplitudová chyba referenčního převodníku proudu	[%]
$\varepsilon_{ref\_U}$	Amplitudová chyba referenčního převodníku napětí	[%]

$\varepsilon_{(s)k}$	Amplitudová chyba dané harmonické	[%]
$\varepsilon_{u(n)}$	Amplitudová chyba napětí n-tého vzorku	[%]
$\varphi$	Chyba úhlu	[°];[']
$\varphi_{9-2LE}$	Chyba úhlu převodu signálu na IEC 61850-9-2LE	[°];[']
$\varphi_{A/D}$	Chyba úhlu A/D převodu	[°];[']
$\varphi_P$	Úhel primárního signálu	[°];[']
$\varphi_{RS\_U}$	Fázová chyba referenčního měření napětí	[°];[']
$\varphi_{RS\_I}$	Fázová chyba referenčního měření proudu	[°];[']
$\varphi_S$	Úhel sekundárního signálu	[°];[']
$\varphi_{analog}$	Chyba úhlu analogové části převodníku	[°];[']
$\varphi_e$	Fázová chyba	[°];[']
$\varphi_{or}$	Jmenovitá fázová odchylka	[°];[']
$\varphi_{ref}$	Chyba úhlu referenčního měření	[°];[']
$\varphi_{ref\_P}$	Chyba úhlu referenčního převodníku	[°];[']
$\varphi_{ref\_I}$	Chyba úhlu referenčního převodníku proudu	[°];[']
$\varphi_{ref\_U}$	Chyba úhlu referenčního převodníku napětí	[°];[']
$\varphi_{(s)k}$	Fázová chyba dané harmonické	[°];[']
$\varphi_{tdr}$	Chyba úhlu způsobená jmenovitým časovým zpožděním	[°];[']
$\varphi_{trig}$	Chyba úhlu způsobená zpožděním triggeru	[°];[']
$\omega$	Úhlová frekvence	[rad/s]
1 PPS	Jeden puls za sekundu	
10 PPS	Deset pulzů za sekundu	
100 PPS	Sto pulzů za sekundu	
BC	Hraniční hodiny	
BMC	Best Master Clock	
CT	Přístrojový transformátor proudu	
ČMI	Český Metrologický institut	
DFT	Diskrétní Fourierova transformace	
DSP	Digitální signálový procesor	
ECT	Elektronický transformátor proudu	
EMC	Elektromagnetická kompatibilita	
EVT	Elektronický transformátor napětí	
IDE	Inteligentní elektronické relé	

---

IT	Přístrojový transformátor
LPCT	Proudový transformátor nízkého výkonu
MU	Slučovací jednotka
NTP	Network Time Protocol
OC	Obyčejné hodiny
OCXO	Vyhřívaný krystalový oscilátor
PPS	Puls za sekundu
ppm	Jedna miliontina ( <i>Parts per milion</i> )
ppb	Jedna miliardtina ( <i>Parts per bilion</i> )
PPX	X pulzů za sekundu
PTP	Precision Time Protocol
PXI	<i>PCI eXtensions for Instrumentation</i>
PXIe	<i>PCI eXtensions for Instrumentation Express</i>
RC dělič	Odporově-kapacitní dělič
RMS	Efektivní hodnota
SV	Sampled Values
TC	Transparent clock
TCXO	Teplotně kompenzovaný krystalový oscilátor
TPM	Technický předpis metrologický
UEEN	Ústav elektroenergetiky
VT	Přístrojový transformátor napětí



# 1 ÚVOD

Měření elektrických veličin je nedílnou součástí silnoproudé elektrotechniky. Je využíváno pro širokou škálu aplikací od automatizace přes chránění strojů velkých výkonů, až po řízení a chránění rozsáhlých energetických soustav. S postupným rozvojem průmyslu dochází také k rozvoji energetiky a měření v této oblasti. Dle jednotlivých aplikací jsou kladeny různé nároky na konstrukci a vlastnosti měřicích přístrojů a to od pouhé indikace napětí či proudu, až po tarifní měření, kde je vyžadována nejvyšší přesnost těchto přístrojů [1].

Vzhledem k tomu, že k systémům vysokého napětí nelze připojit klasické měřicí přístroje, jsou hojně využívány převodníky proudu a napětí, známé pod pojmem přístrojové transformátory, které převádí vysoké úrovně proudu a napětí na menší, standardní, které jsou vhodné pro jistící, měřicí a regulační přístroje. Ve stávajících instalacích jsou pro tyto účely nejčastěji používány konvenční přístrojové transformátory, poskytující analogový obraz měřené veličiny.

V nových nebo modernizovaných rozvodnách se již preferuje nekonvenční způsob měření napětí a proudu, jež zajišťují elektronické přístrojové transformátory. Výstupní signál u těchto přístrojů může být analogový, v řádu milivoltů a voltů, digitální nebo jinak měřitelný nízkou úroňový signál.

V současné době mnoho výrobců vyvíjí celou řadu elektronických přístrojových transformátorů s digitálním výstupem. Aby tyto přístroje mohly být uvedeny na trh, musí splňovat určitá kritéria, která jsou povinně ověřována. Jedná se především o ověření na přesnost, elektrickou odolnost a EMC.

Stejně tak, jak jsou vyvíjeny tyto nové přístroje, je nutné vyvinout i měřicí systémy pro jejich testování. Obsah této práce je právě věnován návrhu měřicího systému, který bude sestaven tak, aby bylo možné zkoušet elektronické přístrojové transformátory s digitálním výstupem dle platných standardů. Současně by měl být měřicí systém natolik flexibilní, aby byl použitelný i pro požadavky standardů budoucích.

## 2 DEFINICE DŮLEŽITÝCH POJMŮ

### 2.1 Definice pojmů pro přístrojové transformátory a elektronické přístrojové transformátory

Níže jsou vysvětleny definice, které se používají při popisu přístrojových transformátorů a elektronických přístrojových transformátorů, dle evropské normy IEC. [2]; [3]

**Přístrojový transformátor (IT):** transformátor určený k převodu měřené veličiny na hodnotu vhodnou pro připojení do měřících přístrojů, elektroměrů a ochran

**Elektronický přístrojový transformátor:** uspořádání sestávající se z jednoho nebo více proudových nebo napěťových převodníků, které mohou být zapojeny do přenosového systému. Toto uspořádání je určeno k převodu měřené veličiny pro měřicí přístroje, elektroměry, ochrany a řídicí zařízení; v případě digitálních rozhraní je uspořádání dáno použitím slučovací jednotky pro soubor elektronických přístrojových transformátorů

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

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

**Jistící transformátor proudu:** transformátor proudu určený pro přenášení informačního signálu do ochranných a ovládacích zařízení

**Elektronický transformátor napětí (EVT):** elektronický přístrojový transformátor, u něhož je za normálních provozních podmínek sekundární napětí v podstatě úměrné primárnímu napětí; fázový posun mezi vektory primárního a sekundárního napětí se při vhodném způsobu zapojení blíží k nule

**Jmenovitý kmitočet ( $f_r$ ):** hodnota základního kmitočtu sítě

**Chyba proudu:** chyba, kterou ECT vnáší do měření proudu, a která vyplývá ze skutečnosti, že skutečný převod transformátoru se nerovná jmenovitému převodu transformátoru

**Chyba napětí:** chyba, kterou EVT vnáší do měření napětí, a která vyplývá ze skutečnosti, že skutečný převod transformátoru se nerovná jmenovitému převodu transformátoru

**Chyba úhlu ( $\varphi$ ):** pro digitální výstup je to čas mezi okamžikem, kdy se určitý proud/napětí vyskytuje mezi primárními svorkami a okamžikem začátku přenosu souvisejícího souboru digitálních údajů do výstupu slučovací jednotky. Chyba úhlu se skládá ze dvou složek: jmenovité fázové odchylky ( $\varphi_{or}$ ) a jmenovitého zpoždění ( $t_{dr}$ )

**Jmenovité zpoždění ( $t_{dr}$ ):** jmenovitá hodnota času, který je potřebný například pro zpracování digitálních údajů a jejich přenos. Vliv na tuto dobu může mít například prožití různých filtrů a digitální zpracování signálu

**Jmenovitá fázová odchylka ( $\varphi_{or}$ ):** jmenovitá chyba úhlu, která je způsobena použitou technologií, a která není ovlivněna kmitočtem. Například fázový úhel mezi primárním proudem a sekundárním napětím u Rogowského cívky je vzhledem k použité technologii posunut o 90 °.

**Fázová chyba ( $\varphi_e$ ):** fázová chyba je chyba úhlu  $\varphi$  minus chyba způsobená jmenovitou fázovou odchylkou a jmenovitým zpožděním, fázová chyba se vztahuje ke jmenovitému kmitočtu. Pro digitální výstup určený k synchronizaci s časovými impulsy představuje chyba úhlu čas mezi časovým impulsem a vzorkováním primárního proudu náležejícímu odpovídající digitálně přenášené hodnotě.

**Třída přesnosti:** označení přiřazené ECT/EVT, jehož chyba proudu/napětí a chyba úhlu nepřekročí povolené mezní hodnoty v předepsaných provozních podmínkách

**Jmenovitý zvýšený primární proud:** primární proud, do jehož dosažení je zaručena stejná přesnost jako při jmenovitém primárním proudu

**Trvalý tepelný proud ( $I_{cth}$ ):** hodnota proudu, který může trvale protékat přes primární svorky při zapojení primární zátěže k sekundárnímu analogovému výstupu, aniž by došlo k nadměrnému oteplení

## 2.2 Definice pojmů pro elektronické transformátory s digitálním výstupem

**Digitální výstup:** digitální výstup je tvořen optickým nebo elektrickým výstupním rozhraním na slučovací jednotce. Napájí měřicí přístroje, elektroměry, jisticí a řídicí zařízení digitálně kódovanými, časově spojitými signály

**Slučovací jednotka (*Merging Unit* - MU):** fyzická jednotka k vytváření časově spojitě kombinace proudových a/nebo napěťových údajů přicházejících ze sekundárních převodníků; slučovací jednotka může být součástí jednoho z transformátorů v rozváděči nebo může být samostatnou jednotkou, například ve velínu rozvodny

**Časový vstup slučovací jednotky:** elektrický nebo optický vstup, který může být použit k synchronizaci několika slučovacích jednotek, pokud je to požadováno

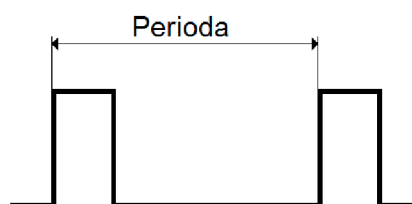
**Datová rychlost:** počet proudových a/nebo napěťových datových souborů přenesených za sekundu

## 2.3 Definice pojmů časování a synchronizace

**Spouštěcí signál (*Trigger*):** Trigger, je hardwarová nebo softwarová událost, která vyzývá k akci, jako je například spuštění nebo zastavení akvizice dat.

**Událost (*Event*):** Jev určitého významu. Pojem událost a trigger jsou téměř identické. Lze si jej představit například jako stisknutí tlačítka pro zahájení určité akce

**Hodiny (*Clock*):** Periodická posloupnost rovnoměrně rozložených událostí s pevně danou periodou.

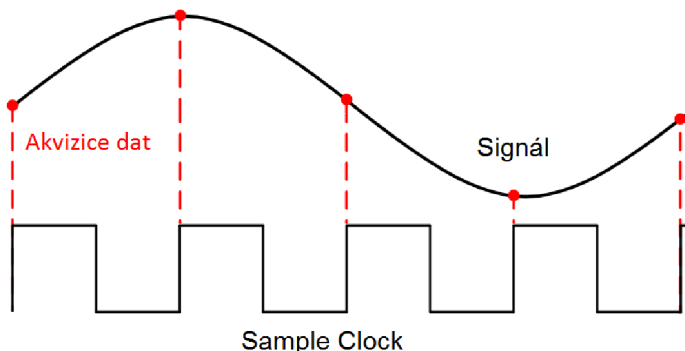


Obrázek 1: Hodiny

**Referenční hodiny (Reference Clock):** hodinový signál, na který se odkazují hodiny jiného systému odvozených od referenčních hodin

**Odvozené hodiny (Derived Clock):** Násobek nebo podíl referenčních hodin, za účelem získání pomalejších nebo rychlejších hodin než jsou hodiny referenční

**Vzorkovací hodiny (Sample Clock):** Řídí časování snímání vzorků při procesu akvizice dat. Obrázek 2 znázorňuje příklad vzorkovacích hodin.



*Obrázek 2: Akvizice dat pomocí vzorkovacích hodin*

**PXI\_CLK10\_IN:** Signál, který může nahradit základní 10 MHz hodiny na sběrnici šasi. PXI\_CLK10\_IN může být brán z oscilátoru na desce karty nebo z externího vstupu zapojeného v CLKIN

**PXI\_CLK10:** Hodinový 10 MHz signál sběrnice PXI. Může být nahrazen PXI\_CLK10\_IN

**CLKIN:** signál připojen na stejnojmenný vstup. Může být distribuován do PXI\_CLK10\_IN

**CLKOUT:** Výstupní signál na stejnojmenném konektoru. Signál CLKOUT může být stejný s PXI\_CLK10\_IN

**PFI<0..5>:** Programovatelný vstup/výstup, distribuuje hodinový a trigrovací signál mezi více šasi nebo moduly

**PXI\_TRIG<0..7>:** PXI trigrovací sběrnice se sestavuje z 8 digitálních linek sdílených se všemi sloty šasi. Vstup dokáže distribuovat širokou škálu signálů do těchto linek

### 3 ELEKTRONICKÉ PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY

Jak již bylo předesláno v úvodu, elektronické přístrojové transformátory jsou zařízení, které slouží pro převod napětí a/nebo proudu na hodnoty, které jsou vhodné pro jisticí, měřicí a regulační přístroje. Pro návrh testovací sestavy těchto převodníků je vhodné znát jejich funkční princip, a proto bude následující odstavec věnován používaným technologiím pro měření proudu a napětí v systémech vysokého napětí. Bude zde objasněn princip funkce těchto převodníků a také budou vysvětleny jejich výhody v porovnání s dnes již dobře známými konvenčními přístrojovými transformátory.

Důležitým krokem do světa chytrých sítí je integrace těchto nových principů do digitální komunikace. Rozhraní pro digitální komunikaci zjišťuje slučovací jednotka, díky které mohou být hodnoty měřeného proudu a napětí distribuovány k měřicím a ochranným přístrojům na velké vzdálenosti.

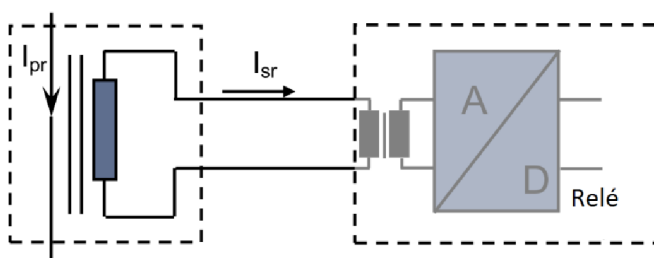
#### 3.1 Moderní technologie proudového měření

Pro porovnání s novými technologiemi je vhodné nejdříve představit, dnes již klasickou metodu konvenčních přístrojových transformátorů proudu (CT). Jejich princip je dobře znám a proto bude popis velmi stručný. Konvenční převodníky pracují na principu elektromagnetické indukce, kdy se díky magnetickému jádru transformátoru indukuje do sekundárního vinutí proud. Tento princip je znázorněn na Obrázku 3. Naindukovaný sekundární proud věrně reprezentuje proud primární. Velikost sekundárního proudu lze jednoduše stanovit podle počtu závitů mezi primárním a sekundárním vinutí podle rovnice (1).

$$I_{sr} = \frac{N_1}{N_2} * I_{pr} \quad (1)$$

$I_{sr}$  – jmenovitý sekundární proud,  $N_1$ - počet závitů primárního vinutí,  $N_2$ - počet závitů sekundárního vinutí,  $I_{pr}$  – jmenovitý primární proud

Vzhledem k nelineární magnetizační charakteristice magnetického jádra, záleží přesnost transformace na velikosti primárního proudu a zatížení transformátoru.



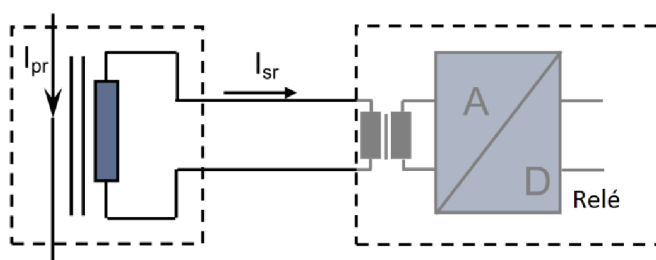
Obrázek 3: Princip funkce konvenčního transformátoru proudu [17]

Konvenční přístrojové transformátory nejsou navrženy jen na to, aby jejich sekundární signál poskytoval přesný obraz primárního proudu, kdy je převod transformátorů zatížen jen malou chybou způsobenou ztrátami v magnetickém obvodu transformátoru. Jejich návrh také počítá s tím, aby poskytovaly nezbytný výstupní výkon pro napájení elektromechanických relé a také, aby se vypořádaly se zatížením v podobě metalického propojení.

V současné době, jsou využívány moderní zařízení s mikroprocesory a není požadován takový výstupní výkon proudových transformátorů. Právě pro tyto zařízení byly vyvinuty nové proudové převodníky.

### 3.1.1 Proudové transformátory nízkého výkonu (LPCT)

Proudové transformátory nízkého výkonu stále využívají transformační princip s magnetickým jádrem a sekundárním vinutím. Rozdíl je ovšem v tom, že u těchto transformátorů je sekundární vinutí zkratováno přes přesný bočník. Tento odporový bočník je součástí sekundárního vinutí a tvoří tak výstupní signál v podobě úbytku napětí na bočniku. Princip funkce proudového transformátoru nízkého výkonu je na Obrázku 4.



Obrázek 4: Princip funkce proudového transformátoru nízkého výkonu [17]

Tyto transformátory jsou definovány standardem IEC 60044-8 [3]. Výstupní hodnota sekundárního napětí  $U_{sr}$  je úměrná primárnímu proudu. Typická hodnota sekundárního napětí těchto převodníků je 22,5 mV pro primární proud 50 A. Pro velikost sekundárního napětí platí následující vztah.

$$U_{sr} = R_{sh} \frac{N_1}{N_2} * I_{pr} \quad (2)$$

$U_{sr}$  – jmenovité sekundární napětí,  $R_{sh}$  – odpor bočníku

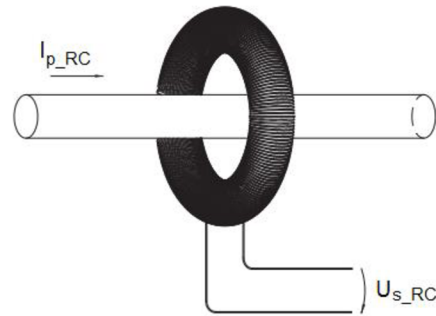
Převodníky založené na tomto principu jsou schopné měřit primární proudy až do 2500 A s velmi dobrou přesností měření 0,1 %. Stejný převodník je také schopen pokrýt požadavky na měření i jištění zároveň.

Zátěž proudových transformátorů nízkého výkonu je definována jako vstupní impedance připojeného zařízení k sekundárním svorkám.

Použitím proudového transformátoru nízkého výkonu umožňuje normalizaci proudových transformátorů. Stejně fyzické zařízení může být použito pro širokou škálu primárních proudů a aplikací jako je měření a chránění. Dále může být nahrazen vysoký počet různě dimenzovaných konvenčních transformátorů menším počtem transformátorů nízkého výkonu.

### 3.1.2 Měření proudu pomocí Rogowského cívky

Další typ převodníku proudu, který disponuje napěťovým výstupem, je založen na technologii vzduchové cívky, známé jako Rogowského cívka. Sekundární vinutí je navinuto na nemagnetickém jádře, toto uspořádání je na Obrázku 5.



Obrázek 5: Rogowského cívka [1]

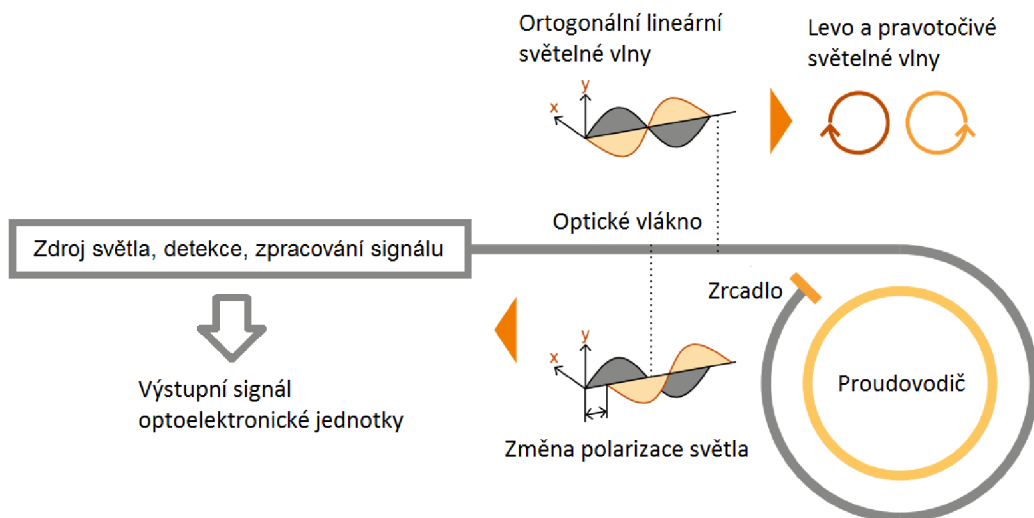
Výhodou této technologie je, že nevykazuje žádný vliv přesycení jádra, a proto je vhodná pro měření vysokých hodnot primárního proudu. Rogowského cívka má sekundární napěťový výstup úměrný časové derivaci primárního proudu. Při měření sinusového průběhu primárního proudu produkuje fázový posuv sekundárního napětí o  $90^\circ$ . Proto, abychom získali pravý obraz primárního proudu, musí být výstupní napětí integrováno. Pro sekundární napětí vzduchové cívky platí vztah (3).

$$u_{s\_RC} = M \frac{di_{p\_RC}(t)}{dt} \quad (3)$$

$u_{s\_RC}$  – sekundární napětí Rogowského cívky,  $M$  – vzájemná indukčnost,  $t$  – čas,  $i_{p\_RC}$  – okamžitá hodnota primárního proudu Rogowského cívky

### 3.1.3 Proudové měření využívající Faradayův optický jev

Tento senzor využívá optické vlákno nebo skleněný kruh jako snímač. Tímto snímačem putuje lineární polarizovaná světelná vlna. V případě přítomnosti magnetického pole dochází ke změně směru polarizace. Díky generaci magnetického pole primárním proudem je tímto způsobem možné měřit jeho velikost. Změnu polarizace světla analyzuje optoelektronická jednotka, která pak poskytuje výstupní signál odpovídající velikosti změny polarizace, resp. velikosti měřeného proudu. Na Obrázku 6 je zobrazen princip proudového měření pomocí Faradayova optického jevu.



Obrázek 6: Proudový senzor pracující na principu Faradayova optického jevu [18]

Senzory založené na Faradayově jevu nevykazují vlivy saturace a jsou lineární do vysokých hodnot měřených proudů. Pomocí optických senzorů je možné provádět měření v rozsahu od stejnosměrného proudu až po vysoké frekvence v řádu kHz. Toto měření je však limitováno optoelektronickou jednotkou. V mnohých případech je zapotřebí použití dvou senzorů pro zajištění měřicí a jisticí funkce. Navíc je zde poměrně obtížné provedení nastavení rozhraní mezi optickou a elektronickou částí systému. Zároveň jsou proudové snímače citlivé na teplotu, a proto musí být kompenzovány.

## 3.2 Moderní technologie měření napětí

Hlavním požadavkem pro napěťové převodníky je poskytování vhodného sekundárního signálu pro měřicí a ochranné zařízení používané v přenosových a distribučních sítích. Tyto převodníky převádějí vysokonapěťový signál na měřitelný nízkonapěťový signál a zároveň izolují tento signál od vysokonapěťového potenciálu vedení.

Pro napěťové převodníky jsou využívány následující principy:

- Induktivní napěťový transformátor
- Napěťové děliče
  - o Odporové děliče
  - o Kapacitní děliče
  - o Odporově-kapacitní děliče

Technologie induktivních napěťových transformátorů (VT) se používají řadu let. Tyto transformátory jsou navrženy pro měření napětí o průmyslové frekvenci 50 Hz nebo 60 Hz. Jejich přesnost měření napětí vyšších frekvencí je poněkud omezená, proto nejsou příliš vhodné pro měření vyšších harmonických a přechodových jevů.

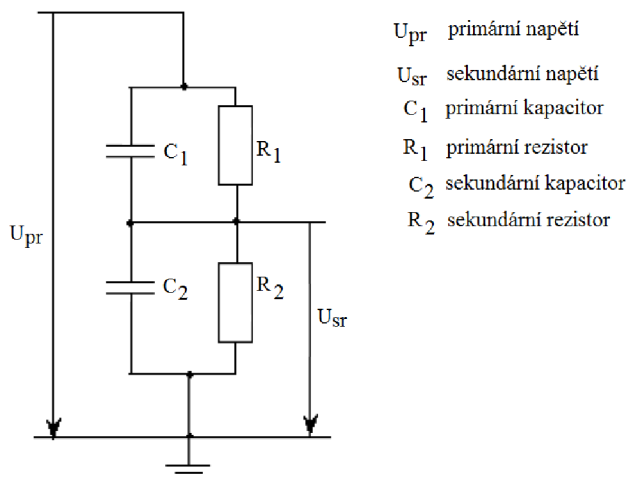
Tyto konvenční převodníky poskytují výstupní výkon až několik 100 VA. Obdobně, jako u proudových induktivních převodníků. Vzhledem k tomu, že moderní technologie již nevyžadují takové nároky na výkon se v současnosti pro měření napětí často využívají převodníky založené na děličích.

### 3.2.1 Měření napětí pomocí děličů

Pro měření napětí byly vyvinuty převodníky založené na technologii vysoko odporových nebo kapacitních děličů. Pomocí odporových děličů je možné dosáhnout vynikajících přesnostních vlastností, ale horších vlastností vzhledem k měření vyšších frekvencí.

U kapacitních děličů je zase problematika nestálosti převodu a fázového posuvu způsobeného změnou zátěže. Výsledkem kombinace odporových a kapacitních děličů je odporově-kapacitní dělič (RC dělič), jehož převod a fázový posuv je nezávislý až do frekvencí v řádech jednotek MHz. Zjednodušené schéma RC děliče je na Obrázku 7.





Obrázek 7: Zjednodušené schéma RC děliče [17]

Následující rovnice (4), přebraná z [17], popisuje převod RC děliče.

$$\frac{U_{sr}}{U_{pr}} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \frac{1 + R_2 j \omega C_2}{1 + R_1 j \omega C_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \frac{1 + 1/R_2 j \omega C_2}{1 + 1/R_1 j \omega C_1} \quad (4)$$

$U_{pr}$  – primární napětí,  $R_1$  – odpor primárního rezistoru,  $R_2$  – odpor sekundárního rezistoru,  $C_1$  – kapacita primárního kapacitoru,  $C_2$  – kapacita sekundárního kapacitoru,  $\omega$  – úhlová frekvence

RC dělič je frekvenčně nezávislý při splnění následující podmínky.

$$R_1 C_1 = R_2 C_2 \quad (5)$$

RC děliče jsou univerzální zařízení pro měření napětí. Jsou schopny měřit napětí o průmyslových frekvencích i jejich násobcích. Na rozdíl od induktivních převodníků mohou být využívány pro měření stejnosměrných napětí a jsou nejpoužívanější technologií pro měření stejnosměrného vysokého napětí.

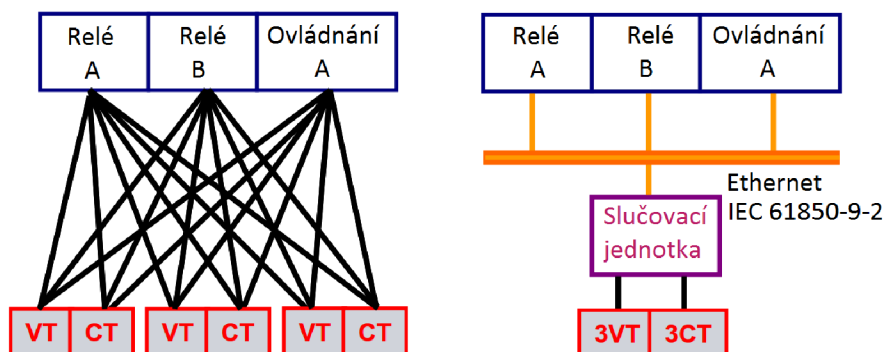
### 3.3 Digitální rozhraní elektronických přístrojových transformátorů

Standardy IEC definují tři typy rozhraní převodníků proudu a napětí. První typ rozhraní je určeno pro konvenční převodníky. Sekundární výstup je 1 nebo 5 A pro proudové převodníky a  $100/\sqrt{3}$  nebo  $110/\sqrt{3}$  pro převodníky napěťové. Jak proudové tak napěťové převodníky poskytují výstupní výkon v řádu desítek až stovek VA.

U druhého nízkovýkonového rozhraní je výstupní signál většinou napěťový, nepřesahující hodnotu 10 V pro proudové i napěťové převodníky. Proto mají tyto převodníky velmi nízký výstupní výkon, který je menší než 1 VA.

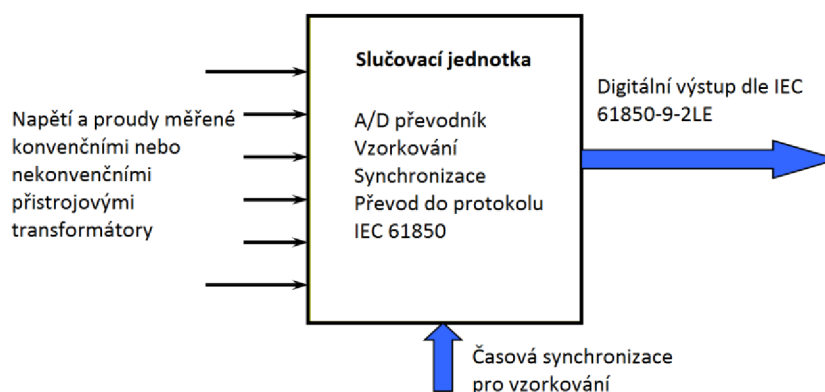
Třetím rozhraním je rozhraní digitální, které se stává stále více důležitým. Standard IEC 61850-9-2LE [5] popisuje způsob digitální komunikace v rozvodnách jako vzorkované hodnoty (*Sampled Values* – SV). Přenos těchto hodnot je založen na průmyslovém použití Ethernetu. Díky takto definovanému rozhraní je možné přenést informace do sekundárních zařízení z převodníků pomocí jednoho optického vlákna, které nahradí množství paralelních měděných vodičů induktivních převodníků, které musí být propojeny jednotlivě.

Pro srovnání je na Obrázku 8 porovnáno zapojení konvenčního rozhraní (vlevo) a digitálního rozhraní (vpravo).



Obrázek 8: Propojení mezi převodníky a sekundárním zařízením - konvenční rozhraní (vlevo), digitální rozhraní (vpravo)[17]

Zařízení, které zajišťuje propojení převodníků se sekundárními zařízeními, se nazývá slučovací jednotka. Všechny výstupní proudové a napěťové signály v jednom rozvaděči jsou přivedeny do slučovací jednotky. Slučovací jednotka pak provádí digitalizaci a časovou synchronizaci dat. Tedy slučuje proudy a napětí ze všech tří fází a posílá je pomocí protokolu, který je definován v IEC 61850 k dalšímu zpracování.

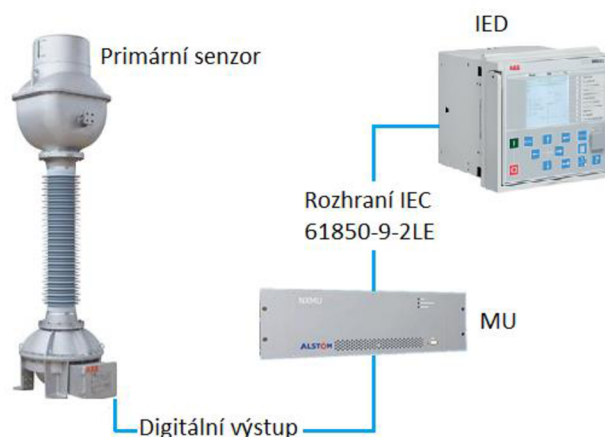


Obrázek 9: Slučovací jednotka [17]

Slučovací jednotka může být součástí elektroniky jednotlivých převodníků. V tomto případě se jedná o řešení moderních převodníků obsahující aktivní elektroniku. Nebo také mohou být samostatným zařízením se vstupními kanály pro převodníky a výstupními kanály se standardizovaným digitálním výstupem. Taková slučovací jednotka může být použita pro propojení všech druhů převodníků s digitální komunikací v rozvodně, což dává možnost integrace existujících proudových a napěťových převodníků do moderních chytrých sítí.

Společným charakteristickým rysem pro převodníky s digitálním výstupem a digitální komunikací v rozvodně je návaznost jednotlivých zařízení. Celý řetězec se obvykle skládá z měřicího členu, kterým je primární proudový nebo napěťový převodník. Výstup z primárního převodníku je přiveden na sekundární A/D převodník, který digitalizuje analogový signál. Ten je dále přenášen přenosovým systémem a zpracováván slučovací jednotkou. Slučovací jednotka je posledním spojovacím článkem mezi měřením a sekundárním zařízením například inteligentním relé (IDE), které vyhodnocuje aktuální stav sledovaného systému. Jak již

bylo uvedeno výše, převodník s digitálním výstupem, respektive slučovací jednotka komunikuje s IED pomocí rozhraní definovaného dle IEC 61850-9-2LE.



Obrázek 10: Schéma řetězce převodníku s digitálním výstupem

Moderní převodníky s digitálním výstupem nabízí oproti konvenčním přístrojovým transformátorům spoustu výhod, kterými může být vyšší bezpečnost, nízká hmotnost, malé rozměry, lineární charakteristika s možností měření dynamický jevů, možnost měření vysokých frekvencí v řádech kHz a v neposlední řadě vyšší spolehlivost. Díky lineární charakteristice mohou být tyto převodníky použity pro měřicí i jistící funkci zároveň.

Naopak mezi nevýhody může patřit třeba menší životnost, teplotní závislost nebo citlivost na parazitní elektromagnetické pole v místě instalace.

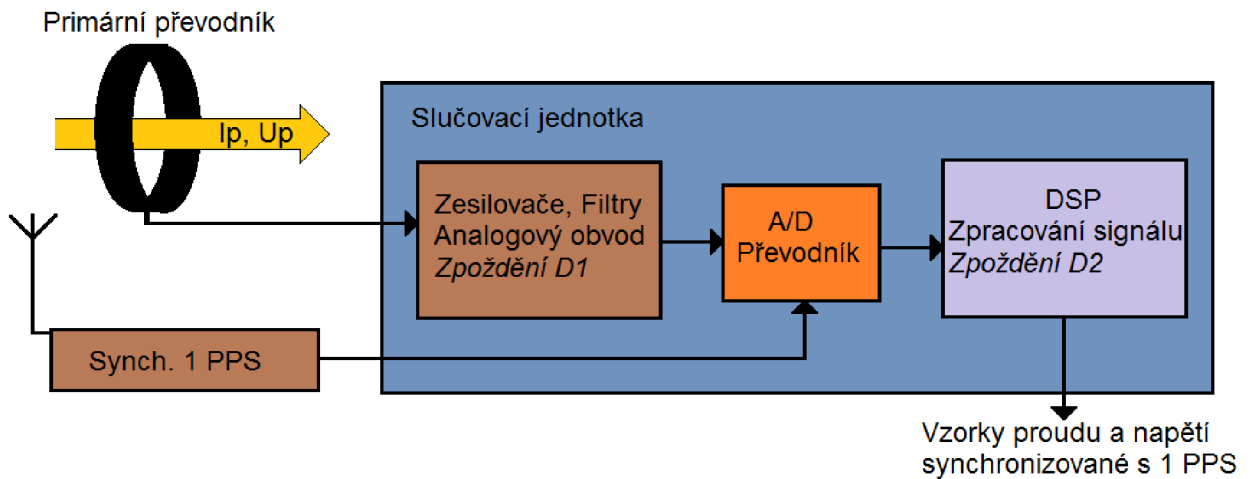
Samozřejmě ne všechny tyto výhody a nevýhody platí pro každý typ převodníku a proto se při uvažování nad vhodným typem volí ty, které mají nejvýhodnější vlastnosti pro danou aplikaci.

### 3.4 Slučovací jednotka - *Merging Unit* (MU)

Slučovací jednotka je fyzické zařízení, které souží k vytváření časově spojitě kombinace proudových a/nebo napěťových údajů přicházejících z primárních převodníků. Důležitou funkcí slučovacích jednotek je sjednocení signálů z více převodníků na jeden digitální signál, který je přenášený přes Ethernet do ochranných, řídicích nebo měřicích zařízení. Tento výstupní digitální signál má standardizovanou strukturu dle IEC 61850-9-2LE. Díky standardizované formě komunikace je umožněna vzájemná spolupráce všech zařízení v rozvodně a to i v případě, že se jedná o zařízení různých výrobců. Díky použití slučovacích jednotek s výstupem dle IEC 61850-9-2LE a datové sítě je zajištěna větší flexibilita rozvodny. Zároveň dochází k výrazné redukci počtu měděných vodičů, čímž dochází ke snížení nákladů na realizaci a údržbu rozvodny při zvýšení bezpečnosti provozu.

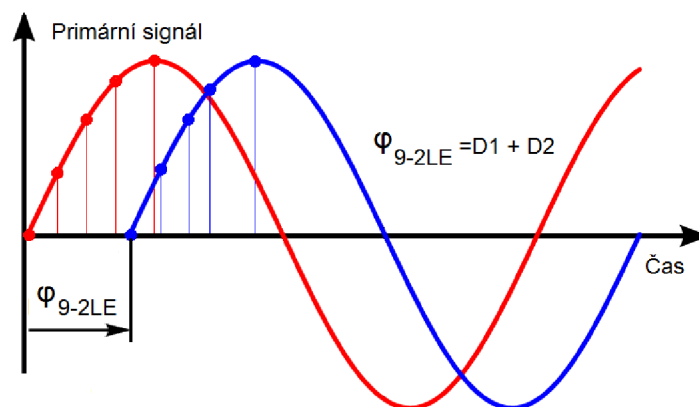
Zjednodušené univerzální schéma slučovací jednotky je uvedeno na následujícím Obrázku 11. Slučovací jednotka je zde reprezentována třemi funkčními bloky. Prvním blokem je modul pro zpracování dat. Ten přijímá informace z primárního převodníku a dále je zpracovává pomocí filtrů a zesilovačů. Dalším blokem je analogově digitální převodník. A/D převodník, jak již naznačuje jeho název, provádí převod analogových signálů na signály digitální. A/D převodník je také používán pro funkci synchronizace. Synchronizační příkaz odesílaný do A/D převodníků slučovací jednotky musí zajistit vysokou přesnost synchronizace, která je nezbytná pro získání časově koherentních dat. Časová synchronizace zahrnuje dvě fáze. Nejprve slučovací jednotka získá externí synchronizační signál, v tomto případě PPS (*Puls Per Second*) z GPS nebo

jiného časového zdroje. PPS je ve slučovací jednotce ověřován, zdali se jedná o platný signál pro synchronizaci. V případě, že ano, slučovací jednotka posílá synchronizační signál do A/D převodníku, čímž je zajištěn jeho synchronní chod. Při nedodržení časové synchronizace hrozí chybné vyhodnocení sledovaného systému a může dojít k nesprávné funkci ochran. Posledním funkčním blokem je komunikační modul, obsahující digitální signálový procesor (DSP), který slouží pro odeslání datových paketů v požadovaném formátu dle IEC 61850-9-2LE [4].



Obrázek 11: Zjednodušené blokové schéma slučovací jednotky [19]

Na Obrázku 11 je u prvního a třetího bloku uvedené časové zpoždění  $D1$ , respektive  $D2$ , které je způsobené zpracováváním signálu slučovací jednotkou. Jak je viditelné na Obrázku 12 toto zpoždění představuje chybu úhlu slučovací jednotky  $\varphi_{9-2LE}$ .

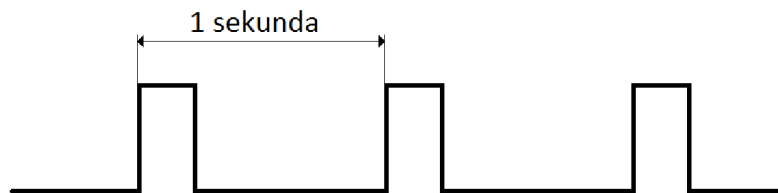


Obrázek 12: Časové zpoždění způsobené slučovací jednotkou

K obdobnému fázovému posuvu může také dojít při nesprávné časové synchronizaci paralelně pracujících slučovacích jednotek. Z tohoto důvodu je kladen na časovou synchronizaci velký důraz. Všechna data použitá pro výpočty, např. impedance, musí být časově koherentní. Tento fakt vytváří vysoké požadavky na zdroje časového signálu. Pro účely časové synchronizace slučovacích jednotek by měly být použity zdroje s přesností větší než  $1 \mu\text{s}$ . Tyto požadavky splňují časové protokoly PSS (*Puls Per Second*) nebo PTP (*Precision Time Protocol*).

### 3.4.1 PPS (*Pulse Per Second*)

PPS, tedy puls za sekundu, je nejjednodušší forma synchronizace. Jedná se o signál, kde se s periodou jedné sekundy objevuje jeden impuls o délce přibližně 100 ms. Tento signál neobsahuje specifické informace o dni nebo roku. 1 PPS signál je zobrazen na Obrázku 13.



Obrázek 13: Signál 1 PPS

Tento signál využívá slučovací jednotka pro nastavení vnitřních hodin oscilátoru, který řídí vzorkování dat slučovací jednotky. Zároveň s příjmem náběžné hrany 1 PPS signálu dochází k vymazání parametru číslování vzorku (*Sample count*) a následující vzorky, které slučovací jednotka poskytuje, jsou číslovány od nuly. Tento parametr je u každého následného vzorku zvýšen o jeden až do doby přijetí dalšího 1 PPS. Synchronizace pomocí pulzu za sekundu je možná na nástupnou hranu. U sestupné hrany není zaručena časová přesnost. V jiných aplikacích se můžeme setkat například s časovým signálem 10 PPS nebo 100 PPS.

### 3.4.2 PTP (*Precision Time Protocol*)

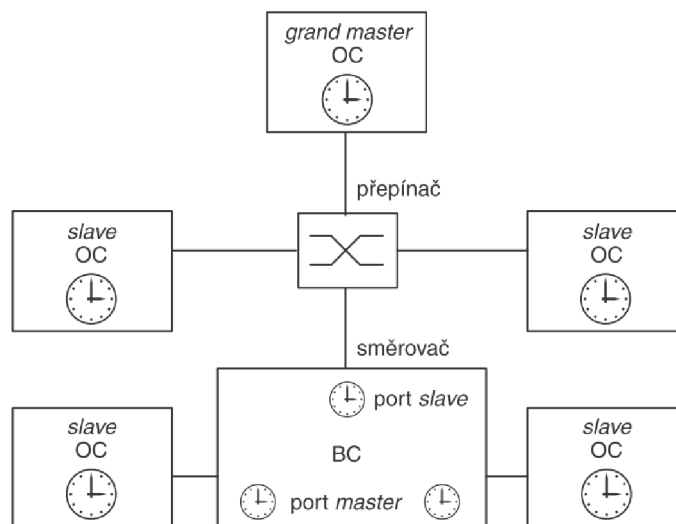
Synchronizace pomocí *Precision Time Protocolu* (přesný časový protokol) je velmi široké téma, a proto následující popis obsahuje pouze nezbytné informace pro pochopení dané problematiky.

PTP je používán pro časovou synchronizaci zařízení po Ethernetové síti. V roce 2002 byl organizací IEEE standardizován *Precision Time Protocol* v první verzi jako PTPv1. Tato verze velmi dobře vyhovuje potřebám menších sítí s menšími počty účastníků. Avšak rostoucí složitost zařízení i struktury sítí si vyžádaly další rozvoj této metody. Vznikl standard PTPv2, který byl schválen v roce 2008 a je označován jako IEEE 1588-2008. Verze PTPv2 byla vyvinuta za účelem dosažení ještě větší přesnosti synchronizace, která dosahuje přesnosti 100 ns až 1  $\mu$ s (v závislosti na topologii sítě). [20]

### Komponenty systému IEEE 1588

Hodiny (*clock*), tj. zdroj časového údaje v zařízení, mohou mít podle standardu IEEE 1588 statut podřízené stanice (*slave clock*) nebo nadřazené stanice (*master clock, grand master clock*). Standard IEEE 1588 definuje dva typy hodin: hodiny obyčejné (*ordinary clock – OC*) a hodiny hraniční (*boundary clock – BC*). Ve verzi PTPv2 jsou k těmto dvěma přidány ještě hodiny typu transparent clock (TC).

Základním typem hodin jsou obyčejné hodiny OC, které v doméně PTP mají pouze jeden port. Hraniční hodiny BC mají několik portů v různých doménách PTP a jsou určeny k omezení vlivu proměnlivých časových zpoždění v jednotlivých prvcích sítě a slouží pro segmentaci sítě. Princip uspořádání sítě podle IEEE 1588 je ukázán na Obrázku 14. [20]



Obrázek 14: Jednoduchý systém podle IEEE 1588 s komponenty OC a BC [20]

### Synchronizace s použitím PTP

Jednou z vlastností PTP je snadná instalace nevyžadující zásahy ze strany uživatele. Proces zkonfigurování systému synchronizace probíhá ve dvou fázích, jimiž jsou výběr hlavních hodin a následující synchronizace všech hodin v systému.

V první fázi se jednotlivé zařízení podporující protokol PTP na základě vlastností svých hodin uspořádají do hierarchické struktury charakteru *master-slave*. Nadřazenou stanici (*master*) pro danou doménu automaticky vybere algoritmus označený jako *Best Master Clock* (BMC). Algoritmus BMC běží po celou dobu ve všech zařízeních s protokolem PTP a zajišťuje výběr nadřazeného zařízení. Činnost algoritmu spočívá v porovnávání vlastností příslušných hodin a výběru těch „nejlepších“.

Další fází je synchronizace hodin v jednotlivých podřízených stanicích s hodinami nadřazeného zařízení. Nejdříve podřízené zařízení na základě zprávy nadřazeného zařízení určí posun vlastních hodin. Následně pak požádá podřízené zařízení své nadřazené zařízení o změření zpoždění při přenosu. Nadřazené zařízení odpovídá zprávou, která obsahuje čas přijetí požadavku. Ze znalosti času odesílání a času přijetí určí podřízené zařízení hodnotu zpoždění vlivem přenosu. Na základě takto získaného časového údaje si podřízené zařízení opraví vlastní aktuální čas. [20]

### Shrnutí PTP

PTP je mechanismus pro levnou a přesnou synchronizaci hodin reálného času. PTP nevyžaduje ani žádný další fyzický synchronizační kanál. Synchronizace se uskutečňuje periodickými synchronizačními zprávami vysílanými přímo základním kanálem určeným pro přenos technologických dat. To umožňuje slučovacími jednotkami odesílat údaje o měření a zároveň synchronizaci přes jedno Ethernetové připojení. Vynikající přesnost synchronizace, nízká cena a spolehlivost funkce jsou zárukou správného fungování systému i při těch nejvyšších požadavcích na činnost systému v reálném čase. [20]

### 3.5 IEC 61850-9-2

V předešlém textu byl tento standard již několikrát zmíněn bez dalších detailů. Následující řádky jsou věnovány obeznámení s touto normou.

Standard IEC 61850-9-2 je určen pro komunikaci v distribučních automatických rozvodnách. Tento protokol slouží pro komunikaci mezi řídicím systémem, IED, jednotlivými podružnými částmi rozvodny a primárními zařízeními např. vypínače, odpojovače, výkonové transformátory a přístrojové transformátory, které poskytují vstupní data.

Tato část definuje výměnu digitálně reprezentovaných analogových hodnot ve standardizovaném digitálním formátu, známých jako SV. IEC 61850-9-2, je komunikační standard, který se pokouší definovat interoperabilní sběrnici. Ačkoliv tento standard popisuje konkrétní mapování protokolu, nezahrnuje specifické datové modely, datové sady, vzorkovací a přenosové rychlosti.

K překonání rozdílu mezi obecným přístupem IEC 61850-9-2 a vlastní realizací byl vydán v roce 2004 institucí UCA International Users Group dokument „*Implementation Guideline for digital interface to instrument transformers using IEC 61850-9-2*“ běžně známý pod názvem IEC 61850-9-2LE (*Light Edition - LE*). Tento dokument stanovuje přenášené datové sady, rychlost vzorkování a požadavky na časovou synchronizaci. Vzorkování slučovacích jednotek bylo stanoveno na osmdesáti násobek jmenovité frekvence sítě. Což znamená 4000 hodnot pro 50 Hz, resp. 4800 hodnot pro 60 Hz. Požadavky na přesnost časové synchronizace splňují zařízení s přesností větší než  $\pm 1 \mu\text{s}$ . [5]

## 4 PŘÍRAZENÍ TŘÍDY PŘESNOSTI

Pro měřicí řetězec, využívající primární převodníky v sestavě se slučovací jednotkou, není definován žádný standard, který by posuzoval celkovou přesnost měření tohoto řetězce a řadil ho tak do jednotlivých tříd přesnosti. Důvodem, proč ani nelze stanovit obecný předpis pro kategorizaci podle přesnosti je rozmanitost účelu, pro který je řetězec využíván. Jak plyne z úvodní části, řetězec může sloužit pro účely měřicí, jisticí, řídicí, informační a jiné. Pro každý z těchto účelů mohou být požadavky na věrnou reprodukci měřeného signálu rozdílné. Důležité však je, aby poskytovaná data řetězce splňovala požadavky na přesnost pro daný účel použití [16].

### 4.1 Měřicí a jisticí účely

Vzhledem ke skutečnosti, že níže navržená testovací sestava bude primárně použita pro kalibraci elektronických přístrojových transformátorů a bude provedeno přiřazení celého řetězce do tříd přesnosti shodnými s třídami, do kterých jsou přiřazovány elektronické transformátory proudu a napětí dle IEC 60044-7 a -8. Vyhodnocovanými parametry sloužícími pro přiřazení do příslušné třídy přesnosti těchto převodníků je amplitudová chyba a fázová chyba.

#### 4.1.1 Fázová chyba ( $\varphi_e$ )

U elektronických přístrojových transformátorů má fázová chyba tři zdroje.

- Chyba úhlu ( $\varphi$ )
- Jmenovitá fázová odchylka ( $\varphi_{or}$ )
- Jmenovité zpoždění ( $\varphi_{tdr}$ )

**Chyba úhlu ( $\varphi$ )** je způsobena analogovou částí systému. V tomto případě se jedná o úhel mezi primárním ( $\varphi_P$ ) a sekundárním signálem ( $\varphi_S$ ) primárního převodníku. Tento rozdíl vzniká na parazitních indukčnostech a kapacitách primárního převodníku. Chyba úhlu se určí podle následujícího vztahu (6).

$$\varphi = \varphi_S - \varphi_P \quad (6)$$

$\varphi$  –chyba úhlu,  $\varphi_P$  –primární chyba úhlu,  $\varphi_S$  –sekundární chyba úhlu

Dle IEC 60044 je zde zavedena konvence, která říká, že kladná hodnota chyby úhlu nastane, když fázor sekundárního signálu předbíhá fázor signálu primárního.

**Jmenovitá fázová odchylka ( $\varphi_{or}$ )** je způsobena použitou technologií převodníku. Tato veličina je relevantní pouze pro zařízení využívající technologii Rogowského cívky bez integrátoru. Pro tuto technologii je jmenovitá fázová odchylka definována jako 90 °. Pro ostatní technologie je jmenovitá fázová odchylka rovna 0 °.

**Jmenovité zpoždění ( $\varphi_{tdr}$ )** je způsobeno zpracováváním dat pomocí A/D převodníků, které představuje časové zpoždění měřeného signálu. Toto časové zpoždění nemá vliv na velikost amplitudy signálu, ale má vliv na jeho časové posunutí vzhledem k signálu referenčnímu. Časové zpoždění digitálních částí systému je do značné míry konstanta, která je nezávislá na měřené hodnotě primárního signálu. Toto zpoždění není okamžitě rozlišitelné od chyby úhlu nebo fázové chyby, a proto vyžaduje při procesu měření zvláštní pozornost. Chyba úhlu způsobená časovým zpožděním se vypočítá dle vztahu (7).



$$\varphi_{tdr} = -2\pi * f * t_{dr} \quad (7)$$

$\varphi_{tdr}$  –chyba úhlu způsobená jmenovitým časovým zpožděním,  $t_{dr}$  –jmenovité časové zpoždění,  $f_r$  –jmenovitá frekvence

**Fázová chyba** je sumou všech těchto zdrojů, s tím, že jmenovitá fázová odchylka je kompenzována a od fázové chyby se odečítá.

$$\varphi_e = \varphi - (\varphi_{or} + \varphi_{tdr}) \quad (8)$$

### 4.1.2 Amplitudová chyba

Zdrojem amplitudové chyby obecně je neideální převod jednotlivých částí systému. Určuje se jako rozdíl efektivních hodnot měřeného systému a reference, který je vztažen k efektivní hodnotě reference. Pro proudové převodníky platí vztah (9) pro převodníky napěťové vztah (10).

$$\varepsilon = \frac{k_r U_s - I_p}{I_p} * 100 \% \quad (9)$$

$\varepsilon$  –amplitudová chyba,  $k_r$  –jmenovitý převod převodníku,  $I_p$  –efektivní hodnota primárního proudu,  $U_s$  –efektivní hodnota sekundárního napětí

$$\varepsilon = \frac{k_r U_s - U_p}{U_p} * 100 \% \quad (10)$$

$U_p$  –efektivní hodnota primárního napětí

### 4.1.3 Třídy přesnosti dle IEC 60044

Všechny přístrojové transformátory používané pro měřicí a jistící účely musí splňovat požadavky na přesnost měření. U měřicích převodníků se jedná především o vysokou přesnost měření při jmenovitých hodnotách. Jistící převodníky pak musí věrně reprodukovat měřený signál při poruchových stavech. Dle schopnosti přesného měření, při běžném provozu nebo poruchách, jsou převodníky zařazeny do tříd přesnosti. V těchto třídách přesnosti jsou definovány mezní hodnoty amplitudové a fázové chyby, které pro danou třídu nesmí překročit.

#### Třídy přesnosti pro elektronické transformátory napětí (EVT)

Dle IEC 60044-7

- Normalizované třídy přesnosti pro měřicí EVT jsou: 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3
- Normalizované třídy přesnosti pro jistící EVT jsou: 3P – 6P
- Jmenovité hladiny primárního napětí EVT v kV:  $3,3/\sqrt{3}$  –  $6,6/\sqrt{3}$  –  $11/\sqrt{3}$  –  $15/\sqrt{3}$  –  $22/\sqrt{3}$  –  $35/\sqrt{3}$

Chyba napětí a úhlu při jmenovitém kmitočtu nesmí překročit hodnoty uvedené v Tabulce 1 při jakémkoliv napětí v rozmezí 80 – 120 % jmenovitého primárního napětí ( $U_{pn}$ ). Pro jistící EVT nesmí chyba překročit stanovené hodnoty až do 190 %  $U_{pn}$ . [2]

Tabulka 1: Třídy přesnosti a jejich mezní hodnoty dle IEC 60044-7 [2]

EVT dle IEC 60044-7																	
Třída přesnosti	± Amplitudová chyba ( $\epsilon$ ) v závislosti na procentní hodnotě jm. napětí [%]								± Fázová chyba ( $\varphi$ ) v závislosti na procentní hodnotě jm. napětí [°]								
	$U_{pn}$ [%]	1	2	5	50	80	100	120	190	1	2	5	50	80	100	120	190
0.1					0.10	0.10	0.10						5	5	5		
0.2					0.20	0.20	0.20						10	10	10		
0.5					0.50	0.50	0.50						20	20	20		
1.0					1.00	1.00	1.00						40	40	40		
3.0					3.00	3.00	3.00										
3P		6.00	3.00						3.00		240	120					120
6P		12.00	6.00						6.00		480	240					240

Maximální příspěvek k amplitudové a fázové chybě napěťového převodníku, který je do měření vnášen převodem analogových hodnot na strukturu SV je uveden v Tabulce 2.

Tabulka 2: Maximální příspěvek k amplitudové a fázové chybě převodu analogu na SV [5]

IEC 61850-9-2LE																
Třída přesnosti	± Amplitudová chyba ( $\epsilon$ ) v závislosti na procentní hodnotě jm. napětí [%]								± Fázová chyba ( $\varphi$ ) v závislosti na procentní hodnotě jm. napětí [°]							
	$U_{pn}$ [%]	1	2	5	50	80	100	120	190	1	2	5	50	80	100	120
	10.0	6.00	3.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	360	240	120	5	5	5	5	5

### Přesnost EVT v závislosti na frekvenci

Dle IEC 60044-7

- EVT musí splňovat požadavky své třídy přesnosti uvnitř normalizovaného kmitočtového rozsahu. Normalizovaný kmitočtový rozsah je v rozmezí od 99 % do 101 % jmenovitého kmitočtu pro měřicí EVT a od 96 % do 102 % jmenovitého kmitočtu pro jisticí EVT. [2]
- Informativní testy přesnosti vzhledem k harmonickým jsou uvedeny v příloze D standardu IEC 60044-8, který je definován pro proudové převodníky. Nicméně tyto hodnoty uvedené v Tabulce 4 je možné použít i pro převodníky napěťové [3].
- Velikost primárního signálu při ověřování vzhledem k harmonickým je uvedena v Tabulce 3.

Tabulka 3: Zkušební napětí pro zkoušky vzhledem k harmonickým [3]

Velikost harmonických napětí (% $U_{pn}$ )	
2. až 5. harmonická	6. harmonická a vyšší
10 %	5%

Tabulka 4: Třídy přesnosti a jejich mezní hodnoty pro vyšší harmonické [3]

EVT dle IEC 60044-8								
Třída přesnosti	± Procentní hodnota amplitudové chyby v závislosti na řádu harmonické				± Fázový posun, ve stupních, při harmonických uvedených v následujícím řádku			
	2. – 4.	5. a 6.	7. – 9.	10. – 13.	2. – 4.	5. a 6.	7. – 9.	10. – 13.
0.1	1 %	2 %	4 %	8 %	1	2	4	8
0.2	2 %	4 %	8 %	16 %	2	4	8	16
0.5	5 %	10 %	20 %	20 %	5	10	20	20
1.0	10 %	20 %	20 %	20 %	10	20	20	20

### Třídy přesnosti pro elektronické transformátory proudu (ECT)

Dle IEC 60044-8

- Normalizované třídy přesnosti pro měřicí ECT jsou: 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3 – 5
- Normalizované třídy přesnosti pro jisticí ECT jsou: 5TPE – 5P – 10P
- Normalizované třídy přesnosti ECT pro zvláštní použití jsou: 0,2S – 0,5S
- Jmenovité hodnoty primárního proudu v A: 10 – 12,5 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75 a jejich dekadické násobky a zlomky

Dovolené meze amplitudové chyby pro měřicí třídy přesnosti 3 a 5 jsou uvedeny v Tabulce 5. Pro tyto třídy nejsou stanoveny meze chyby úhlu  $\varphi$ . Meze pro měřicí ECT, ECT pro zvláštní použití a jisticí ECT jsou uvedeny v Tabulce 6 [3]. V případě, že má proudový převodník stanovený jmenovitý zvýšený primární proud, musí být ověřena přesnost převodníku při tomto proudu. Limitní hodnoty přesnosti pro jmenovitý zvýšený primární proud jsou stejné jako při jmenovitém primárním proudu.

Tabulka 5: Dovolené meze amplitudové chyby pro ECT třídy přesnosti 3 a 5 [3]

Třída přesnosti	± Amplitudová chyba ( $\epsilon$ ) v závislosti na procentní hodnotě jm. proudu [%]	
$I_{pr}$ [%]	50	120
3	3	3
5	5	5
Poznámka – Meze chyby proudu předepsané pro 120 % $I_n$ by měly být zajištěny až do jmenovitého rozšířeného primárního proudu		

Tabulka 6: Třídy přesnosti a jejich mezní hodnoty dle IEC 60044-8 [3]

ECT dle IEC 60044-8										
Třída přesnosti	± Amplitudová chyba v závislosti na procentní hodnotě jm. proudu [%]					± fázová chyba v závislosti na procentní hodnotě jm. proudu [°]				
$I_{pr}$ [%]	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0.1		0.40	0.20	0.10	0.10		15	8	5	5
0.2S	0.75	0.35	0.20	0.20	0.20	30	15	10	10	10
0.2		0.75	0.35	0.20	0.20		30	15	10	10
0.5S	1.50	0.75	0.50	0.50	0.50	90	45	30	30	30
0.5		1.50	0.75	0.50	0.50		90	45	30	30
1		3.00	1.50	1.00	1.00		180	90	60	60
5TPE				1.00					60	
5P				1.00					60	
10P				3.00					-	

Maximální příspěvek k amplitudové a fázové chybě proudového převodníku, který je do měření vnášen převodem analogových hodnot na strukturu SV je uveden v Tabulce 7.

Tabulka 7: Maximální příspěvek k amplitudové a fázové chybě převodu analogu na SV [5]

IEC 61850-9-2LE										
Třída přesnosti	± Amplitudová chyba ( $\epsilon$ ) v závislosti na procentní hodnotě jm. proudu [%]					± fázová chyba ( $\varphi$ ) v závislosti na procentní hodnotě jm. proudu [°]				
$I_{pr}$ [%]	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
Měřicí účel	0.40	0.20	0.10	0.10	0.10	15	8	5	5	5
Jisticí účel	2.00	0.40	0.10	0.10	0.10	5	8	5	5	5

### Přesnost ECT v závislosti na frekvenci

Dle IEC 60044-8

- ECT musí splňovat požadavky své třídy přesnosti uvnitř normalizovaného kmitočtového rozsahu. Normalizovaný kmitočtový rozsah je v rozmezí od 99 % do 101 % jmenovitého kmitočtu pro měřicí ECT a od 96 % do 102 % jmenovitého kmitočtu pro jisticí ECT. [3]
- Informativní testy přesnosti vzhledem k harmonickým jsou uvedeny v příloze D standardu IEC 60044-8. Požadavky na proudové převodníky vzhledem k harmonickým jsou totožné s požadavky na napěťové převodníky. Tyto požadavky jsou uvedeny v Tabulce 3 a v Tabulce 4.

## 4.2 Charakteristické zkušební hodnoty

Charakteristické hodnoty proudů a napětí při zkouškách přesnosti vychází z výše uvedeného rozboru řazení elektronických transformátorů do jednotlivých tříd přesnosti a jmenovitých hodnot primárních proudů a napětí.

### 4.2.1 Charakteristické zkušební hodnoty napětí

Stanovení charakteristických hodnot pro zkoušení EVT je v celku jednoznačné. Jmenovité hodnoty primárních napětí EVT se odvíjí od jmenovitých napětí sítí do kterých jsou určeny.

Pro přehlednost zkušebních napětí pro měřicí a jisticí třídu přesnosti EVT byla zpracována Tabulka 8, kde jsou uvedeny rozsahy zkušebních napětí pro jednotlivé jmenovité hodnoty napětí.

V Tabulce 8 jsou nejpoužívanější napěťové hladiny zvýrazněny zeleně. Jmenovité hladiny 3,3 a 6,6/√3 kV nejsou příliš často používané, proto na tyto hodnoty nebude kladen důraz.

Tabulka 8: Zkušební napětí pro měřicí a jisticí třídy přesnosti EVT dle jmenovitých primárních napětí

$U_{pn}$ [kV]	$U_t$ [% $U_{pn}$ ]	1	2	5	80	100	120	190
3,3/√3	[V]	19	38	95	1524	1905	2286	3620
6,6/√3	[V]	38	76	191	3048	3811	4573	7240
11/√3	[V]	64	127	318	5081	6351	7621	12067
15/√3	[V]	87	173	433	6928	8660	10392	16454
22/√3	[V]	127	254	635	10161	12702	15242	24133
35/√3	[V]	202	404	1010	16166	20207	24249	38394

### 4.2.2 Charakteristické zkušební hodnoty proudu

Určení charakteristických hodnot pro zkoušení ECT je poněkud méně exaktní. Vzhledem k tomu, že výrobci mohou používat dekadické násobky a zlomky výše uvedených jmenovitých hodnot primárních proudů, jedná se o nepřeborné množství hodnot. Proto budou charakteristické hodnoty pro ECT určeny na základě typických aplikací a podle parametrů, které udávají výrobci.

Tyto přístroje jsou nejčastěji vyráběny se jmenovitými hodnotami maximálně ve stovkách ampér, bude uvažováno 250 A a nejmenší hodnotou jmenovitého proudu 50 A. Takto zdánlivě nízké hodnoty, pro použití v systémech vysokého napětí, jsou voleny záměrně. Výrobci využívají linearitu ECT a stanovují jim jmenovitý zvýšený primární proud.

Tento jmenovitý zvýšený primární proud je definován jako primární proud, do jehož dosažení je zaručena stejná přesnost jako při proudu jmenovitém, a při němž nelze překročit hodnotu jmenovitého trvalého tepelného proudu ( $I_{cth}$ ). Jmenovitý trvalý tepelný proud je hodnota proudu, při které nedojde k nadměrnému oteplení ECT a jeho hodnota je závislá na aplikaci a provedení ECT [3]. V případě, že je ECT vybaven primárním vodičem je hodnota  $I_{cth}$  závislá na dovolené proudové hustotě vodiče, tedy na průřezu, a materiálu primárního vodiče. V případě, že ECT je bez primárního vodiče (půvlekový typ) je pak hodnota  $I_{cth}$  závislá na dovolené proudové hustotě vodiče, který ECT obepíná, resp. na jeho průřezu a materiálu. Často se pak v praxi můžeme setkat právě se shodností hodnot jmenovitého zvýšeného primárního proudu a  $I_{cth}$ .

Pro stanovení maximální hodnoty  $I_{cth}$  na základě aplikace můžeme uvažovat, že půvlekové ECT nebudou instalovány na vodiče s větším jmenovitým proudem, než je stanoven pro dvojité měděné pasoviny o rozměru 200 x 10 mm, uložené svisle. Tato hodnota je v [11] stanovena v Tabulce 42 na 7.2 kA.

V případě stanovení nejvyšší hodnoty proudu pro zkoušení ECT dle parametrů, které udávají výrobci, lze říci, že hodnota jmenovitého zvýšeného primárního proudu nepřesahuje 4 kA. Ve velké většině případů však nepřesahuje 2 kA.

Z výše uvedeného je zřejmé, že charakteristické hodnoty pro zkoušení ECT se pohybují od jednotek ampér až po cca 300 A. Nejvyšší zkoušené hodnoty závisí na stanoveném jmenovitém zvýšeném primárním proudu. Tyto hodnoty jsou ve velké většině do 2 kA.

Charakteristickými hodnotami pro kmitočet primárního signálu jsou vzhledem k požadavku přesnosti převodníků v závislosti na kmitočtu 96 – 102 % jmenovitého kmitočtu.

### **4.2.3 Souhrn charakteristických zkušebních hodnot**

Charakteristické zkušební hodnoty jsou stanoveny pro proud v rozmezí 0 – 300 A. U převodníků, které mají stanovené  $I_{cth}$  můžeme předpokládat hodnoty proudu od 0 do 2000 A. Pro napěťové zkoušky vyplývají z předešlého rozboru hodnoty 50 V – 38,4 kV. Požadavek na frekvenci zkušebního signálu je 48 Hz – 51 Hz.

## 5 REALIZOVANÉ TESTOVACÍ SESTAVY

### 5.1 Obecné schéma testovací sestavy

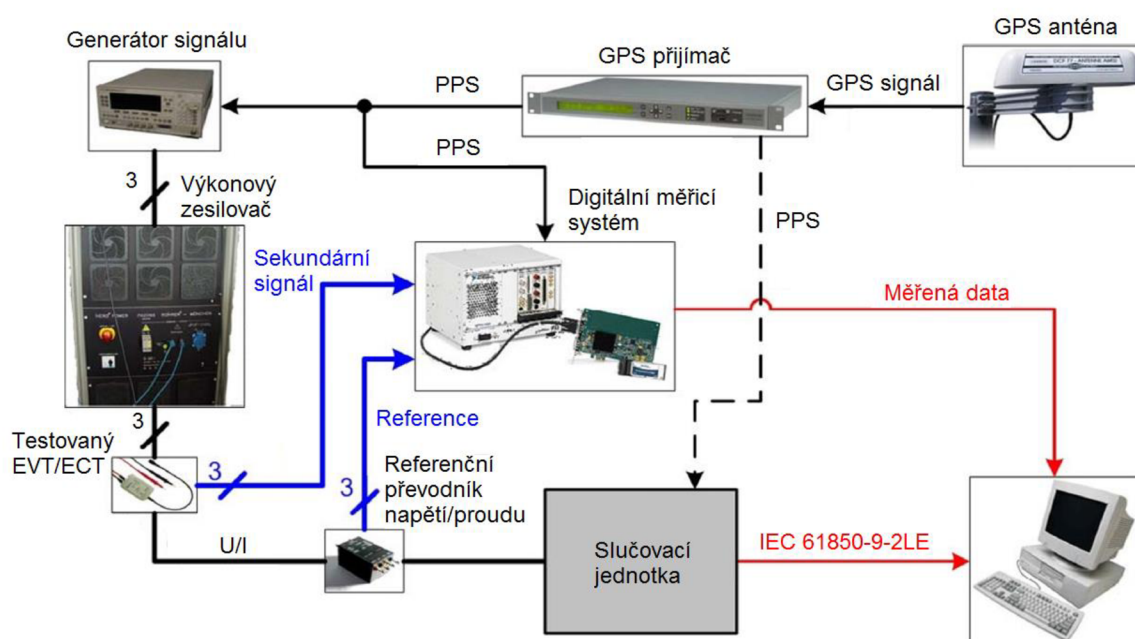
Testovací sestavy určené pro přesné kalibrační měření se vyznačují vysokou přesností měření, spolehlivou opakovatelností a flexibilitou testování. Tyto výrazné přednosti jsou vykoupeny vysokou citlivostí na okolní prostředí a nízkou mobilitou celé sestavy.

Na současném trhu se pohybuje poměrně široké spektrum výrobců přesných laboratorních přístrojů a zařízení, jejichž snahou je poskytovat takové produkty, které jsou kompatibilní s přístroji ostatních výrobců. Především z tohoto důvodu bude níže uvedený rozbor testovací sestavy zaměřen na konkrétní funkci zařízení, než na jeho fyzické parametry.

Obecné schéma testovací sestavy je zobrazeno na Obrázku 15. Princip sestavy je založen na diferenciální metodě s automatickým vyhodnocením a digitálním zobrazením výsledků.

Funkce komponent testovací sestavy lze rozdělit na jednotlivé funkční bloky. Těmi jsou komponenty pro generování testovacího signálu, referenční převodníky, vyhodnocovací zařízení, synchronizační zařízení a přenosový systém.

Zařízení pro generování signálu musí být schopno generovat signál požadovaného průběhu o dostatečné úrovni. Referenční komponenty slouží pro získání věrné informace o zkušebním signálu. Vyznačují se vysokou přesností a stabilitou měření. Referenční komponenty jsou v sestavě zdrojem obecně správné hodnoty signálu – reference. Vyhodnocovací zařízení má za úkol porovnání zkoušeného předmětu s referencí a stanovení rozdílu mezi nimi. Synchronizační zařízení je zdrojem časově přesného signálu, podle kterého je řízena činnost ostatních komponent systému. Přenosový systém slouží k propojení všech těchto komponent a musí být navržen a dimenzován tak, aby nedocházelo k ovlivnění měření například útlumem na kabelech nebo nedostatečnou odolností vůči okolnímu rušení.



Obrázek 15: Obecné schéma testovací sestavy [16]

Výše zobrazená obecná sestava je složena z GPS přijímače, který poskytuje signál PPS, potřebný pro časovou synchronizaci slučovací jednotky, a digitálního měřicího systému. Variantou k GPS přijímači může být zdroj PTPv2. Generátor signálu, který generuje testovací signál je sfázován s PPS signálem. Důvodem toho sfázování je zvýšení opakovatelnosti měření. Generovaný signál je zesilován výkonovým zesilovačem. Toto zesílení je provedeno pro dosažení potřebné úrovně primárního signálu. Primární signál je přiveden shodně na testované převodníky a referenční převodník, který poskytuje obecně správnou hodnotu primárního signálu. Digitálním měřicím systémem se rozumí obecně programovatelný nástroj pro zajištění synchronizovaného měření na základě specifikované měřicí procedury. Slučovací jednotka je součástí testovaného řetězce a je synchronizována pomocí PPS nebo PTPv2 a poskytuje výstupní data z řetězce, která jsou analyzována a porovnávána s referencí. Vyhodnocení je provedeno pomocí PC se softwarem, který zpracovává a porovnává získaná data ze sestavy.

### 5.1.1 Komponenty sestavy a jejich funkce

#### Zdrojové komponenty

Jedná se o zařízení generující primární signál o stálé hodnotě harmonického průběhu se schopností volby frekvence signálu. Úroveň primárního signálu by měla dosahovat hodnot stanovených v předešlém textu, kde byl proveden rozbor charakteristických zkušebních hodnot proudu a napětí. Tyto hodnoty byly stanoveny pro proudové měření 0 – 2000 A a pro napětí měření 50 V – 38,4 kV.

Pro takto vysoké úrovně zkušebních signálů se standardně nevyrábí samostatné zdroje a je nutné použít více přístrojů pro jejich dosažení. Filozofie dosažení vysokých úrovní je taková, že je generován nízkonapěťový signál, který je následně zesilován. Pro zesílení nízkonapěťového signálu je možné použít zvyšovací transformátory napájené do sekundárního vinutí, průmyslové zesilovače, jejichž funkce je založena na výkonové elektronice, popřípadě kombinaci těchto dvou možností. Transformátory a zesilovače musí mít dostatečný výkon, aby nedocházelo k deformaci zesilovaného signálu. Potřebná velikost výkonu závisí na impedanci napájeného obvodu.

Laboratorní generátory nízkonapěťového signálu jsou standardní přístroje schopné běžně generovat signály v rozmezí DC – 20 MHz o úrovni 0 – 10 V<sub>P-P</sub>. Jsou vyráběny buď jako samostatné laboratorní přístroje nebo jako karty do modulárních měřicích systémů.

#### Referenční komponenty

Referenční napěťový a proudový převodník musí splňovat nároky na vysokou přesnost a stabilitu měření při harmonických ustálených stavech. Pro zajištění vysoké přesnosti měření referenčních přístrojových transformátorů je nutné, aby jejich měřicí schopnost byla v širokém rozsahu primárních proudů a napětí. Zároveň tento rozsah proudů a napětí musí odpovídat charakteristickým hodnotám výše uvedeným. Dále musí být teplotně stabilní a odolný vůči rušivým magnetickým polím. Pro tyto účely jsou vhodné normálové transformátory proudu a napětí. Charakteristickými parametry je přesnost měření amplitudy vyšší než  $\pm 0,005 \%$  a přesnost měření fáze vyšší než  $\pm 0,5'$ . Tyto extrémně vysoké přesnosti ovšem bývají zaručeny pouze pro úzký rozsah frekvencí (48 – 62 Hz). Při testování v jiném kmitočtovém spektru musí být zvoleny vhodné převodníky. Obecně však platí, že čím větší je šířka pásma převodníku, tím se snižuje jeho absolutní přesnost měření.



Tyto požadavky splňuje normálový transformátor napětí Haefely Hipotronics 4892. Tento vysoce přesný induktivní napěťový transformátor je určen právě pro použití jako referenční přístrojový transformátor pro kalibrační účely, jehož parametry jsou přebrány z [6].

Amplitudová přesnost: $\pm 0,005 \%$	Chyba fáze: $\pm 0,5'$
Měřicí rozsah: $40 \%$ - $120\% U_n$	Jmenovité napětí: 34,5 kV - 12 kV - 2,4 kV
Frekvenční rozsah : 48 – 62 Hz	Sekundární napětí: 100 V

Jako proudovou referenci lze využít normálový transformátor Haefely Hipotronics 4764. Jeho výhodou je velký rozsah jmenovitých proudů, což je vhodné pro vypořádání se s širokou škálou jmenovitých proudů ECT. Parametry tohoto normálu jsou přebrány z [7].

Amplitudová přesnost: $\pm 0,001 \%$	Chyba fáze: $\pm 0,05'$
Měřicí rozsah: $1 \%$ – $200\% I_n$	Jmenovitý proud: 2-5-10-20-50-100-200-500-1000-5000 A
Frekvenční rozsah : 48 – 62 Hz	Sekundární proud: 1 A - 5 A

### Vyhodnocovací zařízení

Na vyhodnocovací zařízení jsou často kladeny protichůdné požadavky. Proto je správná volba zařízení poměrně obtížná. Obecně je kladen požadavek na vysokou citlivost měření a zároveň je požadován velký rozsah vstupních signálů. Vysoce přesná vyhodnocovací zařízení jsou obvykle navržena pro malé rozsahy vstupních signálů. Se zvyšujícím se rozsahem signálu klesá i přesnost měření. Získání určitého kompromisu lze dosáhnout vhodně navrženými testy a převody referenčních převodníků. Dalším požadavkem na vyhodnocovací zařízení je synchronní měření všech vstupů, možnost spouštění měření interním nebo externím signálem a možnost kompenzace časových prodlev při vzorkování, filtraci a A/D převodu vstupních signálů.

### Synchronizace

Synchronizační signál může být získáván pomocí GPS zařízení. To je řízeno systémem družic, které jsou na oběžné dráze Země. Družice, kromě údajů o poloze, vysílají i údaje časové. Na základě zpracování časových údajů je řízen výstup PPS z GPS přijímače. PPS signál poskytují i přístroje, které mají vnitřní hodiny řízené přesným oscilátorem. Funkce oscilátorů je vysoce citlivá na změny teploty, a proto je možné se setkat s typy kompenzovaných oscilátorů TCXO a OCXO. Funkce oscilátorů TCXO je kompenzovaná díky známé aktuální teplotě oscilátoru. Oscilátory TCXO dosahují přesnosti 1 ppm. Oscilátory OCXO jsou udržované v komoře, která je vyhřívána na konstantní teplotu. Tím je zajištěna přesná funkce oscilátoru. Oscilátory OXCO dosahují přesnosti až 50 ppb. Synchronizace pomocí PTPv2 je možná pomocí serveru podporující tuto funkci.

### Přenosový systém a impedanční přizpůsobení

Přenosový systém tvoří signální kabely, které vzájemně propojují jednotlivé komponenty měřicího systému. Na tyto vodiče jsou kladeny požadavky na odolnost vůči rušení, zanedbatelný útlum a fázové zkreslení přenášeného signálu a stabilitu těchto vlastností po dobu životnosti kabelu.

Některá zařízení v testovací sestavě potřebují minimální hodnotu impedance vstupu, do kterého jsou připojeny. V případě, že tato hodnota není dodržena, není zaručena korektní funkce

zařízení. Takový případ nastává především při měření sekundárních signálů testovaných převodníků. Ty mají většinou jmenovitou hodnotu zátěže  $10\text{ M}\Omega$ , zatímco vstupní impedance měřicích přístrojů bývá většinou jiná. Při připojení převodníku do menší impedance vstupu, než je požadována, dochází k amplitudovému zkreslení sekundárního signálu převodníku a nekorektního vyhodnocení jeho chyby.

Tyto impedanční nesrovnalosti lze vyřešit zařazením zesilovače zapojeného se společným kolektorem. Toto zapojení je také známé pod pojmem impedanční transformátor nebo emitorový sledovač. Při vhodném návrhu zesilovače je napěťové zesílení vstupního signálu rovno jedné a zároveň nedochází k fázovému posuvu.

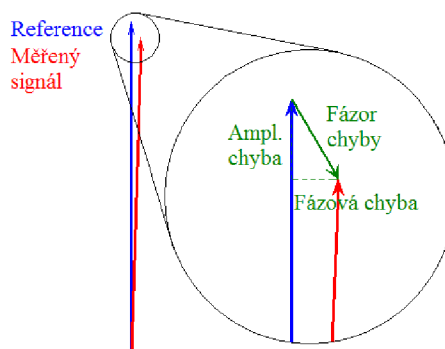
### 5.1.2 Způsob vyhodnocení

U studovaných sestav, ze kterých vychází obecné schéma sestavy, byly vyhodnocovanými parametry amplitudová chyba a chyba fáze měřeného řetězce. Testy byly provedeny při harmonickém ustáleném sinusovém průběhu. Výsledné hodnoty byly srovnány s mezními hodnotami tříd přesnosti z IEC 60044, podle kterých byl řetězec zařazen do patřičné třídy.

Při výpočtu amplitudové chyby pro základní harmonickou složku signálu se jednotlivé metody zpracování dat liší v závislosti na použitém zařízení, metodě synchronizace a vzorkování. Obecně je pro zpracování dat použita diskrétní Fourierova transformace (DFT). Vzhledem k tomu, že analyzované signály mohou obsahovat různé harmonické mající vliv na korektní výpočet chyby, jsou aplikovány okénkové DFT (většinou okno Hann). Výpočet samotné amplitudové a fázové chyby měřeného řetězce je proveden v souladu s rovnicemi (6) až (10). [21]

Při výpočtu fázové chyby není využito okno Hann. Důvodem je možnost ztracení informace o fázovém posuvu při transformačním procesu. Chyba fáze je v zásadě časový rozdíl mezi referenčním signálem a měřeným signálem. Použitá metoda je založena na principu stanovení rozdílu mezi oběma signály při průchodu signálů nulou [21]. Metod stanovení průchodu signálu nulou je více. Jako spolehlivá je brána metoda lineární interpolace uvedena v [22]. Výsledná hodnota časového rozdílu je průměrná hodnota rozdílů měřeného přes všechny periody. Zároveň je vhodné provést korekci výsledku. Korekce je možné provést pro známé hodnoty zpoždění referenčního měření a jmenovitého časového zpoždění měřeného řetězce.

Výpočet amplitudové a fázové chyby pro danou harmonickou složku primárního signálu je proveden pomocí výpočtu fázoru chyby dané harmonické složky podle (12). U fázoru chyby se jedná o kombinaci amplitudové a fázové chyby, jak je znázorněno na následujícím Obrázku 16.



Obrázek 16: Chyba reprezentovaná jako fázor

$$\vec{\varepsilon}_{(s)k} = \frac{\vec{I}_{x(s)} - \vec{I}_{r(s)}}{\vec{I}_{r(s)}} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left[ (i_{x(s-n)} - i_{r(s-n)}) e^{\frac{j2\pi k(s-n)}{N}} \right]}{\frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i_{r(s-n)} e^{\frac{j2\pi k(s-n)}{N}}} \quad (12)$$

$$\vec{\varepsilon}_{(s)k} = \varepsilon_{(s)k} * e^{j\varphi_{(s)k}}$$

$\vec{\varepsilon}_{(s)k}$  – fázor chyby dané harmonické,  $\vec{I}_{x(s)}$  – fázor měřeného proudu převodníkem,  $\vec{I}_{r(s)}$  – fázor proudu měřeného referencí,  $k$  – řád měřené harmonické,  $N$  – počet vzorků ve vyhodnocovaném okně,  $s$  – identifikátor daného vzorku pro který je chyba počítána,  $\varepsilon_{(s)k}$  – amplitudová chyba dané harmonické,  $\varphi_{(s)k}$  – fázová chyba dané harmonické

Výpočet chyby, který je citlivý na DC složku a další superponované signály na testovný signál lze vyjádřit pomocí celkové chyby, pro kterou platí vztah (13). Zároveň je důležité, aby kompozitní chyba reference byla zanedbatelná. Výpočet kompozitní chyby musí být proveden přes celočíselný násobek periody.

$$\varepsilon_{c(s)} = \frac{100}{I_p} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [k_r i_s(s-n) - i_p(s-n)]^2} \quad (13)$$

$\varepsilon_{c(s)}$  – kompozitní chyba,  $s$  – daný vzorek

Další možností analýzy dat je analýza jednotlivých vzorků. Ta je založena na porovnání jednotlivých hodnot vzorkovaných ve stejný čas. Výpočet chyby je proveden pro každou měřenou hodnotu zaznamenanou měřícím systémem. Výpočet je obdobný jako pro amplitudovou chybu s tím rozdílem, že se nejedná o efektivní hodnoty, ale o hodnoty diskrétní. Výpočet pro proudové převodníky je uveden v rovnici (14) a v rovnici (15) pro převodníky napěťové.

$$\varepsilon_{i(n)} = \frac{k_r U_{s(n)} - I_{p(n)}}{I_{p(n)}} * 100 \% \quad (14)$$

$$\varepsilon_{u(n)} = \frac{k_r U_{s(n)} - U_{p(n)}}{U_{p(n)}} * 100 \% \quad (15)$$

$\varepsilon_{i(n)}$  – amplitudová chyba proudu  $n$ -tého vzorku,  $\varepsilon_{u(n)}$  – amplitudová chyba napětí  $n$ -tého vzorku,  $I_{p(n)}$  – TRMS hodnota primárního proudu  $n$ -tého vzorku,  $U_{p(n)}$  – TRMS hodnota primárního napětí  $n$ -tého vzorku,  $U_{s(n)}$  – hodnota sekundárního napětí  $n$ -tého vzorku

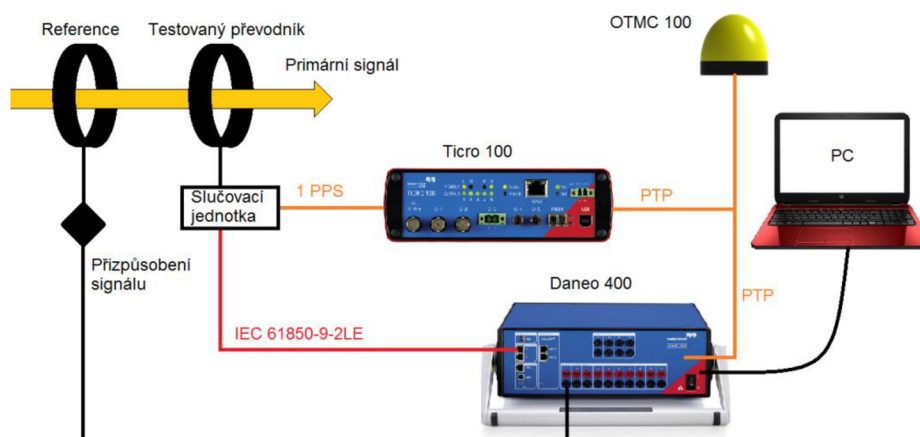
Přestože tento způsob vyhodnocení vede na velké množství naměřených hodnot, je vhodný například pro dlouhodobé měření. Výsledné hodnoty chyby lze za určité období průměrovat a vynést je do histogramu pro následnou analýzu.

## 5.2 Komerční testovací sestava

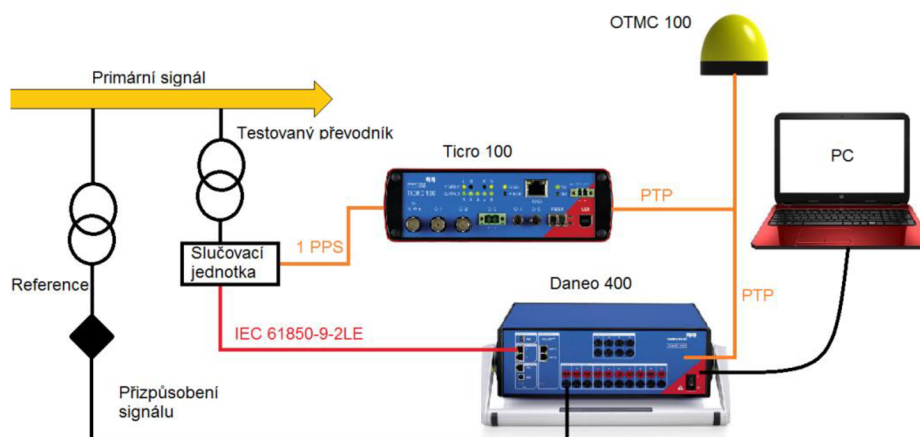
Komerční testovací sestava od společnosti Omicron se vyznačuje především vysokou mobilitou, jednoduchou obsluhou a snadnou konektivitou jednotlivých částí systému. Všechny komponenty jsou vzájemně kompatibilní a vyžadují jen minimální úpravy nastavení pro spolehlivou funkci celého systému. Zařízení je poměrně robustní a je vhodné pro testy prováděné i mimo laboratoře. Základním prvkem sestavy je vyhodnocovací zařízení DANEO 400, které

přímo zpracovává naměřená data. Synchronizace měření je provedena pomocí GPS antény OTMC 100, která umožňuje synchronní sběr dat ze slučovací jednotky a referenčního zařízení. Pro získání potřebného synchronizačního formátu je mezi GPS a slučovací jednotkou umístěn časový převodník TICRO 100.

Schématický diagram systému pro kalibraci slučovacích jednotek v sestavě s proudovými převodníky je zobrazen na Obrázku 17. Diagram systému pro kalibraci slučovacích jednotek v sestavě s napěťovými převodníky je zobrazen na Obrázku 18.



Obrázek 17: Schéma testovací sestavy Omicron pro proudové převodníky



Obrázek 18: Schéma testovací sestavy Omicron pro napěťové převodníky

### Synchronizační část – OTMC 100

Hlavním zdrojem synchronizačního signálu je zařízení OTMC 100 od společnosti Omicron. Je řízen pomocí GPS signálu. Zajišťuje velmi přesnou časovou synchronizaci slučovacích jednotek, IED, počítačů a měřicích zařízení přes Ethernetovou síť. Může být použit jako zdroj PTPv2 a také jako NTP (*Network Time Protocol*). Díky speciální kombinaci GPS antény, GPS přijímače a zpracování tohoto signálu nevyžaduje pro připojení vysokofrekvenční kabely. Nastavení OTMC 100 je možné provést přes webové rozhraní. [8]

Časová synchronizace vyhodnocovacího zařízení DANE0 400 je provedena pomocí protokolu PTP, který musí být povolen v ovládacím softwaru DANE0 400, v záložce PTP Sniffer. Zde musí být nastaven PTP jako zdroj časové synchronizace a je-li OTMC 100 připojen do příslušného vstupu je automaticky detekován.

## Převodník – TICRO 100

Pro synchronizaci slučovací jednotky je možné využít 1 PPS. Pro převod mezi požadovanými synchronizačními protokoly slouží zařízení TICRO 100. Vstupním signálem je PTPv2, který může být převáděn na formát PPX, který může být nastaven jako dekadický násobek 1 PPS. TICRO může také poskytovat synchronizační signál IRIG-B, 10 MHz sinusový signál nebo může být použit pro generaci spouštěcích signálů.



Obrázek 19: Zařízení TICRO 100 [9]

## Vyhodnocovací zařízení – DANEO 400

Zařízení sloužící pro vyhodnocení testů je DANEO 400. Velkou výhodou toho zařízení je, že je určeno právě pro analýzu protokolu IEC 61850-9-2LE a je mu plně přizpůsobeno.

Jedná se o hybridní měřicí a záznamové zařízení vhodné pro použití v měřicích, ochranných a řídicích systémech. Je navrženo pro záznam a analýzu všech konvenčních signálů (sekundární napětí, proudy) a dat, která jsou posílána prostřednictvím Ethernetu v distribučních sítích. Vyhodnocení vstupních dat je provedeno komerčním softwarem DANEO Control, který je dostupný na webových stránkách výrobce. Mezi klíčové patří následující funkce, záznam a analýza dat, časově synchronizované měření, časová synchronizace PTPv2, dekodování IEC 61850-9-2LE, analogové napěťové a proudové vstupy, 100 % kompatibilita se zařízeními Omicron, binární vstupy a mobilita zařízení. DENE 400 je zobrazeno níže na Obrázku 20.



Obrázek 20: Zařízení DANEO 400 [10]

DANEO 400 má 10 analogových/binárních vstupů. Jejich nastavení lze nezávisle kombinovat v ovládacím softwaru. Rozsahy analogových vstupů jsou 10 mV, 100 mV, 1 V, 10 V, 100 V, 600 V. Vstupní impedance 1 M $\Omega$ . Vzorkovací frekvence analogových vstupů je 10 nebo 40 kHz. Chyby měření vstupů v závislosti na jednotlivých rozsazích a měřených frekvencích jsou uvedeny v následující Tabulce 9. Zároveň výrobce udává chybu měřené fáze menší než 0,1 ° a chybu měření frekvence menší než 0,01 %.

Tabulka 9: Maximální chyby měření analogových vstupů DANE0 400 [10]

Maximální chyba vstupů <sup>1</sup> [%]				
Vzorkovací frek.	10 kHz / 40 kHz	10 kHz / 40 kHz	10 kHz	40 kHz
Frek. rozsah	DC	10 Hz – 1 kHz	1 kHz – 4 kHz	1 kHz – 10 kHz
10 mV	0.08 + 0.5	0.20 + 0.3	0.20 + 0.3	0.20 + 0.3
100 mV	0.08 + 0.07	0.08 + 0.05	0.16 + 0.04	0.16 + 0.04
1 V	0.08 + 0.02	0.08 + 0.02	0.16 + 0.04	0.16 + 0.04
10 V	0.08 + 0.02	0.08 + 0.02	0.16 + 0.04	0.16 + 0.04
100 V	0.08 + 0.02	0.08 + 0.02	0.16 + 0.04	0.16 + 0.04
600 V	0.08 + 0.02	0.08 + 0.02	0.16 + 0.04	0.16 + 0.04

Pomocí softwaru je možné ovládat a konfigurovat měřicí systém. Software umožňuje měření hodnot jako je amplituda, fáze, RMS hodnota nebo frekvence. Je zde možností i provádění harmonické analýzy signálu. Pomocí softwaru lze pozorovat měřená data v čase, provádět nastavení spouštěcích podmínek nebo záznam dat. Způsob výpočtu zvolených parametrů ze „surových“ dat není výrobcem zveřejněn. Zaznamenaná data jsou souhrnně zobrazena a mohou být dále exportována v COMTRADE nebo PCAP formátu pro další analýzu v programech jako je TransView, IEDScout nebo Wireshark. [10]

Zařízení DANE0 400 pracuje na principu porovnávání signálů se stejnou časovou značkou. Časová synchronizace systému je provedena pomocí PTP signálu z OTMC 100. Vyhodnocovací zařízení DANE0 400 je synchronizováno přímo pomocí PTP s přesností lepší než 500 ns. Slučovací jednotka je synchronizována pomocí časového převodníku TICRO 100, který je zdrojem PPS signálu.

Testovací sestava Omicron je poměrně mobilní a robustní zařízení. Vzájemná spolupráce jednotlivých komponentů toho systému vyžaduje jen minimální zásah obsluhy a jejich propojení je prakticky řešeno systémem „Plug and play“, kdy je zajištěno automatické rozeznávání a konfigurace hardwaru. Omezení této sestavy je především ve vyhodnocovacím softwaru, který je k sestavě k dispozici. Tento software má již předdefinované funkce, které nelze měnit a tím je zamezen hlubší rozbor naměřených dat.

<sup>1</sup> Chyba je složena ze dvou částí. První část je procentní hodnota z měřené veličiny a druhá je vztažena k použitému měřicímu rozsahu

## 6 NÁVRH TESTOVACÍ SESTAVY

Při návrhu testovací sestavy je nejdůležitější problematikou správná volba jednotlivých komponent systému tak, aby byla dosažena co nejnižší chyba měření, kterou je možno zvolenými komponenty při respektování jejich ceny dosáhnout. Zároveň musí být měření spolehlivá a opakovatelná.

Volba samotných komponentů systému musí být přizpůsobena účelu, pro který bude sestava využívána. Například pro testování v provozních podmínkách nebo diagnostických měřeních bude u systému kladen důraz především na mobilitu a odolnost systému. Na druhou stranu jsou pro kalibrační účely používány přístroje s vysokou přesností, které pracují v laboratorních podmínkách.

Hlavním požadavkem pro testování slučovacích jednotek v sestavě s proudovými a napěťovými převodníky je vysoká přesnost měření a vysoký stupeň časové synchronizace systému. Ve své podstatě se jedná o kalibrační měření, a proto budou nejhodnějšími komponenty systému laboratorní přístroje.

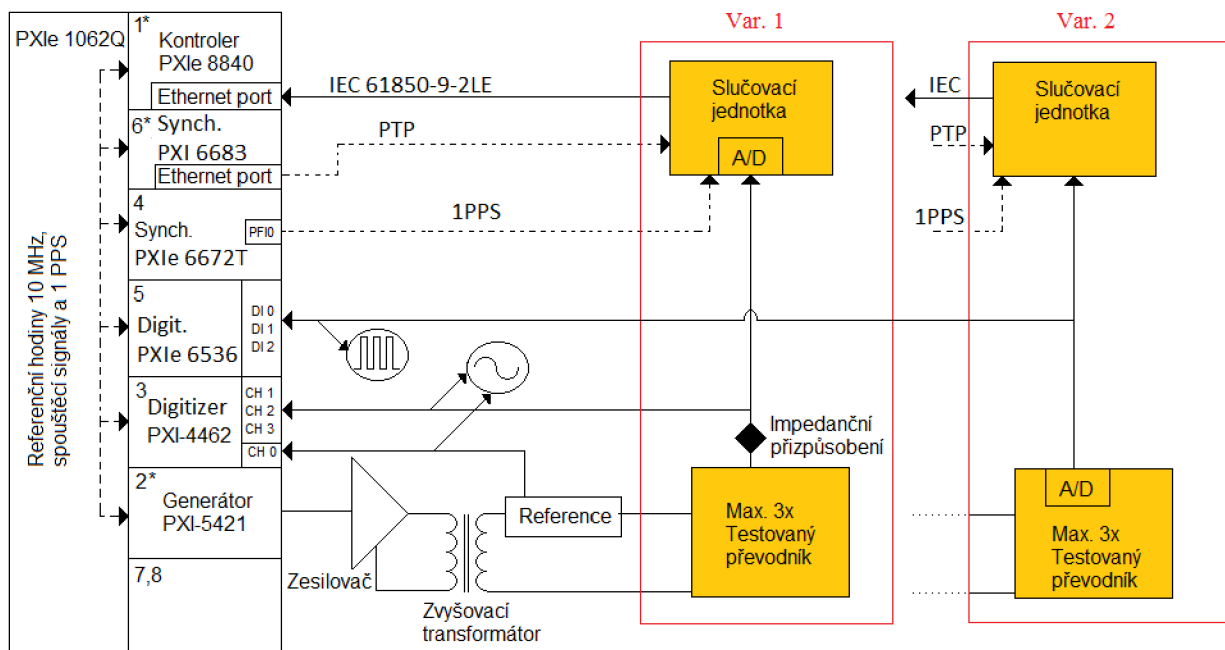
Testovací sestava je navržena s ohledem na vysokou flexibilitu a přesnost měření. Její vlastnosti vycházejí z podstaty modulárního systému PXI Express (PXIe). Zatímco automatické testovací procedury, jsou řízeny softwarem LabView. Navržená sestava je schopna měřit převodníky s analogovým nebo digitálním výstupem i převodníky v kombinaci se slučovací jednotkou poskytující výstup v souladu s IEC 61850-9-2LE. Toho je využito především pro stanovení vlivu analogového a digitálního převodu měřené veličiny.

Schéma testovací sestavy je uvedeno na Obrázku 21. Měřicí, synchronizační přístroje i kontrolér jsou zabudovány v šasi modulárního PXIe systému. Měřicí analogová karta (digitizér) podporuje až 4 vstupy, což umožňuje současné měření jedné reference a až tří převodníků. Možnost rozšíření měření pro více převodníků skýtá použití maticových přepínačů nebo multiplexorů. Pak je počet testovaných převodníků závislý na počtu vstupů a výstupu těchto přepínacích zařízení. Zdrojem zkušebního signálu je nízkonapěťový generátor libovolných funkcí, který je připojený na externí zesilovač a zvyšující transformátor umožňující dosažení vysokých úrovní generovaného signálu. Tento signál je přiveden na referenční převodník i testované převodníky. Analogový výstup z referenčního převodníku je zapojen do digitizéru. Připojení výstupu z testovaného převodníku závisí na rozhraní mezi slučovací jednotkou a testovaným převodníkem. Jsou uvažovány dvě varianty. První variantou (Var. 1) je analogové rozhraní, kdy je výstup z testovaného převodníku připojen paralelně do slučovací jednotky a digitizéru. Druhá varianta (Var. 2) je digitální rozhraní, kdy je výstup z testovaného převodníku připojen paralelně do slučovací jednotky a digitální karty.

Slučovací jednotka komunikuje s kontrolérem pomocí SV ve formátu IEC 61850-9-2LE a zároveň přijímá synchronizační signál ze synchronizační karty v podobě 1 PPS nebo PTPv2. Synchronizační karta je zdrojem velmi přesných hodin. Dokáže současně generovat volitelné synchronizační a spouštěcí signály vztažené k její vlastní časové základně. Zároveň je schopna distribuovat tyto signály na sběrnici modulárního systému PXIe a na konektory čelního panelu karty. To umožňuje zavedení sofistikovaných synchronizačních a spouštěcích schémat. V tomto případě jsou digitizér, digitální karta a generátor sfázovány s 10 MHz hodinovým signálem distribuovaným synchronizační kartou na sběrnici modulárního systému. Všechny tyto přístroje tak sdílí stejný velmi přesný hodinový signál. Tím je zamezeno časovému posuvu mezi funkcemi

jednotlivých přístrojů. Digitizér a digitální karta jsou synchronizovány pomocí 1 PPS signálu, který získávají ze sběrnice modulárního systému. Do slučovací jednotky je tento signál posílán pomocí konektoru čelního panelu synchronizační karty. Takové zapojení může vést až k synchronizaci testovací sestavy a měřeného řetězce přesnější než 10 ns [12].

Výběr jednotlivých komponent při návrhu testovací sestavy je volen na základě požadovaných funkcí a parametrů sestavy. Zároveň bylo bráno v potaz technické vybavení laboratoří UEEN (Ústav elektroenergetiky), aby bylo možné sestavu využít i bez nutnosti investování významných finančních prostředků na její pořízení. Komponenty dostupné na katedře jsou označeny hvězdičkou



Obrázek 21: Navržená testovací sestava

## 6.1 Komponenty navržené sestavy

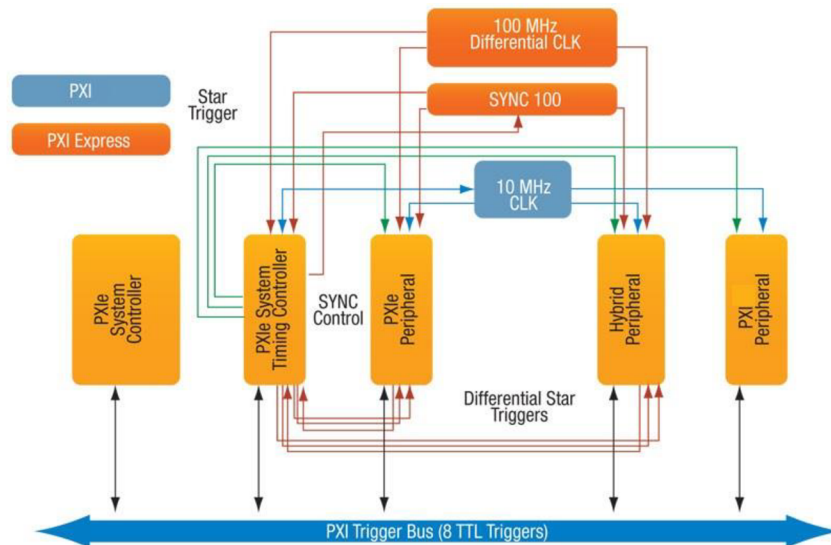
### 6.1.1 Modulární systém NI PXIe-1062Q

Obecně modulární PXI (*PCI eXtensions for Instrumentation*) a PXI Express (PXIe) šasi obsahuje sloty pro jednotlivé moduly. Zajišťuje jejich napájení a ovládání. Počet slotů se odvíjí od nabízených modelů. Šasi jsou dostupné od 4 do 18 slotů. Tyto sloty je možné osadit širokou škálou modulů, které jsou vhodné například pro generování nebo měření elektrických signálů, pro měření teploty signálovými analyzátory atd. Moduly jsou s šasi propojeny a řízeny přes lokální sběrnici šasi tzv. *backplane*.

Jak uvádí samotný výrobce [23]. Největší předností PXI a PXIe zařízení je, že překonává mnoho tradičních úskalí synchronizace tím, že používá integrovanou architekturu pro časování a synchronizaci s interním rozvodem synchronizačních a spouštěcích signálů. PXI šasi obsahuje vyhrazené referenční systémové hodiny 10 MHz, které pracují s přesností  $\pm 25$  ppm a časovou nejistotou  $\pm 5$  ps. Maximální rozdíl hodinového signálu mezi sloty je 250 ps. Dále obsahuje spouštěcí sběrnici PXI (*trigger bus*), spouštěcí sběrnici s hvězdicovou topologií (*star trigger bus*) a lokální sběrnici mezi sloty pro moduly. Šasi systému PXI Express (PXIe) přidává navíc diferenciální systémový hodinový signál s frekvencí 100 MHz, diferenciální přenos signálů a



diferenciální spouštěcí sběrnici s hvězdicovou topologií (*differential star trigger bus*), které splňují požadavky na pokročilé časování a synchronizaci. Schéma uspořádání hodinových a spouštěcích signálů v šasi PXI a PXIe je uvedeno na Obrázku 22.



Obrázek 22: Schéma uspořádání hodinových a spouštěcích signálů v šasi PXI a PXIe [24]

Hlavním prvkem navržené sestavy v této práci je modulární systém PXI Express 1062Q (PXIe-1062Q) od společnosti National Instruments. Hlavní úlohou modulárního systému je ovládání zdroje primárního signálu, řízení měření analogových i digitálních signálů a synchronizace celé sestavy. Tento systém byl zvolen především pro své vynikající vlastnosti v oblasti synchronizovaného měření. Další výhodou tohoto zařízení je velká flexibilita a kompatibilita systému. Vybrané šasi umožňuje použití jednotlivých modulů určených pro PXI i PXIe, což je výhodné zejména pro využití technického vybavení laboratoří UEEN. Zvoleným šasi je zajištěna kompatibilita systému a dosažení maximálního výkonu každého modulu. Zároveň je možno měnit konfiguraci systému výměnou nebo přidáním modulu. Grafické zobrazení modulárního systému PXIe-1062Q je na Obrázku 23 [25].



Obrázek 23: Navržená sestava modulárního systému PXIe-1062Q [14]

Základní údaje šasi PXIe-1062Q jsou přebrány z [25].

Počet slotů	8
Z toho	1x PXIe systémový slot 1x PXIe systémový časový slot 2x PXIe hybridní sloty 4x PXI kompatibilní sloty
Datový tok	3 GB/s
Napájení	100 V – 240 V / 50-60 Hz

### 6.1.2 Zdroje primárního signálu

Zkušební signál je generovaný modulem PXI-5421, který je umístěn v druhém portu šasi. Výstupní napětí tohoto generátoru je maximálně  $\pm 6 V_{P-P}$ , proto je nezbytně nutné, aby zkušební signál byl dále zesilován průmyslovým zesilovačem a zvyšujícím proudovým nebo napěťovým transformátorem.

#### Generátor PXI-5421\*

Karta PXI-5421 je generátor signálu libovolného tvaru vlny. Generátorová karta je znázorněna na Obrázku 24. Karta generuje na svém jediném výstupu signály s 16 bitovým rozlišením o maximálním výstupním signálu  $\pm 6 V_{P-P}$ . Funkce generátoru je řízena pomocí šasi, ve kterém je umístěn. Šasi zároveň poskytuje možnost sfázování funkce generátoru s ostatními moduly, což má pozitivní vliv na stabilitu výsledků při opakování testů.



Obrázek 24: Generátorová karta PXI-5421 [14]

#### Průmyslový zesilovač – AE Techron 7224\*

Pro dosažení potřebných úrovní primárního signálu je třeba výstupní signál z generátoru PXI-5421 zesílit. Jedna z možností zesílení signálu se nabízí pomocí průmyslového zesilovače AE Techron 7224. V dostupných materiálech [26] výrobce uvádí výkon tohoto zařízení při dlouhodobém chodu 1,1 kW. Zesilovač disponuje nastavitelnou úrovní zesílení, jehož maximální hodnota je dvacetinásobek vstupního signálu. Frekvenční možnosti zesilovače jsou v rozmezí od stejnosměrného signálu až po 30 kHz při THD menším než 0,1 %. Zesilovač je možné provozovat v režimech kontrolovaného proudu nebo kontrolovaného napětí pro lepší přizpůsobení napájenému obvodu. Při krátkodobém provozu je průmyslový zesilovač schopný dodávat proud až 52 A po dobu 40 ms do zátěže 0,5  $\Omega$ . Při požadavku na zvýšení výkonu zesilovače je možné zařízení provozovat v sériovém nebo paralelním spojení více jednotek a tím dosáhnout výkonu až 4 kW a 200 A na výstupu.

V Tabulce 10 jsou uvedené výstupní hodnoty proudu a napětí zesilovače pro dané zatížení a dobu provozu 5 minut.

Tabulka 10: Výstupní hodnoty proudu a napětí zesilovače

Výstupní parametry zesilovače v efektivních hodnotách			
Zátěž	Režim kontrolovaného napětí		
[ $\Omega$ ]	Napětí [V]	Proud [A]	Výkon [W]
16	112	6,9	773
8	96	11,5	1104
4	76	18,2	1383
Zátěž	Režim kontrolovaného proudu		
[ $\Omega$ ]	Napětí [V]	Proud [A]	Výkon [W]
16	20,5	20,5	420
8	18	24	432
4	16	32	512

### Napět'ový zvyšovací transformátor

V případě potřeby dalšího zesílení signálu lze pro zesílení napětí použít libovolný vysokonapět'ový transformátor napájený do sekundárního vinutí, který je navržen pro danou frekvenci. Pro níže specifikované testy je s ohledem na izolační vlastnosti vhodný transformátor o jmenovité hodnotě primárního napětí  $35 \text{ kV}/\sqrt{3}$  a jmenovitého sekundární hodnotě napětí  $110 \text{ V}/\sqrt{3}$ .

### Proudový zvyšovací transformátor

Pro účely zesílení primárního signálu při proudových testech je vhodnou variantou použití jednofázového silového transformátoru, jehož parametry jsou navrženy vzhledem k potřebným výstupním hodnotám a možnostem průmyslového zesilovače.

### 6.1.3 Měřicí zařízení

Mezi měřicí zařízení jsou zahrnuta všechna zařízení, která jsou použita pro proces měření elektrických a digitálních signálů. Jedná se tedy o zařízení sloužící pro měření sekundárních signálů měřeného a referenčního převodníku.

### Měření analogových signálů

Pro zprostředkování měření analogových signálů je použita měřicí karta PXI-4462, která je umístěna ve třetím slotu PXIe šasi. Jedná se o vysoce přesné zařízení pro sběr dat, které obsahuje hardware a software potřebný pro precizní měření signálů z mikrofonů, akcelerometrů a dalších převodníků, které mají velké dynamické rozsahy. Sběr dat kartou může být synchronizován s ostatními moduly v PXIe šasi a může být také spouštěn pomocí analogového a digitálního signálu.

Karta obsahuje čtyři analogové vstupy s 24 bitovými A/D převodníky, které současně sbírají data se softwarově programovatelnou rychlostí sběru. Maximální napětí, které je na vstupy možné přivést je  $\pm 42,4 \text{ V}_{\text{p.p.}}$ . Měření je možno provádět na šesti rozsazích odstupňovaných podle úrovně vstupního signálu, kdy každý z kanálů může pracovat na jiném rozsahu. Vizualizace karty je na Obrázku 25. V následující Tabulce 11 jsou vypsány základní technické parametry karty.

Obrázek 25 a Tabulka 11 byly přejaty z [27]. Alternativou ke kartě PXI-4462, může být karta PXI-4472\*



Obrázek 25: Digitizér PXI-4462 [27]

Tabulka 11: Technické parametry karty PXI-4462 [27]

Základní údaje:		Rozsahy karty:	
Počet vstupů	4	Rozsah	Napětí (V)
A/D převodník	24 bitů	30	$\pm 0.316$
Rychlost sběru dat	1 kS/s – 204 kS/s	20	$\pm 1.00$
Max. vstupní napětí	$\pm 42.4 V_{pk}$	10	$\pm 3.16$
Počet rozsahů	6	0	$\pm 10.0$
Vstupní impedance	1 M $\Omega$	-10	$\pm 31.6$
Citlivost	37.7 nV	-20	$\pm 42.4$

### Měření digitálních signálů

Měření digitálních signálů je provedeno za pomoci digitální karty PXIe-6536. Vlastnosti této karty jí předurčují pro flexibilní měření komunikačních aplikací. Jedná se o vysokorychlostní kartu pracující na frekvenci až 25 MHz. Umožňuje měření až 32 kanálů současně. Je kompatibilní pro měření 2,5 V, 3,3 V a 5 V TTL signálu. Časování a synchronizace karty je řešena obdobně jako u digitizéru pomocí PFI konektoru nebo signálů přijímaných ze sběrnice šasi.

### Vyčítání Sampled Values

Hodnoty, které poskytuje slučovací jednotka, jsou vyčítány z Ethernetového portu kontroléru, popřípadě Ethernetového portu karty PXI-6683. Kontrolér i karta PXI-6683 jsou vybaveny Ethernetovým portem se standardním konektorem RJ 45. V případě synchronizace protokolem PTPv2 je možné použít tento port pro synchronizaci i vyčítání dat současně. Jednotlivé hodnoty amplitudy a fáze jsou z dat extrahovány příslušnou knihovnou funkcí.

### Referenční převodníky proudu

Jak již bylo diskutováno výše, referenční převodníky slouží pro převod primárního signálu na hodnoty signálu, které jsou vhodné pro vstupy měřicích karet. Sekundární výstup z referenčních převodníků je brán jako obecně správná hodnota, se kterou jsou porovnávány ostatní signály za účelem vyhodnocení rozdílů.

Referenční převodníky pro proudové měření byly vybrány celkem čtyři. Každý z převodníků je vhodný na jinou velikost měřeného proudu. Určení jednotlivých převodníků je následující:

LEM ITZ 5000-SB FLEX ULTRASTAB*	600 – 3500 A
Danisense 600UBSA-10*	200 – 600 A
Danisense 200UBSA-10*	30 – 200 A
Bočník Ohm-Labs 1 mΩ	0 – 30 A

První převodník, pro nejvyšší primární proudy, je ITZ 5000-SB FLEX ULTRASTAB od společnosti LEM. Jedná se o velmi přesné zařízení, které je založené na principu zpětně kompenzovaného proudového převodníku. Jak je vidět na Obrázku 26, referenční převodník má dvě samostatné části. První částí je senzorová hlava, která obepíná primární vodič a poskytuje údaje o primárním signálu elektronice. Elektronika zajišťuje zpětnou kompenzaci senzorové hlavy a poskytuje informace o měřeném signálu na výstupní konektor. Mezi hlavní přednosti zmíněného převodníku je vysoká přesnost měření, napěťový sekundární výstup a možnost měření v širokém rozsahu frekvencí. Tento referenční převodník je možné využít pro měření primárních proudů od 600 A do 3500 A



Obrázek 26: Referenční proudový převodník LEM ITZ 5000-SB FLEX ULTRASTAB[28]

V následující Tabulce 12 jsou shrnuty hlavní parametry převodníku.

Tabulka 12: Hlavní parametry proudového referenčního převodníku LEM ITZ 5000-SB

Jmenovitý primární proud <sup>2</sup>	5000A	Amplitudová chyba <sup>3</sup>	0,0064 %
Jmenovitý sekundární výstup	10 V	Chyba fáze	<0,05 min
Jmenovitý převod	500 A / 1 V	Šířka pásma	Až 100 kHz

Dalšími převodníky jsou Danisense 200UBSA-10 a Danisense 600UBSA-10, které jsou využity pro měření proudu v rozmezí od 30 – 200 A a 200 – 600 A. Princip funkce převodníku je opět založen na zpětné kompenzaci. Hlavní parametry převodníku jsou shrnuty v následující Tabulce 13 převzaté z [29].

<sup>2</sup> Jedná se o maximální měřitelnou hodnotu stejnosměrného proudu

<sup>3</sup> Honota přesnosti měření je vztažena k celému měřicímu rozsahu a odpovídajícímu sekundárnímu výstupu 10 V.

Tabulka 13: Hlavní parametry proudových referenčních převodníků pro 600 A a 200 A

Danisense	600UBSA-10	200UBSA-10
Jmenovitý primární proud <sup>4</sup>	600 A	200 A
Jmenovitý sekundární výstup <sup>5</sup>	10 V	10 V
Jmenovitý převod	60 A / 1 V	20 A / 1 V
Amplitudová chyba	0,01 %	
Chyba fáze <sup>6</sup>	0,012 °	
Šířka pásma	Až 100 kHz	

Posledním navrženým převodníkem, který je vhodný pro měření nejnižších proudů je odporový bočník od společnosti Ohm-Labs model 1003. Jehož jmenovitý proud je 30 A a rezistence 1 mΩ. Při měření s tímto bočníkem lze dosáhnou amplitudové přesnosti 0,01% [30].

Volba až čtyř referenčních převodníků proudu se může na první pohled zdát nadbytečná. Tato „kaskáda“ referencí má opodstatnění ve stanovení přesnosti měření vztažené k velikosti primárního proudu.

Přesnost měření referenčních převodníků je stanovena pro jejich plný rozsah. Důsledkem toho je klesající přesnost měření se snižující se velikostí primárního proudu. Pro stanovení přesnosti měření daného primárního proudu lze využít následující vztah (16).

$$\varepsilon_{Ref\_A} = \left( I_{pr\_p} * \frac{\varepsilon_r}{100} / I_{p\_p} \right) * 100 \quad (16)$$

$\varepsilon_{Ref\_A}$  – amplitudová chyba referenčního převodníku,  $I_{pr\_p}$  – Jmenovitý primární proud převodníku,  $I_{p\_p}$  – Primární proud měřený převodníkem

Například pro měření 600 A, zařízením ITZ 5000-SB je výsledná přesnost měření stanovena podle (16) následující.

$$\varepsilon_{Ref\_A} = \left( I_{pr\_p} * \frac{\varepsilon_r}{100} / I_p \right) * 100 \quad (17)$$

$$\varepsilon_{Ref\_A} = \left( 5000 * \frac{0,0064}{100} / 600 \right) * 100 = 0,053 \%$$

Pro přehlednost jsou tímto způsobem vypočteny chyby měření všech vybraných převodníků. Hodnoty přesností jsou uvedeny v Tabulce 14. Z té vyplývá, že amplitudová chyba měření referenčních převodníků nepřesahuje hodnotu 0,06 %.

<sup>4</sup> Efektivního hodnota primárního proudu převodníku

<sup>5</sup> Efektivního hodnota sekundárního napětí převodníku

<sup>6</sup> Hodnota do 10 kHz primárního signálu stanovena v [1]

Tabulka 14: Přehled přesnosti měření převodníků v závislosti na velikosti  $I_{p,p}$ .

Převodník	$I_{p,p}$	Chyba	Převodník	$I_{p,p}$	Chyba
	[A]	[%]		[A]	[%]
LEM	5000	0.006	DSA200	200	0.010
	4000	0.008		100	0.012
	2000	0.016		50	0.024
	1000	0.032		40	0.030
	800	0.040		30	0.040
	600	0.053		20	0.060
DSA600	600	0.010	Bočník	30	0.001
	500	0.007		20	0.002
	400	0.009		10	0.003
	300	0.012		5	0.006
	200	0.018		1	0.030
	100	0.036		0.5	0.060

### Referenční převodníky napětí

Pro napěťové testy přesnosti při 50 a 60 Hz je uvažován speciálně navržený induktivní přístrojový transformátor od společnosti ABB typ KGUG 36\*. Design tohoto transformátoru je předimenzovaný z důvodu zaručení linearity transformátoru v širokém rozsahu primárních napětí. Transformátor má dva převody 35 kV / 17,5 V a 35 kV / 7 V. Pro použití transformátoru KGUG 36 jako reference musí být nejdříve transformátor kalibrován, aby mohla být kompenzována nepřesnost převodu transformátoru. Zde je předpoklad, že amplitudová chyba  $\varepsilon_{ref\_U}$  nepřesáhne 0,05 % a fázová chyba  $\varphi_{ref\_U}$  nebude větší než 0,06 '.

Zvolený referenční převodník napětí pro účely měření frekvenční odezvy je širokopásmový, přesný, vysokonapěťový dělič ZES Zimmer HST12-1 Ten rozšiřuje možnosti měření při vysokých frekvencích primárního signálu až na hladinu 14 kV. Tento dělič umožňuje měření signálů v rozmezí frekvencí DC – 300 kHz. Hlavní parametry tohoto děliče jsou uvedeny v následující Tabulce 15. [37]

Tabulka 15: Parametry HST12-1 [37]

Jmenovité primární napětí	14 kV
Jmenovitý převod	1/4000
Vstupní impedance	10 M $\Omega$
Amplitudová chyba	0,05 % pro 50/60 Hz 0,2 % do 10 kHz
Chyba fáze	0,06 ° pro 50/60 Hz 0,4 ° do 10 kHz
Garantované přesnosti měření až do 300 kHz	

Frekvenční napěťové testy s napětím do 10 V je možné provádět bez referenčního převodníku. Primární signál je měřen analogovým vstupem karty PXI-4462.

## 6.1.4 Zařízení pro synchronizaci měření

Důležitost a důvod přesné synchronizace byly již diskutovány v úvodní kapitole věnující se elektronickým přístrojovým transformátorům s digitálním výstupem i v kapitole realizovaných testovacích sestav. Proto zde budou nejprve popsány přístroje, které jsou použity pro precizní synchronizaci a následně jejich funkce a způsob, jakým je celý systém synchronizován.

### Synchronizační modul PXIe-6674T

Základním prvkem synchronizace testovací sestavy je generátor časového signálu PXIe-6674T, který je řízen přesným oscilátorem OCXO s přesností  $\pm 80$  ppb. Tento modul umožňuje generování rozmanitých synchronizačních signálů vztažených k jeho vlastní časové základně. Tyto signály je schopen dále distribuovat na konektory čelního panelu karty a také na sběrnici PXIe šasi, přes kterou jsou distribuovány do dalších modulů. To umožňuje zavedení sofistikované synchronizace a triggorvacích schémat s cílem optimalizovat časovou přesnost sběru dat. Je nezbytné, aby karta byla umístěna ve čtvrtém slotu šasi, tedy systémovém časovém slotu! [31]

### PXI-6683\*

Synchronizační karta PXI-6683 umožňuje časování, synchronizaci modulů a jednotlivých šasi v systémech PXIe. Karta používá GPS, IEEE 1588, IRIG-B nebo PPS signál jako referenční signál, podle kterého řídí vlastní oscilátor TCXO. Vlastní oscilátor může být následně použit pro synchronizaci ostatních modulů s referenčním signálem. GPS přijímač může napájet GPS anténu a získávat tak signály ze satelitu, který vysílá velmi přesné PPS signály, které PXI-6683 využívá pro dosažení časově přesné synchronizace více vzdálených zařízení [14].

V navrženém schématu může být karta použita pro vyčítání dat z Ethernetu. Zároveň může také sloužit jako *Grand master clock*, ve schématech synchronizace pomocí PTPv2. Časování karty je spjato s hodinami karty PXIe-6674T, čímž je zvýšena přesnost časování karty.

## 6.2 Způsob synchronizace a akvizice dat

Veškeré časování sestavy je vztaženo k hodinám, které jsou produkovány synchronizační kartou PXIe-6674T. Ta generuje přesný 10 MHz hodinový signál vztažený k vlastní časové základně karty. Tento signál je distribuovaný přes výstup PXI\_CLK10\_IN na sběrnici šasi modulárního systému. Tím přepisuje 10 MHz vlastní hodinový signál šasi a všechny moduly, které šasi obsahuje, sdílí tento hodinový signál jako referenční. V případě potřeby může být tento hodinový signál také dostupný na konektoru CLKOUT zmiňované karty. PXIe-6674T je použita také pro vysílání triggerů. Tato funkce spočívá v tom, že generuje 1 PPS signál na výstup PXI\_TRIG\_0, tedy spouštěcí digitální sběrnici šasi. Zároveň je stejný signál distribuován na konektor čelního panelu PFI0, který je určený pro slučovací jednotku.

Při časování a synchronizaci sestavy je důležité dosažení synchronizace právě mezi 1 PPS signálem, triggerem a výstupem generátoru. Tyto tři signály jsou navázány na referenční hodiny. Taková synchronizace je důležitá z důvodu:

- synchronizace mezi 1 PPS a triggorvacím signálem je zapotřebí pro současný sběr dat referenčního měření a ostatních vstupů;
- synchronizace s generátorem zajišťuje opakovatelnost měření vzhledem k fázové chybě a zabraňuje fluktuaci frekvence.

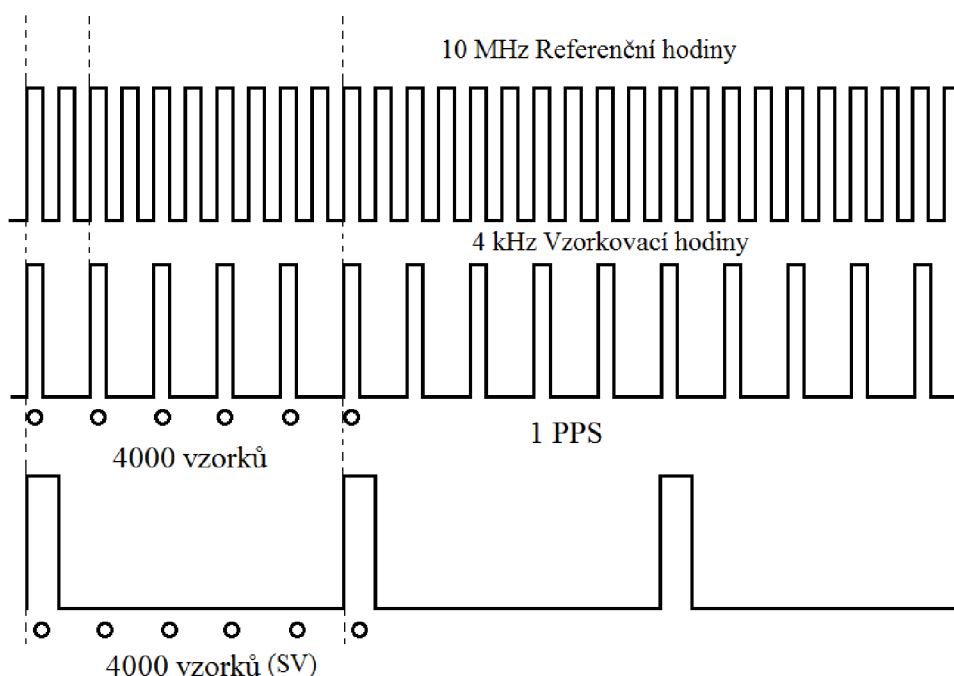


Při procesu akvizice dat probíhá zároveň současný sběr dat z digitizéru, popř. digitální karty a slučovací jednotky. Postup jak jsou jednotlivé hodnoty vzorkované je na Obrázku 27.

Vzorkování slučovací jednotky nastává s náběžnou hranou 1 PPS. Slučovací jednotka odesílá datové pakety (SV) obsahující data měřených hodnot s frekvencí 80-ti násobku jmenovité frekvence, tedy 4000 vzorků pro 50 Hz.

Vzorkování digitizéru je sfázováno s referenčními hodinami, kterými digitizér řídí vlastní 100 MHz odvozené hodiny. Odvozenými hodinami je následně řízen DDS čip digitizéru, který řídí vzorkovací hodiny. Akvizice dat je zahájena s náběžnou hranou triggeru z `PXI_TRIG_0`. Vzorkovací hodiny digitizéru jsou nastaveny stejně jako u slučovací jednotky. Akvizice dat je provedena pro předem stanovenou dobu, ideálně pro celočíselné násobky sekund.

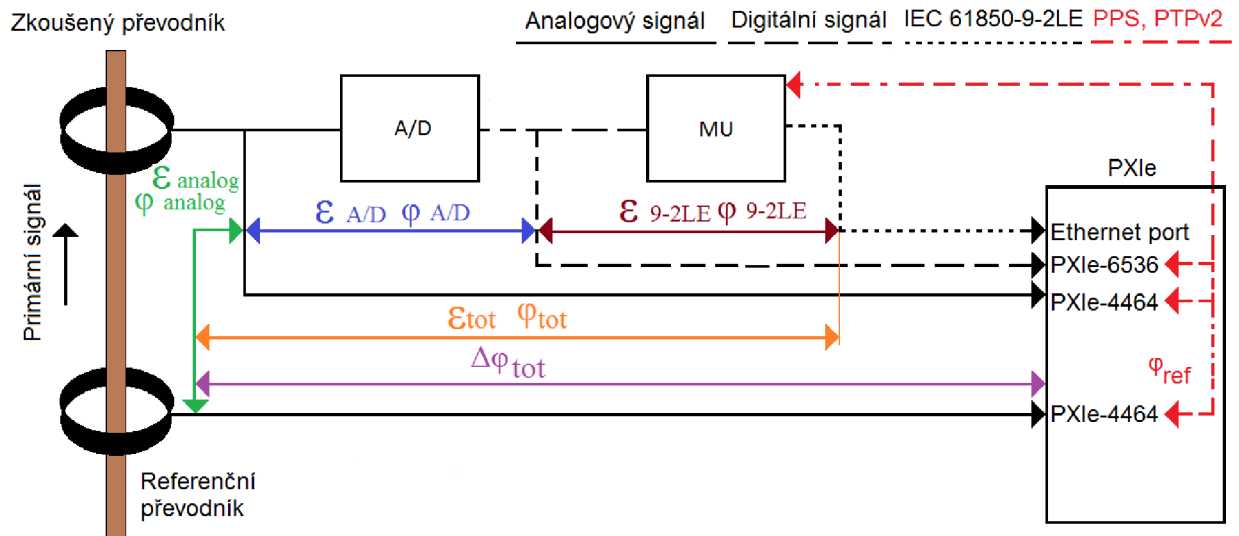
Při synchronizaci pomocí PTPv2 je použita karta PXI-6683, je jí softwarově povolena synchronizace IEEE 1588. Karta přebírá systémový čas řídicího kontroléru a zprostředkovává synchronizaci přes Ethernetový port karty. Ostatní časování a akvizice dat je neměnná.



Obrázek 27: Průběh vzorkování hodnot

### 6.3 Rozbor amplitudové chyby a chyby úhlu

Pro účely rozboru chyb je na zjednodušeném schématu sestavy (Obrázek 28) rozebrán měřicí řetězec z pohledu vývoje amplitudové a fázové chyby měřeného signálu. V podstatě lze říci, že každý jednotlivý prvek obvodu více či méně zkresluje přenášený signál. Toto zkreslení se následně projeví jako amplitudová nebo fázová chyba měřeného řetězce.



Obrázek 28: Zjednodušené schéma sestavy

### Primární převodník

V první řadě je měřený signál zkreslován primárním převodníkem. Výstupní signál z převodníku je stále analogový a obsahuje již zkreslení v podobě amplitudové chyby  $\varepsilon_{\text{analog}}$ , která je způsobena neideálním převodem zkoušeného převodníku. Chyba úhlu  $\varphi_{\text{analog}}$  je způsobena parazitními kapacitami a indukčnostmi převodníku.

### A/D převodník

Tento již zkreslený signál vstupuje do A/D převodníku, kde dochází k jeho digitalizaci. Převod na digitální podobu signálu je zdrojem dalšího zkreslení v podobě amplitudové chyby  $\varepsilon_{A/D}$  a časového zpoždění, které se projevuje jako chyba úhlu  $\varphi_{A/D}$ . Amplitudová chyba  $\varepsilon_{A/D}$  může být způsobena chybou zesílení A/D převodníku, která je dána odchylkou sklonu skutečné převodní charakteristiky A/D od ideální, chybou nuly a chybou linearity neboli převodu. Chyba úhlu  $\varphi_{A/D}$  může být například způsobena použitím antialiasing filtrů, které sice zamezují nesprávnému vzorkování, ale celou konverzi na digitální podobu hodnot zpomalují.

### Slučovací jednotka

Digitální signál dále putuje do slučovací jednotky (MU), kde je aktuálním hodnotám amplitudy a fáze přiřazena časová značka odpovídající času synchronizačního signálu. Označované hodnoty jsou pak spolu s dalšími údaji zabaleny do datových paketů podle struktury IEC 61850-9-2LE. Tyto pakety jsou posílány na výstup slučovací jednotky. Časové zpoždění, které je způsobené balením a odesláním paketu na výstup slučovací jednotky, je reprezentováno další chybou úhlu  $\varphi_{9-2LE}$ . Vzhledem k pouhému přeposlání digitální hodnoty amplitudy by zkreslení amplitudy  $\varepsilon_{9-2LE}$  mělo být zanedbatelné.

Vzhledem k variabilitě slučovacích jednotek nemusí být A/D převodník nezbytně samostatným zařízením a může být součástí přímo slučovací jednotky nebo primárního převodníku. Vliv převodu analogových hodnot na digitální je pak zahrnuto v chybách, které do řetězce vnáší zařízení obsahující A/D převodník.

## Testovací sestava

Ve vyhodnocovacím zařízení dochází k porovnávání údajů o měření s údaji referenčními. Synchronizační signál, který je určený pro měření a referenci, je zpracováván v modulech PXIe šasi. Každý z těchto modulů zpracovává časový signál s jinou citlivostí a rychlostí, což má za následek vznik nejistoty časování  $\varphi_{ref}$ . Tuto nejistotu však nelze přiřadit k měřenému řetězci. Za to ji lze přiřadit k testovací sestavě.

## Výsledné chyby

Výslednou amplitudovou chybou celého řetězce je  $\varepsilon_{tot}$ , která je dána součtem všech dílčích amplitudových chyb měřeného řetězce. Výslednou chybou úhlu celého řetězce je  $\varphi_{tot}$ . Výsledná chyba úhlu je opět dána součtem všech dílčích chyb úhlu řetězce. Zde lze definovat také chybu úhlu, která je způsobena časovým zpožděním přenosu SV po Ethernetu  $\Delta\varphi_{tot}$ . Ta se z podstaty definice chybu úhlu nedá přiřadit výsledné chybě úhlu celého řetězce  $\varphi_{tot}$  a může být vyjádřena jako rozdíl výsledné chyby úhlu celého řetězce  $\varphi_{tot}$  a úhlu, který je měřen referencí  $\varphi_{ref}$ . Velikost chyby úhlu  $\Delta\varphi_{tot}$  bude závislá na topologii Ethernetové sítě, přes kterou jsou SV přenášeny.

### 6.3.1 Výpočet amplitudové a fázové chyby

Způsob výpočtu amplitudové chyby je diskutovaný výše, v části práce, která se věnuje přiřazení třídy přesnosti. Amplitudovou chybu lze vypočítat pomocí rovnice (9) respektive (10).

Způsob výpočtu fázové chyby byl již rozebrán spolu se způsobem výpočtu chyby amplitudové. Fázovou chybu lze vypočítat pomocí rovnice (8).

V některých případech je vhodné použít jiný způsob vyhodnocení. Pro výpočet chyby dané harmonické složky je vhodný vzorec (12). Pro dlouhodobé testy je vhodné sledovat velikost kompozitní celkové chyby stanovené podle (13) a u testů ztráty synchronizace, lze ověření provést pomocí analýzy jednotlivých vzorků podle (14), respektive (15).

### 6.3.2 Zdroje fázové chyby navržené sestavy

Pro stanovení zdrojů fázové chyby navržené sestavy je nutné brát v potaz přístroje, které jsou při měření použity. Referenční signál je měřen referenčním převodníkem a výstup z referenčního převodníku je zpracován digitizérem PXI-4462 v šasi PXIe-1062Q. Z toho zákonitě plyne, že všechny tyto přístroje budou přispívat k fázové chybě referenčního signálu.

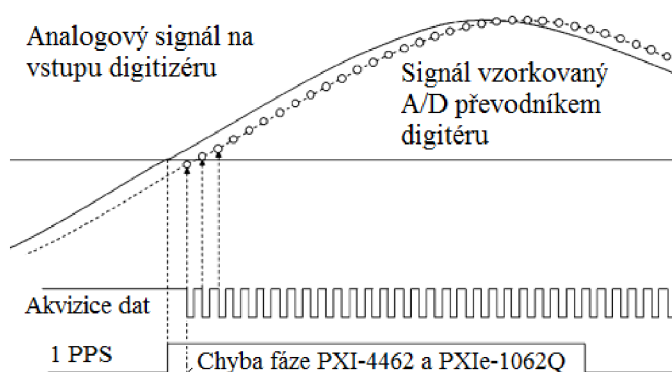
#### Chyba fáze referenčního převodníku

I přes to, že referenční převodník je velmi přesné zařízení, vnáší do měření fáze chybu  $\varphi_{ref,p}$ . Tato chyba je způsobena konvenčním převodem analogového signálu, obdobně jako u přístrojových převodníků jsou zdrojem chyby parazitní kapacity a indukčnosti. Velikost této chyby je dána výrobcem převodníku a je uvedena v jeho specifikacích.

#### Chyba fáze digitizéru PXI-4462 a šasi PXIe-1062Q

Chyba fáze digitizéru je způsobená časovou prodlevou, která je nezbytná pro zpracování analogových dat a časovou prodlevou mezi spouštěcím signálem, který iniciuje sběr dat a skutečným pořízením prvního vzorku (reakční čas). V poslední řadě je velikost fázové chyby ovlivněna dobou šíření (zpoždění) triggrovacího signálu na sběrnici šasi PXIe-1062Q. Vliv zmiňovaných časových zpoždění je uveden na Obrázku 29.

Digitizér převádí analogová data pomocí delta-sigma převodníku. Tento převodník obsahuje modulátory, komparátory a filtry, které způsobí zpoždění měřené analogové hodnoty na výstupu digitizéru. Toto zpoždění je uváděno výrobcem karty jako zpoždění filtru A/D převodníku. Závisí na rychlosti vzorkování digitizéru a nastavení filtru delta-sigma převodníku. Hodnota zpoždění je uváděna v počtu zpožděných vzorků, které lze softwarově kompenzovat.

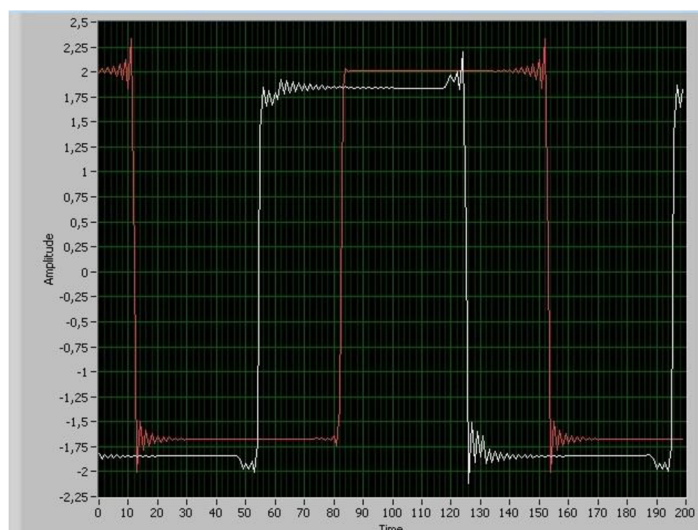


Obrázek 29: Chyba fáze vyplývající ze zpoždění A/D převodníku a reakčního času digitizéru [32]

### Kompenzace zpoždění filtru A/D převodníku

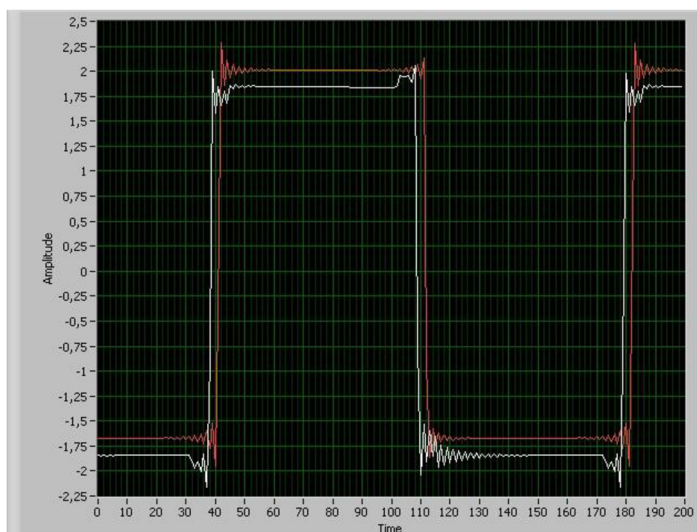
Pro správnou kompenzaci je nutné uvažovat která data digitizér poskytuje na svém výstupu. Po zahájení vzorkování triggerovacím signálem digitizér začíná měřit analogové hodnoty na svém vstupu. Zatímco probíhá zpracování analogových hodnot přes komparátory a filtry, na výstupu digitizéru je stále „nula“. První korektní hodnota je přivedena na výstup digitizéru až jako  $X+1$ -tý vzorek v závislosti na nastavení funkce digitizéru. Například pro vzorkovací frekvenci 100 kHz digitizéru se zapnutým filtrem je výrobcem udávaná hodnota zpoždění  $X=63$  vzorků. Pro tento případ je první platný vzorek na výstupu až  $63+1$ , tedy 64. vzorek.

Kompenzaci toho zpoždění je možné jednoduše provést odstraněním  $X$  vzorků ze sady naměřených dat nebo upravením reakce digitizéru na trigger. Na následujících obrázcích jsou porovnány synchronně měřené signály dvou měřících karet před kompenzací (Obrázek 30) a po kompenzaci zpoždění filtru A/D převodníku (Obrázek 31). Měřící karta, která není zatížena zpožděním filtru A/D převodníku, je zobrazena bílou křivkou. Měřící karta využívající delta-sigma převodník je zobrazena červenou křivkou.



Obrázek 30: Porovnání synchronně měřených signálů před kompenzací [33]

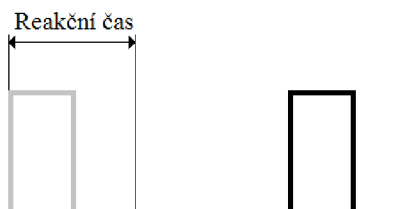
Přestože byla provedena kompenzace zpoždění filtru, je na Obrázku 31 stále viditelné časové zpoždění obou signálů. Tento rozdíl je způsoben reakčním časem měřicí karty.



Obrázek 31: Porovnání synchronně měřených signálů po kompenzaci zpoždění filtru A/D převodníku [33]

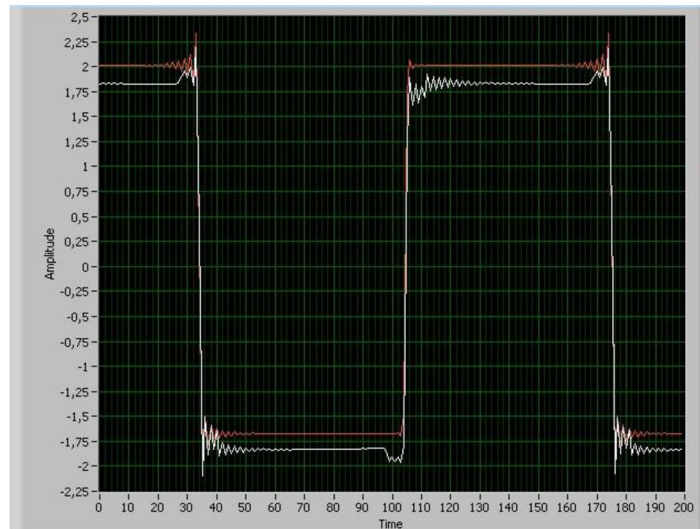
### Kompenzace reakčního času

Kompenzace reakčního času spočívá v použití obdélníkového signálu, který je měřen analogovým vstupem karty a zároveň je tento signál použit jako trigger. Princip je takový, že je použit přesný obdélníkový signál o známé frekvenci. Pro tento signál je pak možné měřit, kdy byl pořízen první vzorek signálu a jaká část signálu nebyla zachycena. Chybějící část signálu viz. Obrázek 32 je hledaný reakční čas.



Obrázek 32: Stanovení reakčního času

Kompenzace reakčního času lze provést obdobně jako kompenzaci zpoždění filtru A/D převodníku. Poté je zpoždění karty PXI-4462 minimální, tak jak je zobrazeno na Obrázku 33.



Obrázek 33: Porovnání synchronně měřených signálů po kompenzaci zpoždění filtru A/D převodníku a reakčního času[33]

Po provedení kompenzací můžeme shrnout celkovou fázovou chybu reference jako chybu úhlu referenčního převodníku  $\varphi_{ref\_p}$  a zpoždění triggerovacího signálu na sběrnici šasi, které je výrobcem stanoveno v [34] jako menší než 10 ns.

Přepočet časové hodnoty na chybu úhlu v minutách lze provést dle rovnice (18), kde je také stanovena chyba fáze pro hodnotu časového zpoždění 10 ns při jmenovité frekvenci 50 Hz.

$$\varphi_{trig} = \frac{\Delta t_{trig}}{f_r^{-1}} * 360 * 60 \quad (18)$$

$$\varphi_{trig} = \frac{10^{-9}}{50^{-1}} * 360 * 60 = 0,0108 \text{ min}$$

$\varphi_{trig}$  –chyba úhlu způsobená zpožděním triggeru,  $\Delta t_{trig}$  – časové zpoždění triggeru

Celková chyba fáze měření napětí je

$$\varphi_{RS\_U} = \overline{\mp}(\varphi_{ref\_U} + \varphi_{trig}) \quad (19)$$

$$\varphi_{RS\_U} = \overline{\mp}(0,06 + 0,011)$$

$$\varphi_{RS\_U} = \overline{\mp} 0,071 \text{ min}$$

$\varphi_{RS\_U}$  – Fázová chyba referenčního měření napětí,  $\varphi_{ref\_U}$  – chyba úhlu referenčního převodníku napětí

Celková chyba fáze měření proudu je

$$\varphi_{RS\_I} = \overline{\mp}(\varphi_{ref\_I} + \varphi_{trig}) \quad (20)$$

$$\varphi_{RS\_I} = \overline{\mp}(0,012 + 0,011)$$

$$\varphi_{RS\_I} = \overline{\mp} 0,022 \text{ min}$$

$\varphi_{RS\_I}$  – Fázová chyba referenčního měření proudu,  $\varphi_{ref\_I}$  – chyba úhlu referenčního převodníku proudu

## Zdroje amplitudové chyby referenčního systému

Obdobně jako u fázové chyby je amplitudová chyba referenčního systému způsobena referenčním převodníkem a chybou měření vstupu digitizéru.

### Amplitudová chyba referenčního převodníku, $\varepsilon_{ref}$

I přes to, že referenční převodník je velmi přesné zařízení, vnáší do měření amplitudy chybu  $\varepsilon_{ref}$ . Tato chyba je způsobena neideálním převodem analogového signálu. Velikost této chyby je dána výrobcem převodníku a je uvedena v jeho specifikacích.

### Amplitudová chyba digitizéru PXI-4462

Amplitudová chyba měřícího vstupu digitizéru je poněkud komplexnější záležitostí. Celková chyba vstupu záleží na třech hlavních parametrech karty. Tyto parametry jsou následující: DC offset vstupu karty, amplitudová chyba rozsahu, na kterém je měření provedeno a jednotvárnost (*Flatness*) měření analogového vstupu.

### Jednotvárnost analogového vstupu (*Flatness*)

Za ideálních podmínek nebude přesnost měření amplitudy závislá na frekvenci vstupního signálu. Nicméně, vzhledem k neideálním vlastnostem reálných měřících přístrojů, se může naměřená amplituda signálu mírně lišit v závislosti na jeho frekvenci. Jednotvárnost analogového vstupu je měřítkem toho, jak se odezva měřícího vstupu liší v celé jeho šířce pásma.

Pro představu, dokonalý přístroj by měřil sinusový signál o amplitudě 1 V, přesně 1 V<sub>P-P</sub>, bez ohledu na frekvenci sinusového průběhu v celém rozsahu propustného pásma. Avšak žádný přístroj není dokonalý a bude v těchto případech viditelná variace amplitudy v závislosti na frekvenci.

Specifikace jednotvárnosti analogového vstupu poskytovaná výrobcem říká, jak velká variace amplitudy může být očekávána při měření signálu o frekvenci 1 kHz. Jedná se o relativní specifikaci přesnosti a jedná se o přídavnou chybu k amplitudové chybě přesnosti. [35]

Specifikace výrobce karty PXI-4462, vzhledem k jednotvárnosti analogového vstupu, je uvedena v Tabulce 16.

Tabulka 16: Jednotvárnost analogového vstupu karty PXI-4462 [27]

Rozsah	Jednotvárnost* (dB), Maximální (Typická)		
	20 Hz – 20 kHz	20 Hz – 45 kHz	90 Hz – 92,2 kHz
0, 10, 20, 30	±0,006 (±0,003)	±0,03 (±0,02)	±0,1 (±0,08)
-20, -10	±0,2 (±0,1)	±0,6 (±0,33)	±1 (±0,55)
* Vztaženo k 1 kHz			

Převod do procentních hodnot na rozsazích vstupů 0 až 30 dB pro frekvenci signálu 20 Hz až 20 kHz je následující.

$$\mp \varepsilon_{Flatness} = 20 \log(1 + (Jednotvárnost/100)) \quad (21)$$

$$\mp \varepsilon_{Flatness} = 20 \log(1 + (0,003/100))$$

$$\varepsilon_{Flatness} = \pm 0,0345 \%$$

$\varepsilon_{Flatness}$  – chyba jednotvárnosti analogového vstupu

Z předchozího popisu chyby způsobené nejednotvárností měření signálu a Tabulky 16 je zřejmé, že velikost chyby nejednotvárnosti roste s frekvencí měřeného signálu a dá se očekávat, že hodnota chyby nejednotvárnosti pro hodnoty frekvence v okolí 50 a 60 Hz bude menší než 0,01%.

Touto chybou jsou zatíženy všechny vstupy digitizéru stejně, a proto nebude uvažován při měření velikosti amplitudové chyby analogové části převodníku  $\varepsilon_{analog}$ .

### DC offset, $\varepsilon_{DC-offset}$

DC složka je konstantní stejnosměrný parazitní signál na vstupu digitizéru. Jeho hodnota je výrobcem stanovena v závislosti na zvoleném rozsahu podle Tabulky 17.

Tabulka 17: Velkosti DC offsetu v závislosti na zvoleném rozsahu [27]

Rozsah	DC- Offset (mV)	Rozsah	DC- Offset (mV)
30	0,1	0	0,7
20	0,2	-10	5
10	0,5	-20	7

Chybu způsobenou DC offsetem lze poměrně jednoduše odstranit nastavením vazby měření digitizéru na AC vazbu. Při nastavení módu AC vazby je zapojen kapacitor do série mezi kladnou svorku vstupního signálu a vstupní kanál digitizéru. Záporná svorka je zapojena napřímo. Toto nastavení digitizéru odstraní DC složku z měřeného signálu. Popřípadě se dá programově odstranit v LabView.

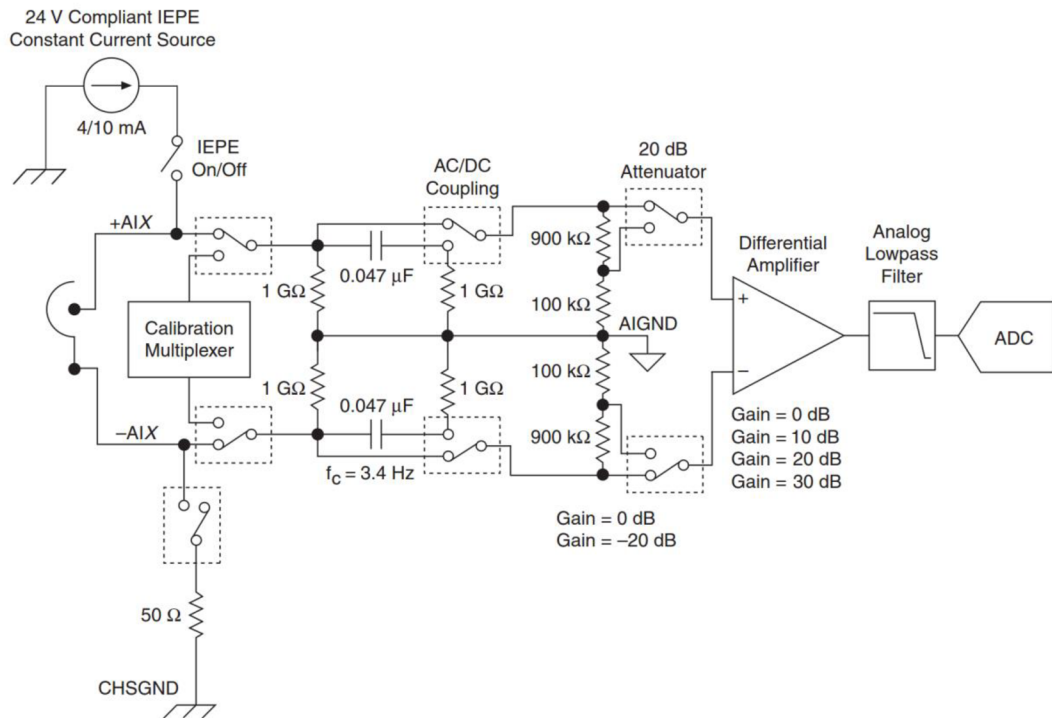
### Amplitudová chyba rozsahu, $\varepsilon_{4462}$

Amplitudová chyba rozsahu je nejvýraznější složkou celkové amplitudové chyby digitizéru. Zde je poněkud nevhodné se držet specifikací výrobce. Ten udává absolutní amplitudovou chybu 0,03 dB, tedy 0,345 %. Tato hodnota je maximální amplitudová chyba přes všechny rozsahy, za předpokladu, že teplota, při níž zařízení pracuje, se nezmění o více jak  $\pm 5$  °C od poslední interní kalibrace. Velikost amplitudové chyby je zavádějící kvůli specifikaci přes všechny rozsahy. Ne všechny rozsahy digitizéru mají stejný princip funkce, proto jejich amplitudová chyba bude záviset na principu funkce daného rozsahu.

### PXI-4462 Rozsah a útlum, $\varepsilon_{Gain}$

PXI-4462 dává na výběr nastavení z až šesti rozsahů pro každý z analogových vstupů. Označení rozsahů je uváděno v decibelech (dB), kde referenční rozsah je 0 dB o maximální velikosti vstupního signálu  $\pm 10$  V. Blokové schéma obvodu pro zpracování analogového signálu vstupem digitizéru je na Obrázku 34.





Obrázek 34: Blokové schéma obvodů analogového vstupu PXI-4462 [36]

Jednotlivé rozsahy zpracovávají analogový signál následovně. Při nastavení kladných hodnot rozsahu digitizéru (30 dB až 0 dB) je analogový signál zesilován diferenciálním zesilovačem dříve, než dosáhne A/D převodníku (ADC), který ho digitizuje. Zesílení signálu před digitizací umožňuje lepší rozlišení a citlivost zařízení a tím i vyšší přesnost měření. Zároveň však snižuje velikost daného rozsahu. Naopak záporné rozsahy digitizéru (-10 dB a -20 dB) nejprve analogový signál utlumí a až poté dochází k digitizaci. Tento útlum zvětšuje efektivní rozsah měření avšak na úkor přesnosti a citlivosti měření [36]. Přehled zpracování signálu v závislosti na nastaveném rozsahu je uveden v následující Tabulce 18.

Tabulka 18: Přehled metody zpracování signálu v závislosti na nastaveném rozsahu [36]

Rozsah	Zpracování
0, 10, 20, 30	Diferenciální zesilovač
-10	Kombinace rozsahů -20 dB a 10 dB
-20	Síť odporových děličů

Většina testů, které jsou navrženy níže, jsou koncipovány tak, aby byly využity především rozsahy 30 dB až 0 dB a rozsahy -20 dB a -10 dB používány nebyly. Tato koncepce je účelně zvolená právě kvůli výše uvedeným skutečnostem o amplitudové chybě rozsahů -20 dB a -10 dB, která je až desetinásobná oproti rozsahům 30 dB až 0 dB. Proto by tyto rozsahy neměly být používány pro měření přednostních tříd.

Použití kladných rozsahů karty má vysoký potenciál vzhledem k amplitudové chybě. Její hodnota by měla být větší než 0,08 % za předpokladu, že teplota, při níž zařízení pracuje, se nezmění o více jak  $\pm 5$  °C od poslední interní kalibrace. A 0,02 % za předpokladu, že teplota, při níž zařízení pracuje, se nezmění o více jak  $\pm 1$  °C od poslední interní kalibrace. Relativní chyba mezi jednotlivými kanály digitizéru je menší než 0,005 %.

Na měření analogových hodnot má vliv pouze relativní chyba mezi kanály. Při měření na stejných rozsazích jsou všechny vstupy zatíženy stejnou chybou, která se tím eliminuje. Ta je uvažována pro měření velikosti amplitudové chyby analogové části převodníku  $\varepsilon_{analog}$ . Amplitudová chyba kladných rozsahů má vliv na měření velikosti amplitudové chyby A/D převodníku  $\varepsilon_{A/D}$  a amplitudové chyby výstupu slučovací jednotky  $\varepsilon_{9-2LE}$ .

Podle výše uvedeného rozboru je digitizér PXI-4462 schopný provádět vysoce přesné měření analogových signálů za následujících předpokladů:

- pro měření jsou použity pouze kladné rozsahy jednotlivých vstupů
- zařízení je používáno v prostředí, kde nedochází ke změnám teploty, bez proudů teplého nebo studeného vzduchu
- zařízení by mělo být zapnuto minimálně 30 minut před započítím interní kalibrace
- před započítím měření by měla být provedena interní kalibrace

### Celková amplitudová chyba digitizéru PXI-4462

Při splnění výše uvedených podmínek a nastavení je spočtena celková amplitudová chyba digitizéru pro měření přesnostních tříd následovně.

$$\varepsilon_{4462} = \varepsilon_{Flatness} + \varepsilon_{DC-offset} + \varepsilon_{Gain} \quad (22)$$

$\varepsilon_{4462}$  – amplitudová chyba rozsahu karty PXI-4462,  $\varepsilon_{DC-offset}$  – chyba způsobená DC offsetem,  $\varepsilon_{Gain}$  – amplitudová chyba daného rozsahu

Pro čistě analogové měření ( $\varepsilon_{analog}$ )

$$\begin{aligned} \varepsilon_{4462} &= \varepsilon_{Flatness} + \varepsilon_{DC-offset} + \varepsilon_{Gain} \\ \varepsilon_{4462} &= 0 + 0 + 0,005 \\ \varepsilon_{4462} &= 0,005 \% \end{aligned} \quad (23)$$

Pro analogově digitální měření ( $\varepsilon_{A/D}$ ,  $\varepsilon_{9-2LE}$ )

$$\begin{aligned} \varepsilon_{4462} &= \varepsilon_{Flatness} + \varepsilon_{DC-offset} + \varepsilon_{Gain} \\ \varepsilon_{4462} &= 0,01 + 0 + 0,02 \\ \varepsilon_{4462} &= 0,03 \% \end{aligned} \quad (24)$$

Amplitudová chyba měření napětí je stanovena na hodnotu

$$\begin{aligned} \varepsilon_{RS\_U} &= \pm (\varepsilon_{ref\_U} + \varepsilon_{4462}) \\ \varepsilon_{RS\_U} &= \pm (0,05 + 0,03) \\ \varepsilon_{RS\_U} &= \pm 0,08 \% \end{aligned} \quad (25)$$

$\varepsilon_{RS\_U}$  – amplitudová chyba napěťového měření,  $\varepsilon_{ref\_U}$  – amplitudová chyba referenčního převodníku napětí

Amplitudová chyba měření proudu je stanovena na hodnotu

$$\begin{aligned}\varepsilon_{RS_I} &= \pm (\varepsilon_{ref_I} + \varepsilon_{4462}) \\ \varepsilon_{RS_I} &= \pm (0,06 + 0,03) \\ \varepsilon_{RS_I} &= \pm 0,09 \%\end{aligned}\tag{26}$$

$\varepsilon_{RS_I}$  – amplitudová chyba proudového měření,  $\varepsilon_{ref_I}$  – amplitudová chyba referenčního převodníku proudu

Souhrnné hodnoty amplitudové a fázové chyby měření navržené sestavy jsou uvedeny v Tabulce 19.

Tabulka 19: Souhrnné hodnoty chyb měření

Primární signál		Proudový	Napěťový
Maximální amplitudová chyba	[%]	± 0.09	± 0.08
Maximální fázová chyba	[°]	± 0.022	± 0.071

### 6.3.3 Metrologické požadavky navržené sestavy

Vzhledem k metrologickým požadavkům, které jsou vyžadovány na území ČR, spadá navržená sestava dle ČMI pod TPM 2273-99 [13]. Tento předpis se vztahuje na měřicí sestavy pro zkoušení při ověřování měřicích transformátorů proudu nebo napětí. Platí pro výrobu, dovoz a ověřování měřicích sestav určených pro zkoušení při ověřování měřicích transformátorů proudu nebo napětí a stanovuje jejich technické požadavky.

TPM mimo jiné stanovuje, že se měřicí sestavy mohou používat v prostředí:

- s teplotou vzduchu 15 – 25 °C;
- s relativní vlhkostí vzduchu do 75 %;
- prostředí musí být bezprašné, bez výparů chemických látek působící korozivně a leptavě;
- bez vlivu magnetických polí s magnetickou indukcí nad 1 mT;
- bez otřesů, vibrací, zdrojů tepla a slunečního záření;
- bez vlivů elektrických polí.

TPM uvádí, že chyba měření měřicích sestav jako celku nesmí být větší než 1/5 dovolených chyb ověřovaných transformátorů, v tomto případě sestavy slučovací jednotky a proudového nebo napěťového převodníku [13].

Maximální chyby měření amplitudy a fáze jsou shrnuty v Tabulce 19. Vzhledem k tomuto předpisu splňuje navržená sestava kritéria pro účely kalibrace převodníků třídy přesnosti až 0,5. Hodnoty v Tabulce 19 jsou však stanoveny jako součet maximálních příspěvků chyb všech zdrojů. Za předpokladu kalibrace navržené sestavy jako celku, má tato sestava potenciál pro splnění technických požadavků pro kalibrace převodníků třídy přesnosti až 0,1.

## 7 DEFINOVÁNÍ TESTŮ

V následující kapitole jsou definovány testy, které jsou vhodné pro řetězec proudový/napěťový převodník – slučovací jednotka. Testy jsou rozděleny do kategorií na testy přesnosti, dlouhodobé testy a testy digitálního výstupu.

### 7.1 Testy přesnosti

V průběhu testů přesnosti je vyhodnocována amplitudová a fázová chyba podle vztahů (9), resp. (10) a (8). Výsledné hodnoty chyb jsou vhodné pro porovnání s hodnotami v Tabulkách 1, 2 a 3 pro příslušný typ měřeného převodníku. Následně po porovnání výsledků, je možné provést přiřazení měřeného řetězce do příslušné třídy přesnosti.

#### Test linearity

Testy linearity jsou prováděny pro ověření závislosti velikosti výstupní veličiny na velikosti vstupní veličiny při harmonickém ustáleném vstupním signálu. Výsledky pro zvláště vysoké hodnoty primárního signálu jsou použity pro přiřazení třídy přesnosti.

Testy jsou koncipovány podle následující Tabulky 20. V této tabulce jsou kromě hodnoty primárního signálu a vhodné reference uvedeny také předpokládané hodnoty sekundárního signálu testovaného převodníku a reference.

Tabulka 20: Koncepce testů proudové linearity

Testy proudové linearity pro 50 / 60 Hz									
$I_p/I_{pr}$	$I_p$	$U_s$ <sup>7</sup>	$U_{s\_ref}$	Reference	$I_p/I_{pr}$	$I_p$	$U_s$	$U_{s\_ref}$	Reference
[-]	[A]	[V]	[V]		[-]	[A]	[V]	[V]	
0.002	0.16	0.0003	0.00016	Bočník 1 mΩ	1	80	0.15	4	DSA 200
0.005	0.4	0.00075	0.0004		1.2	96	0.18	4.8	
0.01	0.8	0.0015	0.0008		1.5	120	0.225	6	
0.012	0.96	0.0018	0.00096		1.8	144	0.27	7.2	
0.02	1.6	0.003	0.0016		2	160	0.3	8	
0.03	2.4	0.0045	0.0024		3	240	0.45	4	DSA 600
0.05	4	0.0075	0.004		5	400	0.75	6.7	
0.1	8	0.015	0.008		6	480	0.9	8	
0.12	9.6	0.018	0.0096		7	560	1.05	9.3	
0.2	16	0.03	0.016		7.5	600	1.125	10	
0.3	24	0.045	1.2	8	640	1.2	1.28	LEM	
0.5	40	0.075	2	DSA 200	25	2000	3.75		4
0.7	56	0.105	2.8	lcth	-	-	-		-

Obdobně je sestavena i Tabulka 21 pro napěťové testy linearity. Pro tyto testy je použit jako zdroj reference induktivní transformátor KGUG 36 s převodem 35 kV na 7 V. Tabulka rovněž obsahuje předpokládané sekundární signály jak z měřeného převodníku<sup>8</sup>, tak z referenčního transformátoru.

<sup>7</sup> Hodnota sekundárního napětí proudového převodníku pro frekvenci 50 Hz a převod 80 A / 150 mV

<sup>8</sup> Pro testovaný převodník jmenovitého napětí  $22/\sqrt{3}$  kV a převodu 10000/1

Tabulka 21: Koncepce testů napěťové linearity

Test napěťové linearity							
$U_i/U_{pn}$	$U_p$	$U_s$	$U_{s\_ref}$	$U_i/U_{pn}$	$U_p$	$U_s$	$U_{s\_ref}$
[-]	[V]	[V]	[V]	[-]	[V]	[V]	[V]
0.002	25.403	0.003	0.005	0.2	2540.341	0.254	0.508068
0.005	63.509	0.006	0.013	0.3	3810.512	0.381	0.762102
0.01	127.017	0.013	0.025	0.5	6350.853	0.635	1.270171
0.012	152.420	0.015	0.030	0.8	10161.36	1.016	2.032273
0.02	254.034	0.025	0.051	1	12701.71	1.270	2.540341
0.03	381.051	0.038	0.076	1.2	15242.05	1.524	3.048409
0.05	635.085	0.064	0.127	1.5	19052.56	1.905	3.810512
0.1	1270.171	0.127	0.254	1.9	24133.24	2.413	4.826648

### Měření přesnosti v závislosti na frekvenci

Testy linearity jsou prováděny pro ověření závislosti velikosti výstupní veličiny na velikosti vstupní veličiny při harmonickém ustáleném vstupním signálu. Pro splnění požadavku normy [2] je kmitočet primárního signálu volen od 96 % do 102 % jmenovité frekvence.

- Proudový převodník testován při  $I_{pr}$  pro frekvence 96 % - 102 %  $f_r$
- Napěťový převodník testován při  $U_{pn}$  pro frekvence 96 % - 102 %  $f_r$

### Frekvenční odezva

Ověření frekvenčního přenosu v rozsahu frekvencí od 10 Hz až do jednotek či desítek kHz v závislosti na možnostech zesílení primárního signálu. Testy pro proudové převodníky jsou koncipovány podle následující Tabulky 22. V této tabulce jsou kromě hodnoty primárního signálu a vhodné reference uvedeny také předpokládané hodnoty sekundárního signálu testovaného převodníku a reference. Předpokládané hodnoty sekundárního signálu testovaného převodníku jsou uvažovány pro proudový převodník s Rogowského cívkou s převodem 80 A / 150 mV při testech do 5 kHz.

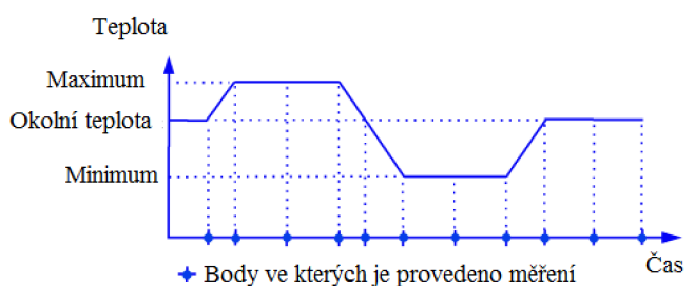
Tabulka 22: Koncepce testů frekvenční odezvy

Frekvence	0.1 $I_{pr}$	$U_s$	$U_{s\_ref}$	Refe- rence	Frekvence	0.1 $I_{pr}$	$U_s$	$U_{s\_ref}$	Refe- rence
[Hz]	[A]	[V]	[V]		[Hz]	[A]	[V]	[V]	
10	8	0,003	0.008	Bočník 1 mΩ	400	8	0,120	0.008	Bočník 1 mΩ
20	8	0,006	0.008		450	8	0,135	0.008	
30	8	0,009	0.008		500	8	0,150	0.008	
40	8	0,012	0.008		550	8	0,165	0.008	
50	8	0,015	0.008		600	8	0,180	0.008	
60	8	0,018	0.008		650	8	0,195	0.008	
80	8	0,024	0.008		700	8	0,210	0.008	
100	8	0,030	0.008		1000	8	0,300	0.008	
150	8	0,045	0.008		2000	8	0,600	0.008	
200	8	0,060	0.008		2500	8	0,750	0.008	
250	8	0,075	0.008		3000	8	0,900	0.008	
300	8	0,090	0.008		4000	8	1,200	0.008	
350	8	0,105	0.008		5000	8	1,500	0.008	

Testy pro napěťové převodníky jsou provedeny při stejných frekvencích primárního signálu jako u proudových převodníků. Amplituda primárního signálu je volena dle možností zesilovače a zvyšovacího transformátoru. Zde je také možnost testování vysokých hodnot kmitočtů při amplitudě primárního signálu do  $6 V_{P-P}$ . Tato hodnota je volena s ohledem na vstup analogové karty a možnosti generátoru. Zároveň není nutné používat žádný zesilovač ani referenční převodník.

### Kombinované klimatické testy

Ověření přenosu řetězce v závislosti na teplotě okolí  $\nu$ . Doba ustálení pro každou z teplot je trojnásobek časové konstanty daná výrobcem. Teplotní gradient změny teploty mezi jednotlivými úrovněmi je vhodné volit jako menší než  $2 \text{ }^\circ\text{C/min}$ . Obecný klimatický cyklus je uveden na Obrázku 35.



Obrázek 35: Obecný cyklus klimatického testu

Kombinace testů pro proudový převodník je uvedena v Tabulce 23. Test je proveden při různých variantách harmonického ustáleného primárního proudu a frekvence.

Tabulka 23: Kombinace klimatických testů proudových převodníků

$I_p=30 \text{ A}$ $f=50 \text{ Hz}$	$\nu$ [ $^\circ\text{C}$ ]	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$I_p=30 \text{ A}$ $f=60 \text{ Hz}$		-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$I_p=30 \text{ A}$ $f=300 \text{ Hz}$		-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$I_p=200 \text{ A}$ $f=50 \text{ Hz}$		-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$I_p=200 \text{ A}$ $f=60 \text{ Hz}$		-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80

Kombinace testů pro napěťový převodník je uvedena v Tabulce 24. Test je proveden nejlépe při  $U_{pn}$  (v závislosti na izolačních vlastnostech klimatické komory) a různých variantách frekvence primárního signálu.

Tabulka 24: Kombinace klimatických testů napěťových převodníků

$f=50$ Hz	U [°C]	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$f=60$ Hz		-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$f=300$ Hz		-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80

## 7.2 Dlouhodobé testy

Při dlouhodobém měření je ověřena stabilita výstupu převodníků. Testovací signál je harmonický s frekvencí 50 Hz. Proudový převodník je testován pro efektivní hodnotu proudu 30 A. Napěťový převodník je testován pro efektivní hodnotu napětí  $0,8 U_{pm}$ . V průběhu dlouhodobých testů je vyhodnocována kompozitní chyba. Její velikost by v průběhu dlouhodobých testů neměla přesáhnout tolerance třídy přesnosti, do které byl převodník přiřazen.

## 7.3 Testy digitálního výstupu

Testy jsou zaměřeny na data poskytovaná slučovací jednotkou. Pomocí těchto testů je ověřena správná funkce slučovací jednotky.

### Měření ztracených datových paketů

Měření ztracených datových paketů není test, který by byl normativně předepsán. Jedná se spíše o test spolehlivosti slučovací jednotky. Tento test je vhodné provádět paralelně s dlouhodobými testy nebo kombinovanými klimatickými testy.

### Měření maximálního časového zpoždění

Měření maximální doby, kterou slučovací jednotka potřebuje na zpracování signálu, tj. doby od příjmu 1 PPS signálu až po vyslání datového paketu na výstup. Tato hodnota by neměla přesáhnout 2 ms pro ochranné a měřicí aplikace.

Tento test může být proveden jak při napěťovém tak i proudovém testování. Jedná se o měření doby mezi vysláním signálu 1 PPS a časem, kdy je přijat paket obsahující pořadové číslo vzorku nula.

### Test signalizace ztráty synchronizace

Slučovací jednotka by měla být po ztrátě synchronizace schopná krátkou dobu synchronního chodu. Po určitém čase ovšem není synchronizace zaručena. Tento stav by měla slučovací jednotka hlásit. To, že slučovací jednotka již nepracuje synchronně lze ověřit pomocí analýzy jednotlivých vzorků, kdy fázová chyba přesáhne tolerance třídy přesnosti.

## 8 ZÁVĚR

Tato diplomová práce je pomyslně rozdělena do tří stěžejních částí. Cílem první části bylo seznámit se s problematikou testovacích systémů a způsobem testování proudových a napěťových převodníků s digitalizovaným výstupem v souladu s IEC 61850-9-2LE. Na základě odborné literatury a dostupných standardů byly v úvodní kapitole popsány základní principy funkce klasických i moderních převodníků proudu a napětí. Dále se úvodní část věnuje popisu slučovací jednotky, která zajišťuje rozhraní mezi analogovým a digitálním přenosem informací. Popis funkce slučovací jednotky je klíčový vzhledem k návrhu testovací sestavy, kde hlavní problematikou je nutnost její časové synchronizace. Z tohoto důvodu je proveden rozbor používaných způsobů časové synchronizace pomocí signálu 1 PPS a protokolu PTPv2. Společně s tímto rozbohem je objasněn účel a výhody zavedení komunikačního standardu slučovacích jednotek IEC 61850-9-2LE a stanovení vzorkovací frekvence slučovací jednotky jako 80-ti násobek jmenovité frekvence.

V návaznosti na popis řetězce, primární převodník – slučovací jednotka, byla provedena jeho kategorizace s ohledem na schopnost podávat přesné informace o měřené veličině. Vzhledem k tomu, že účelem použití řetězce je poskytovat vstupní údaje pro měřicí a jistící zařízení v systémech vysokého napětí, byly tyto kategorie zvoleny jako shodné s třídami přesností elektronických přístrojových transformátorů dle standardu IEC 60044-7 a -8. Z tohoto standardu také vyplývají charakteristické parametry řetězce a zkušební hodnoty. Charakteristickými parametry řetězce jsou amplitudová chyba a chyba fáze, které mohou být stanoveny pro jednotlivé prvky řetězce a musí být stanoveny pro celý řetězec. Efektivní hodnota zkušebního signálu byla stanovena pro napětí až 38,4 kV a proud až 2000 A. Kapitola pojednávající o parametrech, kritériích a vyhodnocení testů je závěrečnou pasáží úvodní části diplomové práce.

Další významnou kapitolou je popis realizovaných testovacích sestav. Na základě studie realizovaných sestav bylo stanoveno obecné schéma testovací sestavy. Zároveň byly určeny klíčové vlastnosti sestavy, kterými jsou přesné měření analogových signálů a vysoký stupeň časové synchronizace mezi slučovací jednotkou a testovací sestavou. Dále byly definovány nezbytné komponenty, ze kterých je testovací sestava složena. Pro každý komponent jsou stanoveny parametry tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností testovací sestavy z úvodní části. Tato kapitola je zakončena popisem komerční testovací sestavy, která je určena pro ověřování řetězce v provozních podmínkách.

Poslední část diplomové práce je věnována vlastnímu návrhu testovací sestavy. Návrh vychází z již definovaného obecného schématu. Jednotlivé komponenty sestavy byly vybrány tak, aby vyhovovaly stanoveným požadavkům. Zároveň bylo bráno na zřetel technické vybavení laboratoří UEEN, aby navržená sestava mohla být využita na tomto ústavu bez nutnosti investování významných finančních prostředků na její pořízení.

Navržená sestava je založena na modulárním systému PXI Express od společnosti National Instruments. Tento systém byl zvolen především pro své vynikající vlastnosti v oblasti měření analogových signálů, časování a synchronizace. Navržený modulární systém se skládá z generátoru libovolných signálů PXI-5421, analogové měřicí karty PXI-4462, digitální měřicí karty PXIe-6536, synchronizačních a časových karet PXIe-6672T a PXI-6683 a kontroléru PXIe-8840.

Testovací signál je generován generátorem libovolných signálů, který je podle potřeby zesilován průmyslovým zesilovačem a zvyšujícím transformátorem. Testovací signál je přiveden



shodně na primární převodníky testovaného řetězce a referenční převodník, který poskytuje obecně správnou hodnotu primárního signálu. Výstupní signály z převodníků jsou měřeny podle potřeby analogovou a digitální kartou. Referenční převodníky jsou navrženy tak, že sekundární signál je ve všech případech napěťový a vhodný pro vstupy analogové měřicí karty. Ta pracuje s dostatečným rozlišením 24 bitů a má možnost současného měření až 4 analogových signálů. V tomto případě je jeden vstup použit pro měření reference a do zbylých tří vstupů mohou být zapojeny sekundární analogové signály testovaných převodníků. Slučovací jednotka zpracovává příchozí signály, „balí“ je do datových paketů a spolu s dalšími informacemi je odesílá přes Ethernetové rozhraní na vstup modulárního systému, který vyčítá hodnoty amplitudy a fáze příslušnou knihovnou funkcí.

Synchronizace sestavy a slučovací jednotky je zajištěna synchronizačními a časovými kartami, které jsou schopné zprostředkovat signály 1 PPS i protokol PTPv2. Tyto karty jsou také využity pro řízení souběhu synchronizačního signálu, triggorovacího signálu pro zahájení akvizice dat a generování testovacího signálu. Tento souběh je důležitý především pro současný sběr dat referenčního měření a ostatních vstupů. Souběh s generátorem zajišťuje opakovatelnost měření vzhledem k fázové chybě a zabraňuje fluktuaci frekvence.

Při procesu akvizice dat probíhá současný sběr dat z měřících karet a slučovací jednotky. Sběr dat je zahájen s náběžnou hranou triggorovacího signálu a vzorkování měřících karet probíhá se stejnou frekvencí jako u slučovací jednotky. Akvizice dat je provedena pro předem stanovenou dobu, ideálně pro celočíselné násobky sekund.

Modulární systém PXI Express a vyhodnocení testů je navrženo pro řízení pomocí softwaru LabView. Tímto softwarem je možné nastavení potřebných funkcí modulů a zpracovávání získaných dat. Díky synchronizaci měření je možné porovnat časově koherentní data, což je nezbytně nutné pro správné vyhodnocení testů. Pro přiřazení patřičné třídy přesnosti jsou vzájemně porovnávány údaje o velikosti amplitudy a fáze naměřených hodnot s hodnotami referenčními.

Vzhledem k metrologickým požadavkům, které jsou vyžadovány na území ČR, splňuje navržená sestava kritéria pro účely kalibrace převodníků třídy přesnosti až 0,5. Za předpokladu kalibrace navržené sestavy jako celku, má tato sestava potenciál pro splnění technických požadavků pro kalibrace převodníků třídy přesnosti až 0,1.

Závěr diplomové práce je věnován definování testů. Zde jsou popsány jednotlivé testy, které jsou rozděleny do kategorií na testy přesnosti, dlouhodobé testy a testy digitálního výstupu. Spolu s definováním testů je proveden i návrh výstupního protokolu pro proudové převodníky, který je uveden v příloze.

## 9 ZDROJE

- [1] ZIEGLER, J. Vliv prostorově-konstrukčního uspořádání na nejistotu měření proudu Rogowského cívkou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 84 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D..
- [2] IEC 60044-7 Instrument transformers Part 7: Electronic voltage transformers. (1999)
- [3] IEC 60044-8 Instrument transformers Part 8: Electronic current transformers. (2002)
- [4] LIU, Jianfeng. *The design of a merging unit of electronic transformer based on arm* [online]. : 712-716 [cit. 2015-11-05]. DOI: 10.1109/UPEC.2007.4469036. Dostupné z: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4469036&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D4469036](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4469036&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4469036)
- [5] IEC 61850-9-2 LE Implementation guideline for digital interface to instrument transformers using IEC 61850. (2004)
- [6] *Haefely Hipotronics* [online]. [cit. 2015-11-05]. Dostupné z: <http://www.haefely-hipotronics.com/product/product-category/standard-voltage-transformers/>
- [7] *Haefely Hipotronics* [online]. [cit. 2015-11-05]. Dostupné z: <http://www.haefely-hipotronics.com/product/product-category/standard-current-transformers/>
- [8] OTMC 100. *OMICRON* [online]. [cit. 2015-11-05]. Dostupné z: [https://www.omicron-lab.com/fileadmin/assets/OTMC\\_100/OTMC\\_100\\_Product\\_Brochure\\_V3-1410.pdf](https://www.omicron-lab.com/fileadmin/assets/OTMC_100/OTMC_100_Product_Brochure_V3-1410.pdf)
- [9] *OMICRON Lab* [online]. [cit. 2015-11-05]. Dostupné z: <https://www.omicron-lab.com/ticro-100/product-description.html>
- [10] DANE0 400 User Manual. *OMICRON* [online]. [cit. 2015-11-05]. Dostupné z: <https://www.omicron.at/>
- [11] ORSÁGOVÁ, J. Rozvodná zařízení. 179 s. Vysoké učení technické v Brně. Skripta
- [12] JAVORA, R, A HOZOI a V PROKOP. *Total accuracy of the whole measuring chain — Sensor & IED* [online]. 2013. 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2013 [cit. 2016-02-02]. ISBN 978-1-84919-732-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6683157&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D6683157>
- [13] ČMI: Technický předpis metrologický TPM 2273-99: Měřicí sestavy pro zkoušení při ověřování měřicích transformátorů proudu nebo napětí. Brno, 2000.
- [14] NATIONAL INSTRUMENTS. *National Instruments Česká Republika a Slovensko* [online]. 2016 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://czech.ni.com/>
- [15] GURBIEL, M, BLUMSCHEIN, C DZIENIS, G LANG a Z STYCZYNSKI. *Digital interface for IEC 61850. Requirements and accuracy definitions* [online]. 2009 [cit. 2016-02-02]. ISBN 978-1-84919-160-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5371203&newsearch=true&queryText=DIGITAL%20INTERFACE%20FOR%20IEC%2061850.%20REQUIREMENT%20AND%20ACCURACY>

- 
- [16] M. GUBRIEL, P. KOMARNICKI, Z. A. STZCZYNSKI, F.W. GATYEN a C. DZIENIS, *Merging Unit Accuracy Testing*, IEEE Power & Energy Society General Meeting, PES, 2009.
- [17] SCHMID, Joachim a Kerstin KUNDE. Application of Non Conventional Voltage and Currents Sensors in High Voltage Transmission and Distribution Systems [online]. [cit. 2016-03-02].
- [18] FOCS – Fiber-Optic Current Sensor. In: ABB.com [online]. [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: [https://library.e.abb.com/public/74d5555d2a9c2998c12579a00038ff0a/FOCS\\_brochure\\_3\\_BHS362996\\_E01.pdf](https://library.e.abb.com/public/74d5555d2a9c2998c12579a00038ff0a/FOCS_brochure_3_BHS362996_E01.pdf)
- [19] SHATREFOU, Denis a Damien THOLOMIER. IEC 61850: Process Bus – It is real! Praxis Profiline: IEC 61850. VOGEL, , 27-28.
- [20] ZEŽULKA, František a Ondřej HYNČICA. Synchronizace v distribuovaných řídicích systémech: Precision Time Protocol (PTP) podle IEEE 1588. AUTOMA [online]. 2010(2), 17-19 [cit. 2016-04-15]
- [21] JUVIK, JON IVAR. A Calibration System for Instrument Transformers with Digital Output. Göteborg, 2001. Diplomová práce. Chalmers University of Technology.
- [22] MOG, G.E. a E.P. RIBEIRO. Zero crossing determination by linear interpolation of sampled sinusoidal signals [online]. 2004 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractCitations.jsp?arnumber=1432484&tag=1>
- [23] Překonejte problémy při tvorbě vysokorychlostních měřicích systémů s velkým počtem kanálů. In: National Instruments [online]. 2013 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/14400/cs/>
- [24] CompactPCI and PXI Enable Advanced Measurement and Control in Embedded Applications. RTC Magazine [online]. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://www.rtcmagazine.com/articles/view/10167>
- [25] NI PXIe-1062Q User Manual. National Instruments [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371843d.pdf>
- [26] 7224 SPECIFICATION SHEET. AE Techron [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.aetechron.com/pdf/7224specsheel.pdf>
- [27] NI 4462 Specifications. National Instruments [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/373770j.pdf>
- [28] Current transducer ITZ 5000-SB FLEX UTRASTAB. LEM [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: [http://www.lem.com/docs/products/itz\\_5000-sb\\_flex\\_ultrastab.pdf](http://www.lem.com/docs/products/itz_5000-sb_flex_ultrastab.pdf)
- [29] DSA600: 600 A Current Transducer. ZES [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.zes.com/en/Products/Danisense-Products/DS600>
- [30] Low Resistance Standards: 1000 series. Ohm-Labs [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.ohm-labs.com/resistance-standards/1000-series-air.html>
- [31] NI PXIe-6674T User Manual: Timing and Synchronization Module for PXI Express. National Instruments [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/373089c.pdf>

- 
- [32] YAMADA, Tatsuji, Saytaro KON, Naoki HASHIMOTO, Tatsushi YAMAGUCHI, Kenichi YAZAWA, Reishi KONDO a Kiyoshi KUROSAWA. *ECT Evaluation by an Error Measurement System According to IEC 60044-8 and 61850-9-2* [online]. 2012 [cit. 2016-02-07]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6180207&newsearch=true&queryText=ECT%20Evaluation%20by%20an%20Error%20Measurement%20System%20According%20to%20IEC%2060044-8%20and%2061850-9-2>
- [33] How to calculate input delay from delta-sigma ADCs (9233, 9229) to synchronize inputs. National Instruments [online]. 2009 [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://forums.ni.com/t5/Real-Time-Measurement-and/How-to-calculate-input-delay-from-delta-sigma-ADCs-9233-9229-to/td-p/866715>
- [34] Synchronization Explained. National Instruments [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/11369/en/>
- [35] Dynamic Signal Acquisition Fundamentals. National Instruments [online]. 2009 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/12349/en/>
- [36] NI Dynamic Signal Acquisition: NI Dynamic Signal Acquisition User Manual. National Instruments [online]. 2010 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371235h.pdf>
- [37] HST12-1: Precision Wideband High Voltage Divider. ZES Zimmer [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.zes.com/en/Products/Sensors/HST>

# PŘÍLOHY

## Příloha A – Návrh protokolu

Datum: \_\_\_\_\_  
 Čas: \_\_\_\_\_  
 Zkoušel: \_\_\_\_\_

Teplota: \_\_\_\_\_ [°C]  
 Tlak: \_\_\_\_\_ [hPa]  
 Vlhkost: \_\_\_\_\_ [%]

### Druh testu:

#### Použité přístroje:

Zdroj: \_\_\_\_\_  
 Reference: \_\_\_\_\_  
 Vazba vstupu: \_\_\_\_\_

#### Převodník:

Typ: _____	_____	_____	_____
Seriové číslo: _____	_____	_____	_____
Převod: _____	_____	_____	_____
Fáze MU: _____	_____	_____	_____
Vazba vstupu: _____	_____	_____	_____

#### Akvizice dat:

Doba akvizice dat (ms): \_\_\_\_\_  
 Vzorkovací rychlost [S/s]: \_\_\_\_\_  
 Počet zvorků [s]: \_\_\_\_\_  
 Ztracené vzorky [s]: \_\_\_\_\_  
 Nastavení vstupu: \_\_\_\_\_  
 Rozsah: \_\_\_\_\_

#### Slučovací jednotka

Typ: \_\_\_\_\_  
 Seriové číslo: \_\_\_\_\_  
 Firmware: \_\_\_\_\_

### Naměřené hodnoty

Třída přesnosti \_\_\_\_\_  
 Max. amplitudová chyba \_\_\_\_\_  
 Max. fázová chyba \_\_\_\_\_

#### Amplitudová chyba celého řetězce:

$I_p \epsilon_{tot}$	Fáze A	Fáze B	Fáze C
[A] [%]			

#### Fázová chyba celého řetězce

$\varphi_{tot}$	Fáze A	Fáze B	Fáze C
[°]			

#### Amplitudová chyba analogové část:

$I_p \epsilon_{analog}$	Fáze A	Fáze B	Fáze C
[A] [%]			

#### Fázová chyba analogové částí

$\varphi_{analog}$	Fáze A	Fáze B	Fáze C
[°]			

#### Amplitudová chyba A/D převodu:

$I_p \epsilon_{A/D}$	Fáze A	Fáze B	Fáze C
[A] [%]			

#### Fázová chyba A/D převodu

$\varphi_{A/D}$	Fáze A	Fáze B	Fáze C
[°]			

#### Amplitudová slučovací jednotky:

$I_p \epsilon_{9-2LE}$	Fáze A	Fáze B	Fáze C
[A] [%]			

#### Fázová chyba slučovací jednotky

$\varphi_{9-2LE}$	Fáze A	Fáze B	Fáze C
[°]			

#### Fázová chyba slučovací jednotky

$\Delta\varphi_{tot}$	Fáze A	Fáze B	Fáze C
[°]			

## Grafy:

