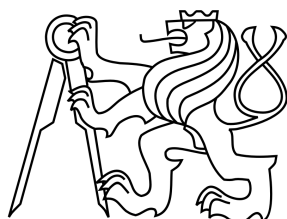


České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky



Využití synchronizovaného měření fázorů pro řízení přenosové soustavy

Diplomová práce
DIPLOMA THESIS

BC. LUCIE VANIŠOVÁ

Vedoucí diplomové práce: ING. MARTIN KAŇOK

Obor: Elektroenergetika

2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Lucie Vanišová**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Využití synchronizovaného měření fázorů pro řízení přenosové soustavy**

Pokyny pro vypracování:

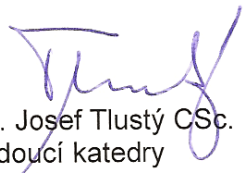
1. Provedte teoretický rozbor problematiky synchrofázorů a sledování elektrických parametrů vedení.
2. Popište realizaci synchronního měření u nás a ve světě.
3. Zpracujte data získaná ze synchronizovaného měření na vybraných vedeních přenosové soustavy.
4. Zhodnoťte použitelnost výstupů práce v praxi a navrhňte další úpravy.

Seznam odborné literatury:

1. Phadke, A.G., Thorp, J.S. - Synchronized Phasor Measurement and Their Applications, USA, 2008
2. IEEE C37.118 - Synchrophasor Standards Development
3. Ferrer, H.J.A., Schweitzer, E.O., III - Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems

Vedoucí: Ing. Martin Kaňok

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015


prof. Ing. Josef Tlustý CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 12. 2. 2014

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na ověření vhodnosti a spolehlivosti měření průměrné teploty venkovních vedení použitím synchronních dat ze synchronních měření napětí a proudů. Podélná impedance bude získána ze čtyř různých početních metod, které využívají synchronní fázory napětí a proudů měřené ve dvou nezávislých terminálech na obou koncích přenosového vedení.

Tohoto ověření je docíleno pomocí následujících kroků: nejprve je proveden výpočet podélného činného odporu ze synchrofázorů pomocí čtyř různých početních metod, následně je vypočítána průměrná teplota venkovního vedení z teplotní závislosti odporu, dále jsou porovnány činné odpory a teploty získané z těchto metod a na závěr je vybrána nejpřesnější metoda výpočtu a výsledné hodnoty jsou ověřeny s měřenými průměrnými teplotami. Poté bude vyhodnocena chyba měření a výpočtu.

V závěru práce bude zvážena přesnost výpočtu a jeho využitelnost v české přenosové soustavě (jedná se o hustou síť tvořenou relativně krátkými vedeními).

Klíčová slova

podélná impedance přenosových vedení, fázorová měřicí jednotka (PMU), synchrofázory, WAMS, výpočet teploty, činný odpor

Abstract

This thesis is focused on evaluation of suitability and reliability of overhead line average temperature monitoring using data from synchronous measurement of voltages and currents. Impedance parameters are obtained by four different methods, which use synchronous phasors of voltages and currents measured in two ends (independent terminals on overhead line).

The verification is solved in the following steps: firstly the longitudinal resistance is computed from synchrophasors by using four different computational methods, then the average temperature of overhead line is calculated from temperature dependence of resistance, subsequently the resistances and temperatures computed from these methods are compared. The most exact method is chosen and the results are verified with directly measured mean temperature.

Accuracy and utility of this computation in case of Czech transmission grid (relatively short lines and compact grid) will be considered in conclusion.

Keywords

transmission line impedance parameters, Phasor measurement unit (PMU), Synchrophasors, WAMS, temperature computation, resistance

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně za použití zdrojů literatury uvedených v seznamu v závěrečné části práce.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 9.5.2014

.....

Lucie Vanišová

Poděkování

Ráda bych na tomto místě poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Martinovi Kaňokovi za ochotu, řadu cenných připomínek a věnovaný čas a dále za poskytnutí dat, bez kterých by nemohla práce vzniknout. Dále děkuji zaměstnancům společnosti ČEPS a.s. za poskytnutí řady cenných informací. Děkuji své rodině za podporu po celou dobu studia.

Obsah

1. Úvod	1
1.1. Cíle práce	1
1.2. Zaměření	2
2. Synchronizované měření fázorů	3
2.1. Princip	3
2.1.1. Fázory	3
2.1.2. Estimace fázorů	4
2.1.3. Synchronizace fázorů	5
2.2. Aplikace synchronizovaného měření v praxi	6
2.2.1. WAMS	7
2.2.2. Vybrané reálné aplikace synchronních fázorů	7
2.3. Architektura systémů WAMS	9
2.4. WAMS v české přenosové soustavě	12
2.4.1. Architektura měření	12
2.4.2. PMU	13
2.4.3. Využití synchronizovaného měření v české přenosové soustavě	13
2.5. Přesnost měření	15
2.5.1. Přesnost měření PMU	15
2.5.2. Přesnost měřícího řetězce	15
2.5.3. Měření přechodných stavů	16
2.5.4. Šum v signálu a efekt délky datového okna	17
2.5.5. Zvýšení přesnosti měření	17
2.6. Normy pro synchrofázorové měření	18
2.6.1. Chyba měření frekvence (FE) a derivace frekvence (RFE)	18
2.6.2. TVE	18
3. Sledování elektrických parametrů vedení pomocí synchronních fázorů	21
3.1. Elektrické parametry vedení	21
3.1.1. Činný odpor (rezistance)	22
3.1.2. Indukčnost	22
3.1.3. Kapacita	22
3.1.4. Konduktance	23
3.2. Výpočet elektrických parametrů pomocí synchronních fázorů	23
3.2.1. Výpočet podélné impedance vedení	23
4. Monitorování teploty vedení	31
4.1. Teplota vodičů	31
4.1.1. Provozní teplota AlFe lan	31

4.2.	Monitorování teploty pomocí synchronních fázorů	32
4.3.	Monitorování teploty vedení dalšími metodami	33
4.4.	Přesnost výpočtu a problematika měření teploty	35
5.	Sledování průměrných teplot konkrétního vedení v české přenosové soustavě	37
5.1.	Popis vstupních dat	37
5.1.1.	Synchronní měření fázorů napětí a proudů	37
5.1.2.	Měření teploty vedení	38
5.1.3.	Parametry vedení	38
5.2.	Volba vedení	39
5.3.	Volba metody výpočtu	39
5.4.	Citlivostní analýza přesnosti měřicího řetězce	40
5.4.1.	Vliv chyby synchrofázorového měření na činný odpor	40
5.4.2.	Vliv chyby činného odporu na průměrnou teplotu vedení	41
5.5.	Zpracování dat v MATLABu	42
5.5.1.	Vstupní data	42
5.5.2.	Filtrace, prokládání dat	47
5.5.3.	Výpočet průměrné teploty vedení	48
5.5.4.	Výpočet činného odporu vedení pomocí metoda jednoho měření	48
5.5.5.	Výpočet činného odporu vedení pomocí metody dvojitého měření	50
5.5.6.	Výpočet činného odporu vedení pomocí vícenásobné měřicí metody používající lineární regresi	51
6.	Vyhodnocení výstupních dat	53
6.1.	Získané podélné činné odpory vedení	53
6.2.	Vypočtené a naměřené průměrné teploty vedení	54
6.3.	Porovnání výpočetních metod, přesnost výpočtu a jeho reálné využití	54
6.3.1.	Vliv filtrace vstupních dat na celkový výpočet	55
7.	Závěr	57
7.1.	Zhodnocení cílů práce	57
7.2.	Shrnutí výsledků práce	57
7.3.	Využití v praxi	58
7.4.	Návrhy pro další práci	59
	Literatura	60
	Dodatek	63
A.	Boxplot	63
B.	Obsah příloženého CD	64

Seznam obrázků

1	Zobrazení kosinusového průběhu v čase a jeho fázorová reprezentace	3
2	Pozorování kosinusovky s frekvencí $f > f_N$ v časových okamžicích T_0	4
3	Typické procesní kroky vykonávané uvnitř PMU [2]	5
4	Princip synchronizace [1]	5
5	Lokalizace poruchy na vedení – schéma [17]	9
6	Blokový diagram hardwaru PMU [1]	10
7	Obecná architektura synchronizovaného měření fázorů	11
8	Instalace PMU a PDC v 10 vybraných rozvodnách (převzato z interních zdrojů)	12
9	Statická stabilita – $P = f(\beta)$	14
10	Nosová křivka – stabilita napětí [24]	14
11	Zobrazení rozdílového fázoru \hat{F}_δ	15
12	Základní struktura měřicího řetězce [7]	16
13	Přechod ze stavu před poruchou do stavu po poruše [1]	17
14	Závislost výsledného TVE na chybě úhlu	20
15	Závislost výsledného TVE na chybě amplitudy	20
16	Model vedení π články [18]	21
17	Závislost činného odporu na teplotě vodiče (model skutečného vedení 400 kV) .	32
18	Zařízení pro kontinuální měření teploty vodiče a proudu (OTLM)	33
19	Měření teploty založené na měření mechanického napětí (CAT-1) [24]	34
20	Měření teploty z údajů o průhybu vodiče (Ampacimon) [24]	34
21	Teplotní senzory Svenska Kraftnät	35
22	Měření teploty odrazem v optických vláknech (Valcap) [24]	35
23	Naznačení postupu citlivostní analýzy měření elektrických parametrů	40
24	Závislost vypočtené teploty na procentní chybě činného odporu	41
25	Závislost procentní chyby teploty na procentní chybě činného odporu	42
26	Závislost efektivních fázových hodnot napětí $U_1, U_2, U_3 = f(t)$	43
27	Průběh fázového úhlu $\phi = f(t)$ napětí U_1, U_2, U_3	44
28	Rozdíl fázového úhlu $\Delta\phi = f(t)$ napětí U_1, U_2, U_3	44
29	Závislost efektivních hodnot proudů $I_1, I_2, I_3 = f(t)$	45
30	Zobrazení fázorů napětí a proudů v komplexní rovině	45
31	Porovnání měření a výpočtu teplot vedení z modelu – stožár S51	46
32	Porovnání průměrných teplot měřených na stožárech S31, S51 a S250	47

33	<i>Zobrazení časové závislosti vypočítaného činného odporu 2. fáze</i>	49
34	<i>Boxplot – vypočítaný činný odpor, 2. fáze</i>	49
35	<i>Zobrazení časové závislosti vypočítané teploty 2. fáze</i>	50
36	<i>Boxplot – vypočítaná průměrná teplota, 2. fáze</i>	50
37	<i>Zobrazení časové závislosti vypočítaného činného odporu</i>	51
38	<i>Boxplot – vypočítaný činný odpor</i>	51
39	<i>Zobrazení časové závislosti vypočítané teploty</i>	52
40	<i>Boxplot – vypočítaná průměrná teplota</i>	52
41	<i>Porovnání průměrných činných odporů získaných výpočtem</i>	53
42	<i>Porovnání průměrných teplot získaných výpočtem a měřené teploty</i>	54
43	<i>Zobrazení naměřené efektivní hodnoty napětí a vyhlazení téže křivky</i>	55
44	<i>Boxplot – struktura</i>	63

Seznam použitých symbolů

$\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}$	Blondelovy přenosové konstanty [S, Ω , -]
B	příčná kapacitní susceptance vedení [S]
B_1	kapacitní susceptance 1 fáze při 20 °C [μS]
d	vzdálenost vodičů ve smyčce [m]
e	Eulerovo číslo [-]
f_{sp}	správná frekvence [Hz]
f_{mer}	měřená frekvence [Hz]
f_N	jmenovitá frekvence sítě [Hz]
$f(t)$	okamžitá frekvence [Hz]
Δf	odchylka měřené frekvence od jmenovité [Hz]
\hat{F}	obecný naměřený fázor [V či A]
\hat{F}_Δ	chybový fázor [V či A]
$ \hat{F}_\Delta $	chyba amplitudy fázoru [V či A]
\hat{F}_{sp}	správná hodnota fázoru [V či A]
G	příčná vodivost (svod) vedení [S]
I	elektrický proud [A]
\hat{I}_1	synchronní fázor proudu měřeného na začátku vedení [A]
\hat{I}_2	synchronní fázor proudu měřeného na konci vedení [A]
j	imaginární jednotka [-]
l	délka vedení [km]
m	vzdálenost poruchy na vedení [km]
N	počet vzorků [-]
r	poloměr vodiče [mm]
R	podélný činný odpor vedení [Ω]
R_1	činný odpor 1 fáze při 20 °C [Ω]
R_{DC}	činný stejnosměrný odpor lana při 20 °C [$\Omega \cdot km^{-1}$]
R_{20}	činný odpor vedení při 20 °C [Ω]
S	průřez vodiče [mm ²]
Δt	rozdíl jmenovité a aktuální teploty [°C]
t	čas [s]
t_A	aktuální průměrná teplota lana [°C]
t_N	jmenovitá teplota lana [°C]
t_Δ	chyba časové synchronizace [μs]
\hat{U}_1	synchronní fázor napětí měřeného na začátku vedení [V]
\hat{U}_2	synchronní fázor napětí měřeného na konci vedení [V]
X_i	imaginární složka fázoru [A či V]
X_k	navzorkovaný vstupní signál [A či V]
X_m	amplituda signálu [A či V]

X_r	reálná složka fázoru [A či V]
X	podélná indukční reaktance vedení [Ω]
\hat{Y}	fázor příčné admitance vedení [S]
\hat{Z}	fázor podélné impedance vedení [Ω]
α	součinitel závislosti činného odporu na teplotě [$\Omega \cdot ^\circ C^{-1}$]
β	úhel přenosu (zátěžný úhel) [$^\circ$]
δ_Δ	chyba úhlu [$^\circ$]
ρ	měrná rezistance vodiče [$\Omega mm^2 \cdot km^{-1}$]
Φ	magnetický tok [Wb]
φ	fázový úhel [rad]
ω	úhlová frekvence [$rad \cdot s^{-1}$]

Seznam použitých zkratek

CPDC	Central Phasor Data Concentrator
ČHMÚ	Český hydrometeorologický úřad
DFT	Discrete Fourier Transform
DLPF	Digital Low Pass Filter
FE	Frequency Error
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MTN	Měřicí transformátor napětí
MTP	Měřicí transformátor proudu
PDC	Phasor Data Concentrator
PMU	Phasor Measurement Unit
RTE	Rate of Change Frequency Error
RTU	Remote Terminal Unit
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
TSO	Transmission System Operator
TVE	Total Vector Error
UTC	Universal Time Coordinated (second)
WACS	Wide Area Control System
WAMS	Wide Area Monitoring System
WAN	Wide Area Network
WAPS	Wide Area Protection System

1. Úvod

Elektrizační soustavy a jejich řízení prochází řadou změn a tento trend bude pravděpodobně i nadále pokračovat. Díky novým vlivům a situaci na trhu se dnešní dispečerů přenosových soustav musí vyrovnávat s novými situacemi, jako je například připojování velkého počtu obnovitelných zdrojů do soustavy, stále rozsáhlejší spolupráce přenosových soustav s okolními TSOs (Transmission System Operators), otevření trhu s elektřinou a další, a zároveň stále narůstají nároky na stabilitu a spolehlivost přenosu elektrické energie. Díky těmto změnám je třeba hledat stále efektivnější a přesnější nástroje pro řízení, monitorování a zabezpečení provozu. S měřením synchronních fázorů napětí a proudů se otevírají nové možnosti v oblasti zlepšení řízení, bezpečnosti a stability elektrizačních soustav. Měření synchronních fázorů nevede k vývoji nového samostatného monitorovacího systému, ale naopak začleněním se do stávajících systémů (např. SCADA) lze dosáhnout rozšíření o nové pokročilé funkce či zpřesnění stávajících [5].

Synchronizované měření probíhá s definovanou hustotou (např. 50 snímků/s) s vysokou přesností časové synchronizace (povolená chyba $1 \mu\text{s}$) [5], což umožňuje získávat data fázorů napětí a proudu v různých místech elektrické soustavy a následně porovnávat fázory se stejnou časovou značkou. Z těchto údajů lze přesně určit rozdíl fázových úhlů napětí (vzhledem ke vztažnému napětí) v různých místech soustavy, což napomáhá estimovat stav sítě a následně odhalit nežádoucí stavy a poruchy.

Princip synchronního měření je známý již řadu let (první aplikace synchronního měření rozdílů fázových úhlů pochází z roku 1980 [1]), přesto se díky přirozené setrvačnosti v energetice v řadě zemí zařazují jednotky synchronního měření do elektrizačních sítí pozvolně a stále se otevírají nové možnosti využití. Dříve byla synchronní data přístupná pouze v autonomních fázorových jednotkách (PMU), postupně byla začleněna do ochranných relé a nyní bývá synchronní měření fázorů součástí moderních ochran, měřících přístrojů a dalších zařízení [9]. V současné době lze měření synchrofázorů využít v distribučních a přenosových soustavách např. pro aplikace monitoringu fázorových úhlů, detekce a monitoringu ostrovních provozů, detekce a analýzy oscilací, detekce snížení rezervy statické stability, monitorování stability napětí, výpočty chodu sítě, měření parametrů vedení, podporu při spínání a další [5], [6].

1.1. Cíle práce

Cíle práce zároveň odpovídají členění práce na konkrétní kapitoly.

1. *teoretický rozbor synchronního měření fázorů napětí a proudů v elektrizační soustavě* – obsahuje princip synchronního měření a estimace fázorů, výhody synchronního měření, aplikace synchronních fázorů, architekturu systémů WAMS a jejich možnosti využití v přenosové soustavě ČR a ve světě a diskuzi nad přesností měření synchrofázorů.

2. *teoretický rozbor sledování elektrických parametrů vedení pomocí synchronních fázorů* – obsahuje obecné shrnutí elektrických parametrů vedení, popis sledování podélné impedance vedení pomocí synchronních fázorů, teoretické předpoklady a rozbor vhodných výpočetních metod.
3. *teoretický rozbor monitorování teploty vedení* – obsahuje popis monitorování průměrné teploty vedení za pomoci činného odporu získaného výše uvedenými metodami výpočtu ze synchronních dat, dále obsahuje rozbor sledování teploty vedení dalšími metodami a rozbor přesnosti měření.
4. *zpracování reálných dat z vybraných vedení přenosové soustavy ČR* – obsahuje popis dostupných dat (synchronní fázory měřené na konkrétních linkách, měření teploty a parametry vedení), výběr vhodných vedení, úprava dat zahrnující třídění, filtrace apod., výpočet podélné impedance vedení pomocí čtyř vybraných metod, výpočet činného odporu a následně teploty vodičů (případně zatížení linky a výkonové rezervy).
5. *vyhodnocení výstupních dat* – obsahuje kontrolu a vyhodnocení výstupů výpočtu, porovnání výpočtu teploty vedení s měřenými veličinami na vybraných vedeních a vyhodnocení chyby výpočtu, zvážení přesnosti výpočtu vzhledem k délce vedení, přesnosti měřicího řetězce a rušení v datech a vyhodnocení vlivu filtrace na výstupní hodnoty.
6. *závěrečné zhodnocení* – zhodnocení použitelnosti výpočtu pro reálné řízení přenosové soustavy v ČR, shrnutí výsledků, určení spolehlivosti, návrhy dalších úprav, rozšíření, či zpřesnění výpočtu.

1.2. Zaměření

Práce je zaměřená na možnost sledování elektrických parametrů na přenosových vedeních v ČR pomocí synchronního měření. Úkolem je ověřit použitelnost této metody pro podmínky české přenosové soustavy (relativně krátká vedení zapojená do husté sítě) a určit případnou chybu výpočtu a spolehlivost metody.

Z naměřených hodnot synchronních napětí a proudů ve vybraných rozvodnách při znalosti dalších parametrů vedení získáme činný odpor. Ze závislosti činného odporu na teplotě (a znalosti činného odporu při nominální teplotě) získáme údaj o aktuální teplotě vodiče. Celkovým cílem práce je určit tyto teploty, porovnat je s teplotami změřenými na vedení jinou metodou a zhodnotit přesnost výpočtu – pokud bude v přijatelných mezích, tak vypočítáme zpětně zatížení linky a výkonovou rezervu. V ideálním případě budou výstupem práce data vhodná pro případný nástroj pro dispečery přenosové soustavy, který může informovat o výkonové rezervě daných linek. Přínosem této výpočtové metody by měla být vysoká přesnost způsobená synchronním měřením. Pokud bude ověřena na vybraných vedeních, je možné ji dále aplikovat na všechna vedení přenosové sítě.

2. Synchronizované měření fázorů

2.1. Princip

2.1.1. Fázory

Čistý kosinusový průběh je vyjádřen rovnicí

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

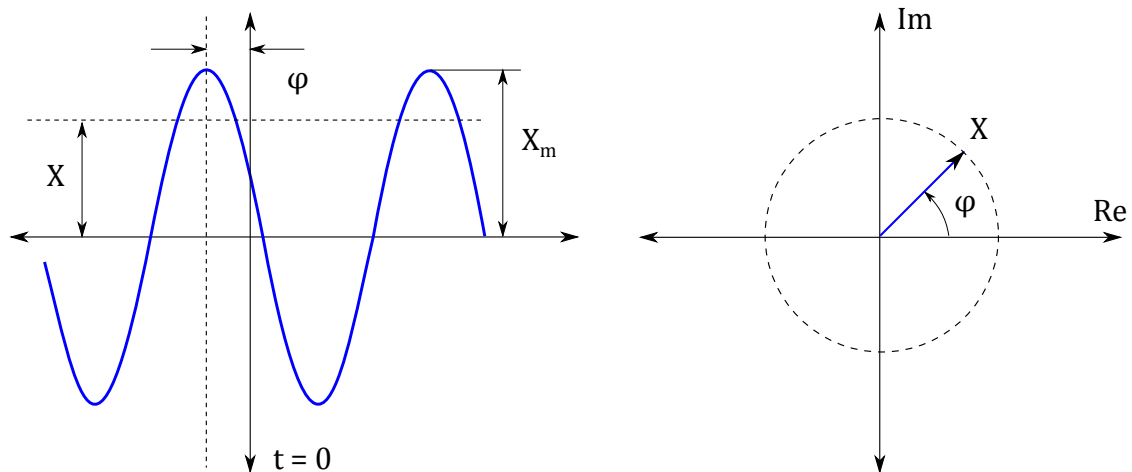
nebo také

$$x(t) = \operatorname{Re}[X_m e^{j(\omega t + \varphi)}] = \operatorname{Re}\{e^{j\omega t}\} X_m e^{j\varphi} \quad (2.2)$$

Při zanedbání členu $e^{j\omega t}$ (ze znalosti frekvence signálu) můžeme sinusový průběh vyjádřit pomocí fázorové reprezentace. Fázor je komplexní veličina, která nese informaci o amplitudě a natočení – fázovém úhlu vztaženému k referenčnímu fázoru v určitém časovém okamžiku, kde úhel referenčního fázoru je nulový [4]. Poté platí

$$x(t) \leftrightarrow \hat{X} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} (\cos\varphi + j\sin\varphi) \quad (2.3)$$

$$\hat{X} = X_r + jX_i \quad (2.4)$$



Obr. 1 – Zobrazení kosinusového průběhu v čase a jeho fázorová reprezentace, velikost fázoru odpovídá $\frac{X_m}{\sqrt{2}}$, úhel natočení od reálné osy odpovídá úhlu φ [1]

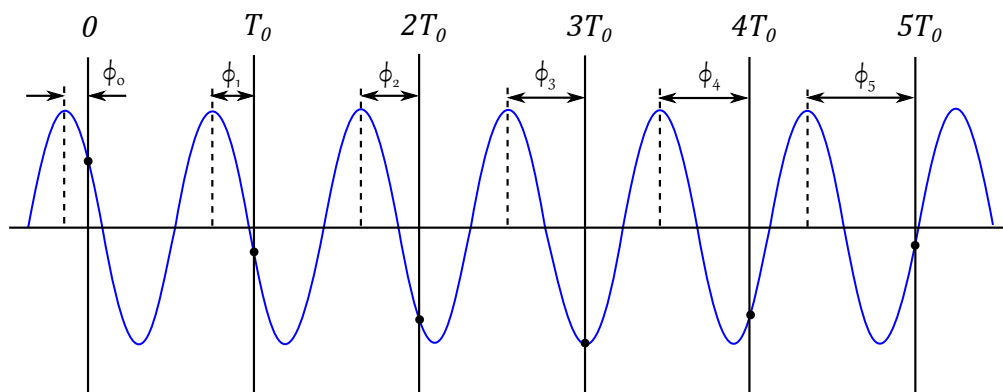
Fázor reprezentuje čistý sinusový průběh (1. harmonickou složku síťových veličin), proto je nutné nejdříve oddělit průběh základní frekvence od ostatních frekvencí vyskytujících se v signálu a teprve poté signál převést na fázor, čehož lze docílit např. Fourierovou transformací (spojité průběhy), diskretní Fourierovou transformací nebo rychlou Fourierovou transformací (u vzorkovaných signálů).

Synchronní fázory se vypočítají z navzorkovaného signálu použitím diskretní Fourierovy transformace (DFT), transformaci popisuje následující vzorec, kde X je základní frekvenční složka, X_k je vzorkovaný vstupní signál [8]. Proces vzorkování signálu a DFT probíhá v jednotkách PMU (podrobně popsáno dále).

$$X = \frac{\sqrt{2}}{N} \cdot \sum_{k=1}^N X_k \cdot e^{-j2k\pi/N} \quad (2.5)$$

Sledujeme-li kosinusový signál s konstantní amplitudou o nejmenovité frekvenci ($f \neq f_N$ a $f < 2f_N$) v intervalech $\{0, T_0, \dots, nT_0\}$, kde T_0 je jmenovitá perioda a odpovídající fázorové reprezentace jsou $\{X_0, X_1, \dots, X_n\}$, tak fázový úhel sledu fázorů se bude měnit stálou rychlostí $\omega = 2\pi(f - f_N)T_0$. Fázové úhly by se měly kontinuálně zvyšovat až na 180° , poté by se měly přesunout na -180° a pokračovat ve zvyšování. Synchronfázory jsou běžně hlášeny v úhlech od -180° do $+180^\circ$ (spíše než v rozmezí 0° až 360°).

Synchronní fázor zobrazený v komplexní rovině tedy bude rotovat stálou rychlostí Δf (rozdíl mezi skutečnou a jmenovitou frekvencí), jak je uvedeno v následujícím obrázku.

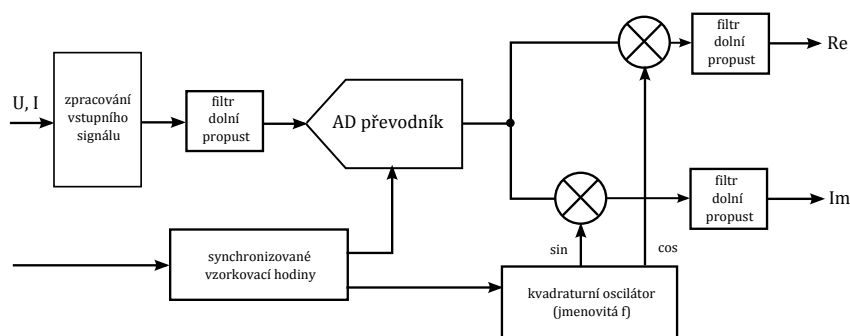


Obr. 2 – Pozorování kosinusovky s frekvencí $f > f_N$ v časových okamžicích T_0 – fázový úhel narůstá stále stejnou rychlostí s rozdílem frekvence $f - f_N$ [2]

\Rightarrow Synchronní fázory jsou funkcí času a budou se měnit hodnotu od hodnoty, výjimkou je pouze stav, kdy je měřený signál čistě kosinusový a $f = f_N$ [2].

2.1.2. Estimace fázorů

Měření synchronfázorů je ve skutečnosti určitá estimace daných hodnot. Výstupem jsou synchronní fázory, sousledné složky synchronních fázorů nebo obojí (synchronní fázory jsou hodnoty generované jednotkami PMU (podrobně popsáno dále), sousledné složky se získají rozkladem těchto synchronfázorů do složkové soustavy). Základní model estimace synchronfázorů uvnitř PMU je uvedený na následujícím obrázku.

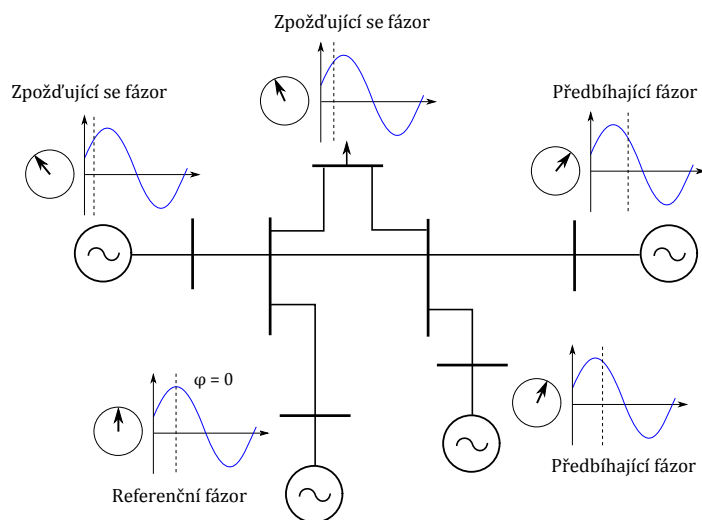


Obr. 3 – Typické procesní kroky vykonávané uvnitř PMU [2]

Estimace představuje určité zprůměrování parametrů, které se mohou v rámci datového okna měnit. Časová značka může být přiřazena estimovanému synchrofázoru dvěma způsoby – na začátku nebo vhodněji ve středu datového (estimačního) okna.

Z fázorového měření se zpravidla dále odesílají informace o dané frekvenci (hlášena jako skutečná frekvence $f(t)$ nebo odchylka od jmenovité frekvence $\Delta f(t)$) a rychlosti změny frekvence v čase $\frac{df}{dt}$ [2].

- *datové okno* – jedná se o časové okno s nastavitelnou délkou, ve kterém probíhá synchrofázorové měření
- *datový rámec* – řada synchrofázorů, které odpovídají stejné časové značce



Obr. 4 – Princip synchronizace [1]

2.1.3. Synchronizace fázorů

Synchronizace fázorů spočívá v přiřazení přesné časové značky každému fázoru pomocí systému GPS (Global Positioning System). Synchronizace umožňuje snímat veličiny zachycené ve stejném časovém okamžiku, jejichž porovnáním získáme obraz o stavu soustavy v konkrétním okamžiku. Synchronním měřením fázorů je možné získat informace o parametrech přenosové soustavy, aniž by bylo zpoždění přenosu dat limitujícím prvkem, který ovlivňuje jejich další použitelnost (data mohou dorazit do sběrného místa

s různým časovým zpožděním vzniklým přenosem po různě dlouhých komunikačních cestách, zde se snadno roztrídí dle časové značky) [1].

2.2. Aplikace synchronizovaného měření v praxi

Synchronní měření fázorů mohou využívat aplikace sloužící k monitorování, vizualizaci a řízení přenosových a distribučních soustav a to jak v *online*, tak i v *offline* režimu (zpětné vyhodnocení poruch).

Využívání synchronního měření přináší řadu výhod: schopnost monitoringu dynamických stavů soustavy, zpoždění při přenosu dat není již limitujícím prvkem, měření probíhá kontinuálně, funkce pro měření synchrofázorů lze aktivovat v řadě stávajících ochran nainstalovaných v terminálech rozveden. Hlavním předpokládaným přínosem synchrofázorů by mělo být zvýšení přesnosti estimací vyplývající z přesné synchronizace fázorů, z tohoto důvodu se jedná o perspektivní technologii budoucnosti na poli monitoringu a řízení elektrizačních soustav.

Měření synchrofázorů a jejich aplikace se proto dostala do popředí zájmu řady univerzit a společností vyvíjejících nové technologie v energetice a byla vyvinuta řada praktických aplikací. Velké množství aplikací synchrofázorů se již s úspěchem používá, nicméně některé aplikace nevrací přijatelné výsledky a nad možností jejich praktické použitelnosti zůstává řada otázek.

OBECNĚ LZE APLIKACE SYNCHRONNÍCH FÁZORŮ ROZDĚLIT DO NÁSLEDUJÍCÍCH KATEGORIÍ [19]:

- *monitorování, ochrana a řízení rozsáhlých oblastí (Wide Area Monitoring, Protection and Control)* – přináší zdokonalení napěťového řízení, zvýšení efektivity a spolehlivosti řízení výrobních zdrojů, ochranu před ostrovními provozy, prevenci před kaskádovými výpadky proudu, umožňuje časově-koordinované synchronní řízení a kvalitnější nastavení systémových ochran
- *povědomí o situaci v elektrizační soustavě* – zahrnuje následující funkce: vizualizaci synchronního měření, rychlou obnovu systému po výpadku proudu, umožní zdokonalení měření stavu soustavy a dopočet chybějících hodnot
- *analýza událostí* – sledování událostí v reálném čase, rozpoznání rušení
- *určení stability soustavy* – zahrnuje sledování a vyhodnocování napěťové stability soustavy (detekce hrozby napěťového kolapsu), monitorování oscilací, detekci ostrovních provozů, monitoring nepřipustných rozdílů přenosových úhlů, sledování přechodných jevů a predikce vývoje stability
- *systémová optimalizace* – synchronní fázory lze použít pro pokročilé optimalizační úlohy jako jsou: snížení nákladů provozováním soustavy blíže akceptovatelným limitům, ověření modelů sítě, zátěžové charakteristiky (monitoring proměnlivých zátěžových podmínek, offline analýzy), posouzení vlivu obnovitelných zdrojů na chod soustavy (dynamické chování, výkonové toky), rychlé ověření fázování (kontrola fázové rotace), systémové analýzy (sloužící k plánování rozvoje soustavy)

- *systemová infrastruktura* – synchronní fázory mohou sloužit k analýze výkonu počítačové sítě, lze zajistit monitoring stavu systému, zpoždění síťové komunikace a řešení cybersecurity

V rámci diplomové práce se budeme dále zabývat systémy pro monitoring elektrizačních soustav a částečně některými prvky systémové optimalizace.

2.2.1. WAMS

WAMS (Wide Area Monitoring System) jsou systémy pro monitoring rozsáhlých elektrizačních soustav. Skládají se z jednotek PMU, datových koncentrátorů PDC, centrálního serveru a aplikačního softwaru. Využívají synchronního měření napětí, proudů, frekvence a časové změny frekvence a za pomoci pokročilých analytických funkcí vyhodnocují stav soustavy a dokáží detekovat specifické stavy či poruchy [5].

Aplikace systémů WAMS se dají využívat v *online* nebo v *offline režimu* (např. pro vyhodnocení poruch post-mortem atd.) zpravidla jako doplňky ke stávajícím dohledovým a řídicím systémům v distribučních nebo přenosových soustavách, společně tvoří podklady pro dispečerské řízení sítí. Systémy WAMS přinášejí informace o chování přenosové soustavy v běžném provozu i v nestandardních stavech. Data jsou uložena v centrálním serveru po definovanou dobu. Fázorová data mohou být dále předávána sousedním TSO pomocí protokolu popsaného v normě IEEE C37.118 se zvolenou hustotou [5].

Výhody WAMS

Nové situace, které nastávají v elektrizačních sítích (jak již bylo uvedeno v úvodu práce) vyžadují hledání bezpečných mezí, za kterých je možné ještě soustavy provozovat z hlediska přenosových schopností prvků a stability [4]. Z tohoto důvodu je nutné monitorovat soustavu přesnějšími prostředky v reálném čase, analyzovat naměřená data, co nejpřesněji odhadnout daný stav sítě a pomocí pokročilých funkcí včas odhalit nepředvídané a neplánové situace.

Na rozdíl od SCADA systémů sledují WAMS dynamické jevy v propojené přenosové soustavě, což umožňuje sledovat aktuálně probíhající děje s vyšší přesností, zvláště pokud dochází ke sdílení synchronizovaných dat se sousedními TSO, čímž se vytváří ucelenější náhled na propojenou soustavu.

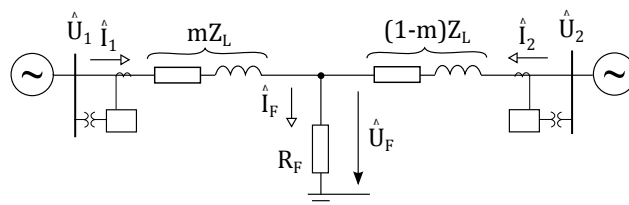
Od implementace WAMS do systému se očekává rozšíření funkční včasného varování, rozpoznání nebezpečných a v budoucnu i možnost rozpoznání nebezpečných dynamických stavů, což umožní včasnou reakci dispečerů [4]. Předpokládaný další vývoj je doplnění systémů WAMS o prostředky automatického řízení, které zajistí velmi rychlou reakci řídicího systému na nebezpečné dynamické jevy.

2.2.2. Vybrané reálné aplikace synchronních fázorů

Synchronní fázory jsou s úspěchem využívány řadou aplikací, zpravidla kvůli zvýšení přesnosti časové synchronizace. Následující aplikace jsou čerpány z [5], [6], [17]. Několik dalších aplikací bude rozebráno v následující sekci.

1. *estimace stavu soustavy* – do estimační funkce vstupují synchronní data (přípojnicová napětí, proudy), ostatní veličiny a parametry soustavy (výkonové toky)

- a údaje o aktuální topologii (stavy vypínačů a odpojovačů, pozice přepínače odboček), vstupní data jsou filtrována, následně dojde pomocí analytických funkcí (porovnání s modelem systému) k velmi přesnému dopočtu estimovaného stavu soustavy v daném okamžiku. Výstupy z estimace sítě jsou využity k predikci zatížení, optimalizace výkonových toků, regulaci výroby apod. Jednoznačná výhoda aplikace synchronních fázorů je ta, že do estimačního procesu vstupují přesná data bez časového zpoždění, z čehož vyplývá zvýšená přesnost a spolehlivost odhadu (k citelnému zpřesnění dochází již při instalaci PMU a následném odečtu naměřených dat v 10 % uzlových bodů, uvedeno v [17], str.13).
2. *podpora při spínání (fázování, kruhování)* – při spínání se provádí kontrola úhlu napětí mezi spínanými body soustavy. Na velikost rozdílového úhlu závisí velikost spínacího nárazu, který nesmí překročit kritickou mez a nesmí způsobit vybavení ochran. Při spínání dojde k ověření aktuální hodnoty rozdílového úhlu a následně bude spínací proces zablokovan nebo povolen. Synchronní fázory zajišťují přesnější a bezpečnější spínání, praktické použití zejména v distribučních soustavách (v ČR), v přenosových soustavách je využití menší.
 3. *měření parametrů vedení* – jedná se o výpočet podélné impedance a příčné admittance vedení. Tyto parametry vedení zpravidla slouží jako podklady pro výpočet teploty a následně ampacity vedení nebo pro určení místa poruchy. Výpočet je poměrně přesný pro dlouhá vedení (> 100 km), diskuze nad přesností výpočtu pro krátká vedení je předmětem práce.
 4. *výpočet průměrné teploty vedení* – vychází ze získaných elektrických parametrů vedení – viz předchozí bod, bude podrobně popsáno v následujících kapitolách.
 5. *kontrola polarity, sledu fází a převodu měřících transformátorů* – ochrany s touto zabudovanou funkcí lze použít jako vektorový voltmetr – v rámci jedné rozvodny lze porovnat shodu mezi velikostí a fází všech napětí z přípojnicových a vývodových MTN. Dále je možné ověřit polaritu, převod nebo sled fází MTP (aplikací Kirchhoffova zákona pro každou z přípojnic, fáze na fázi) [17].
 6. *lokalizace poruch* – lokalizace poruch je důležitá funkce pro provoz systému (přesné off-line vyhledání poruchy umožní opravu v nejkratším možném čase) a zpětnou vazbu pro obsluhu ochran (ověření správného nastavení). Jednostranná lokalizace poruchy je běžnou součástí digitálních ochran (založená na měření impedance), v některých případech ovšem nedosahuje dostatečné přesnosti (např. vysokohmová porucha, chyba výpočtu se může pohybovat v řádech km a více), v těchto případech lze využít lokalizaci poruch s využitím synchronního měření fázorů (získáme přesné výsledky obecně nezávislé na odporu oblouku a zatížení).



Obr. 5 – Lokalizace poruchy na vedení – schéma [17]

Rovnice odvozená pomocí Kirchhoffova zákona

$$-\hat{U}_1 + m \cdot \hat{Z}_L \cdot \hat{I}_1 - (1 - m) \cdot \hat{Z}_L \cdot \hat{I}_2 + \hat{U}_2 = 0 \quad (2.6)$$

Odtud výpočet vzdálenosti poruchy

$$m = \operatorname{Re} \left[\frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2 + \hat{Z}_L \cdot \hat{I}_2}{\hat{Z}_L \cdot (\hat{I}_1 + \hat{I}_2)} \right] \quad (2.7)$$

Tato aplikace je poměrně sporná (což vyplývá z problematiky měření parametrů vedení, jak je uvedeno výše). Pro měření musí být splněna podmínka – porucha musí trvat minimálně tři periody (datové okno 60 ms při zpracování signálu)[17].

2.3. Architektura systémů WAMS

Synchronizované měření napětí a proudů se využívá zejména v distribučních a přenosových soustavách. V rozvodnách a spínacích stanicích jsou instalované trojfázové PMU (Phasor Measurement Unit = fázorové měřicí jednotky), které odesílají naměřená data s určenou frekvencí po komunikačních linkách k uložení a k dalšímu zpracování do místních koncentrátorů dat (PDC), dále do nadřazených koncentrátorů dat a následně do centrály dispečinku. Zde se data ukládají a archivují po definovanou dobu a mohou být sdílena se sousedními TSO [5].

V následující části je popsána architektura a obecné principy fungování PMU a PDC (architektura měření se může lišit v jednotlivých TSO, stejně tak bude rozdílná konfigurace hardwaru PMU a PDC dodávaných jednotlivými výrobci).

Fázorové měřicí jednotky (PMU)

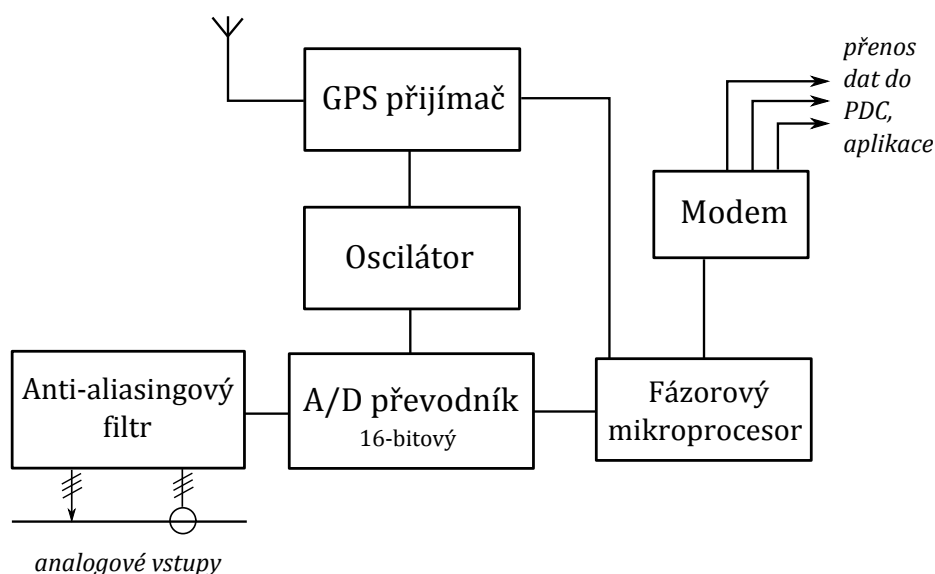
V rozvodnách se provádějí trojfázová analogová měření napětí a proudů, ze kterých jednotky PMU získávají fázory (tzn. veličiny složené z amplitudy a fáze – úhlu vztahového k referenční hodnotě) a dále provádějí dopočet frekvence a změnu frekvence v čase (df/dt). Naměřená data následně odesílají do PDC s předem definovanou frekvencí.

Analogové průběhy napětí a proudů jsou snímány nejčastěji přes měřicí transformátory napětí a proudů, dále jsou zpracovány anti-aliasingovým filtrem a A/D převodníkem. Oscilátor s pevně nastavenou fází převádí GPS signál – jeden impuls za sekundu na sekvenci vysokorychlostních impulsů použitých pro vzorkování signálu (vzorkovací frekvence např. 8 000 vzorků/s či vyšší) napětí a proudů v A/D převodníku. V A/D

převodníku probíhá kalibrace dat pro kompenzaci hardwarových chyb, následně data procházejí přes digitální dolní propust (DLPF), [17] Fázorový mikroprocesor provádí výpočet Diskrétní Fourierovy transformace (DFT). Získanému fázoru je pomocí dvou vybraných signálů z GPS přiřazena časová značka a je odeslán modemem do nadřazeného datového koncentrátoru. Formát těchto datových souborů je přesně specifikovaný v normě IEEE C37.118.

PMU jsou samostatná zařízení nebo mohou být implementovaná jako funkce ve stávajících zařízeních obsahujících přijímače GPS (např. v ochranách či elektroměrech, což je výhodné z hlediska pořizovacích nákladů) [17].

Měření synchronních fázorů probíhá kontinuálně, naměřená data jsou odesílána do nadřazených PDC. Nejvyšší povolená chyba časové synchronizace je $1 \mu\text{s}$ (odpovídá úhlové chybě $0,02^\circ$).



Obr. 6 – Blokový diagram hardwaru PMU [1]

Koncentrátory dat (PDC)

Jedná se o kaskádně řazená zařízení, která slouží k přijímání a ukládání synchronních dat z PMU jednotek, dále slučují data do datových proudů (sloučení fázorů se stejnými časovými značkami) a následně je zasílají nadřazeným PDC, centrálnímu serveru nebo dalším uživatelům [5]. Přijatá data se v PDC archivují po definovanou dobu (např. 30 dní), což je výhodné např. pro možnost načtení dat při přerušení komunikačních cest a následnou obnovu dat v centrálním serveru. Dále je možné uložená data zpracovávat aplikacemi přímo v rozvodně.

Centrální server

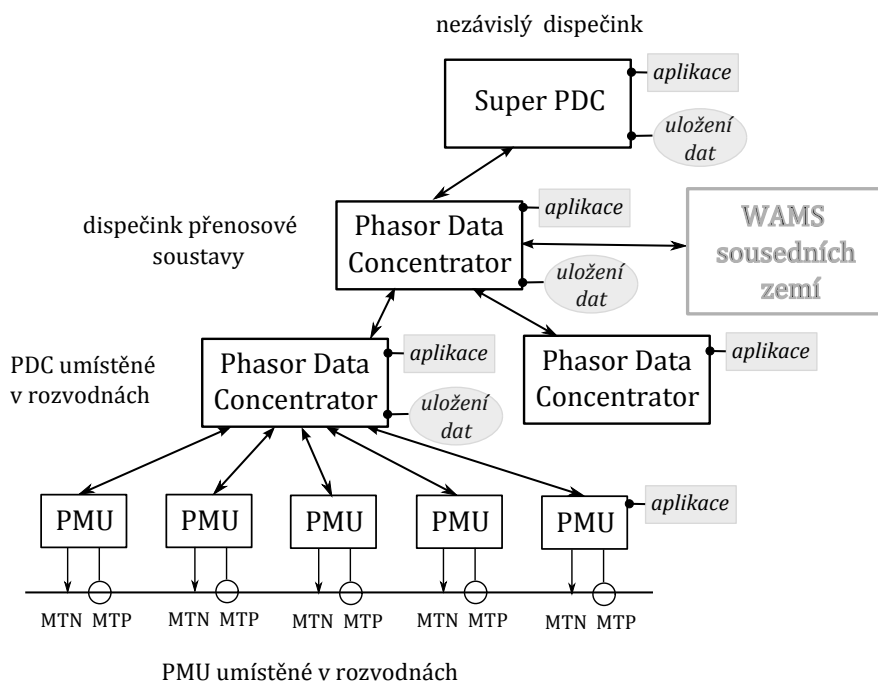
Centrální server (CPDC) slouží ke sběru dat přijatých z PDC z celé přenosové sítě a jejich dlouhodobé archivaci (kontinuálně měřená data se ukládají v určené hustotě po definovanou dobu, např. po dobu jednoho roku. Dále se mohou ukládat *snapshots* – synchronizované fázory naměřené při mimořádných událostech v soustavě). Zpravidla

bývá zálohován jedním nebo několika redundantními servery. Data jsou následně využívána k řadě aplikací, jsou zpracována softwarem a vyhodnocena analytickými funkcemi (vrací alarmy nebo chybová hlášení) či předávána externím systémům (např. SCADA) a sousedním TSO [5].

Komunikace a protokoly

Komunikace mezi PMU a PDC, případně centrálním serverem probíhá téměř výhradně po ethernetu pomocí protokolu definovaného v normě IEEE C37.118-2005. Přenos dat v rámci rozvodny je prováděn po optických kabelech. Na delší vzdálenosti jsou data obvykle přenášena optickými vlákny umístěnými v zemních lanech přenosových vedení či separovanými optickými linkami [5].

Komunikace ovšem neprobíhá pouze v rámci přenosové soustavy, ale také se sousedními TSO – předávání dat sousedním přenosovým soustavám spočívá v oboustranné výměně synchronizovaných dat (zpravidla jsou sdíleny informace o U a aktuální f). Tato spolupráce umožňuje výrazně přesnější estimaci stavu konkrétní přenosové soustavy a také předává informaci o případných nestandardních nebo poruchových stavech v sousedních sítích, což jsou cenné informace pro místní dispečery a umožňují jim včasnou přípravu na možné poruchové stavy.



Obr. 7 – Obecná architektura synchronizovaného měření fázorů

Systém GPS

GPS je systém složený z 32 družic obíhajících kolem Země po téměř kruhových drahách provozovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických. Pro PMU jednotky je klíčový signál odpovídající jednomu impulzu za sekundu, který generují družice pomocí atomových hodin s velmi přesným oscilátorem. Signál je přijímán přijímači na Zemi

s přesností do $1 \mu\text{s}$, pro synchronizované měření je možné zajistit přesnost až několik stovek ns [1]. Přijímače GPS provádějí korekci zachycených dat (GPS čas vysílaný družicemi se neshoduje s rotací Země, proto je nutná korekce) a zajišťují tak přesný UTC (Universal Time Coordinated) hodinový čas.

Vizualizační a aplikační software

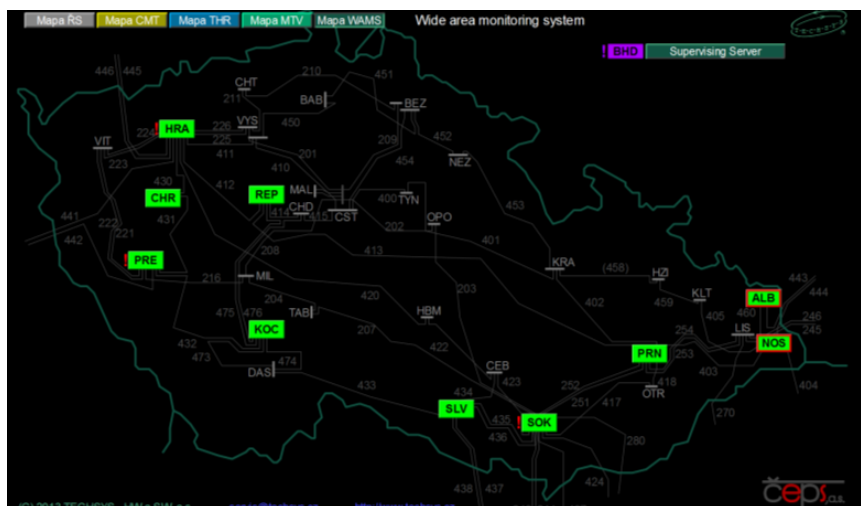
S rozšiřováním PMU jednotek rostou možnosti využití synchronizovaných fázorů od jednoduchých algoritmů (např. kalkulace probíhající přímo v rozvodně signalizující ostrovní provozy, kývání v síti či ohrožení stability způsobené velkými úhly přenosu, výstupem může být alarm či upozornění) až po náročnější aplikace zahrnující analýzu systémových poruch či estimaci stavu soustavy (výpočet probíhá např. v centrále přenosové soustavy, dispečerům jsou k dispozici získané informace umožňující zkvalitnit rozhodování při kritických manipulacích).

Vizualizační software by měl být všestranný a přizpůsobivý a měl by umožňovat nastavení vlastních vizualizací pro zefektivnění monitoringu soustavy. Výhodná je funkce rozpoznání neobvyklých stavů v soustavě (podpětí, podfrekvence, nesymetrie apod.) [17].

2.4. WAMS v české přenosové soustavě

2.4.1. Architektura měření

Synchrofázorové měření v české přenosové soustavě prošlo v nedávné době modernizací a měření probíhá již v samostatných jednotkách PMU (dříve měření zajišťovaly funkce zabudované ve stávajících ochranách). V současné době je nainstalováno 36 jednotek PMU a 10 PDC ve vybraných rozvodnách 400 kV (viz obrázek níže). V české přenosové soustavě slouží PDC primárně jako záložní archiv, synchronizovaná data jsou odesílána z jednotek PMU přímo do centrálního serveru (data archivovaná v PDC slouží k obnově při případné poruše na komunikační cestě PMU–centrála). V PDC jsou data uložena po dobu tří měsíců (v hustotě 50 vzorků/s), poté jsou přemazávána aktuálními daty.



Obr. 8 – Instalace PMU a PDC v 10 vybraných rozvodnách (převzato z interních zdrojů ČEPS a.s.)

V centrále ČEPS a.s. v Praze jsou umístěny dva centrální servery (CPDC = Central PDC, v redundantním provozu), zde se synchronní data ukládají v nezměněné formě po tři měsíce, poté se data redukuje (na záznam 10 vzorků/s) a v této podobě se zálohují po dobu jednoho roku. V centrále se rovněž archivují tzv. snapshot (záznamy významných událostí – např. poruchy v síti, oscilace apod.). Dále se v centrále nachází jeden dohledový server, který plní funkci dohledu nad centrálními servery. Naměřená synchronní data jsou zpracovávána softwarem PhasorPoint, který využívá řadu pokročilých analytických funkcí (podrobněji popsáno v následující části). CPDC detekují a přenášejí alarmy a zajišťují komunikaci s dispečerským řídicím systémem. Dále probíhá výměna dat s okolními TSO (v současné době jsou dostupná data od TSO z Dánska, v blízké době se předpokládá zprovoznění výměny dat s Belgií, Švýcarskem a Maďarskem, sdílení informací o aktuálním U a f umožňuje včasnou detekci ostrovních provozů).

Komunikace mezi PMU, PDC a centrálou probíhá po optických kabelech dle protokolů daných normou IEEE C37.118-2005.

2.4.2. PMU

Jednotky PMU jsou časově synchronizované z GPS, generují výstupní hodnoty \hat{U} , \hat{I} , f a $\frac{df}{dt}$. Hustota měření je 50 vzorků/s. Přesnost měření dosahuje $TVE < 0,5\%$ (v rozsahu od 50 do 120 % měřené veličiny). Bližší informace o vnitřní úpravě dat a měření (dolnopropustní filtr, průměrování dat, délka datového okna) nejsou známé.

2.4.3. Využití synchronizovaného měření v české přenosové soustavě

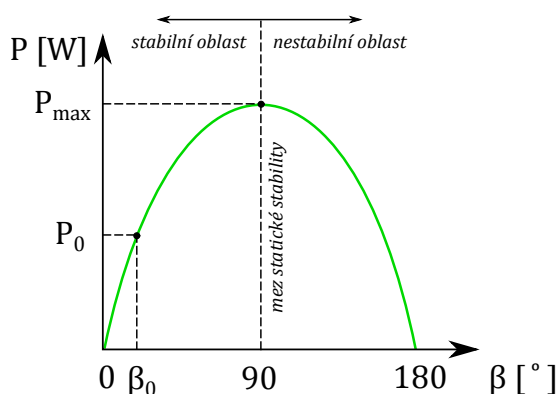
V přenosové soustavě ČR fungují systémy WAMS jako doplněk ke SCADA systémům. Z PMU jsou zasílány informace o trojfázovém synchronním měření napětí a proudů, aktuální frekvenci a derivaci frekvence, v centrále dochází k dopočtu veličin P a Q pro první harmonickou a výpočet sousledných složek napětí a proudů. Tyto informace jsou v on-line nebo off-line režimu zpracovány např. následujícími analytickými funkcemi. V současné době je měření využíváno k analytickému vyhodnocování a probíhá testování, v budoucnu bude synchronní měření sloužit jako podpora pro řídicí dispečerský systém.

Pokročilé analytické funkce centrálního serveru využívající synchronní data

1. *monitoring fázorových úhlů napětí* – ve vybraných uzlech soustavy probíhá sledování rozdílů fázorových úhlů vztahených k referenčnímu, doplněný o fázorová data sousedních TSO. Kontinuálně probíhá kontrola rozdílu úhlů, která generuje varování při překročení limitní hodnoty. Jedná se o online měření.
2. *detekce ostrovních provozů (islanding)* – jedná se o stav, kdy dojde k odpojení určité části sítě a vzniká ostrovní provoz. Tento stav je možné identifikovat monitorováním a analýzou průběhu frekvence, derivace frekvence a úhlu fázoru napětí v daných uzlech soustavy. Aplikace provádí detekci vzniku a ukončení ostrovních provozů a měří frekvenci a derivaci frekvence ostrovních provozů.
3. *detekce a analýzy oscilací* – tato analytická funkce monitoruje a vyhodnocuje oscilace výkonu a frekvence v soustavě a kontroluje jejich tlumení. Lze využívat pro

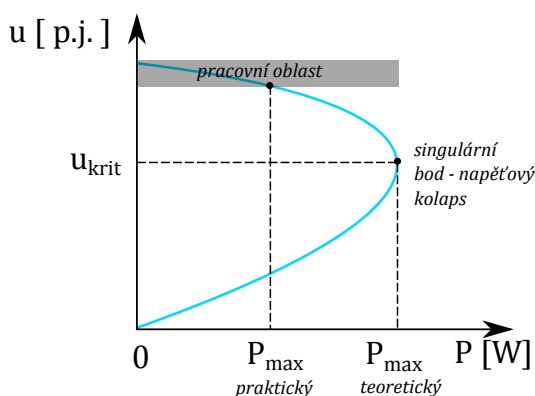
kontrolu chování soustavy v situacích extrémního přetížení pro odhalení nestandardních jevů ohrožujících bezpečnost provozu (např. netlumené kmity, úhlová nestabilita). Tato analytická funkce vyžaduje pro úspěšné vyhodnocení synchronní data z okolních soustav.

4. *detekce snížení rezervy statické stability* – na základě měřených fázorů se vypočítá okamžitá rezerva statické stability na zadaném koridoru, zobrazuje se výsledek vyhodnocení statické stability ve formě grafu $P = f(\beta)$ s případným signálem o narušení statické stability, který se odesílá do dispečerského řídicího systému. (Jednotky PMU jsou schopny odesílat do PDC nejen informace o synchronních fázorech napětí a proudů, ale také provádět výpočet činného výkonu).



Obr. 9 – Statická stabilita – $P = f(\beta)$ [23]

5. *monitorování stability napětí* – daná aplikace sleduje aktuální stav stability napětí na zadaném koridoru, určuje maximální činný výkon, který lze přenést bez ohrožení stability napětí, tj. rezervu přenosu výkonu z hlediska meze stability napětí. Aplikace provede detekci blížícího se kolapsu napětí a její výsledky přeneše do dispečerského řídicího centra.



Obr. 10 – Nosová křivka – stabilita napětí [25]

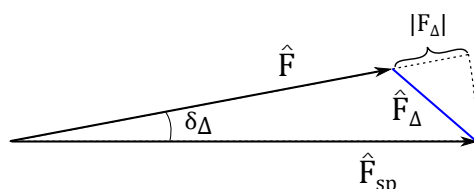
6. *výpočty chodu sítě* – podklady pro kontingenční analýzu. Jedná se o simulační analýzu, která provádí kontinuální kontrolu dodržování kritéria $N-1$, tzn. provádí vyhledání přetížených prvků soustavy (napěťové nebo proudové) při výpadku libovolného prvku. Zpravidla lze vybrat prvky, u kterých bude prováděna simulace výpadku. Použití synchronních vstupů do kontingenční analýzy zajistí zvýšení přesnosti výpočtu.

2.5. Přesnost měření

2.5.1. Přesnost měření PMU

Synchronizace pomocí GPS probíhá s přesností lepší než $1 \mu s$, díky tomu PMU obecně dosahují poměrně vysoké přesnosti měření – amplituda 0,1 %, úhel 0,01 % (přesnost měření dle literatury [12], reálná přesnost měření PMU v provozu bude zřejmě nižší).

Změřený fázor \hat{F} se od správné hodnoty \hat{F}_{sp} liší chybovým rozdílovým fázorem \hat{F}_{Δ} , složeným z chyby amplitudy $|F_{\Delta}|$ a chyby úhlu δ_{Δ} .



Obr. 11 – Zobrazení rozdílového fázoru \hat{F}_{Δ} [7]

Jedním z možných zdrojů chyby ve vstupních datech je chyba v časování vzorkovacích pulzů. To může být způsobeno tím, že vzorkovací frekvence přesně neodpovídá násobku síťové frekvence. Chyba úhlu vzniklá nepřesnou synchronizací je daná následujícím vzorcem (δ_{Δ} – chyba úhlu [°], t_{Δ} – chyba časové synchronizace [μs], platné pro síťovou frekvenci 50 Hz).

$$\delta_{\Delta} = t_{\Delta} \cdot 0,018 \quad (2.8)$$

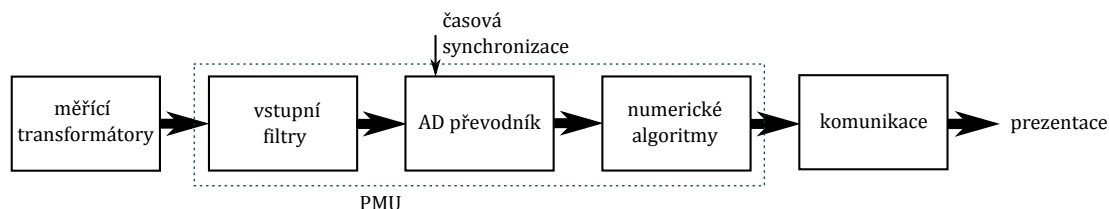
Chyba úhlu dále ovlivňuje chybu rekonstruovaného výkonu a celkovou bilanci uzlu. Pro korektní kalkulaci výkonu nemá odchylka přesáhnout $0,1^{\circ}$ [7].

2.5.2. Přesnost měřicího řetězce

Přesnost měření synchronních fázorů v PMU je velmi vysoká, což teoreticky nabízí úžasné možnosti využití – zpřesnění stávajících funkcí pro monitorování a řízení soustavy a návrh nových funkcí využívajících naměřená data. V praktických aplikacích při měření v reálných podmínkách ovšem nelze této přesnosti dosáhnout. V předchozí části jsme se zabývali přesností měření PMU jednotek, ovšem celková přesnost měření je závislá především na kvalitě a přesnosti celého měřicího řetězce.

Měřicí řetězec se skládá z těchto základních prvků: měřicí transformátory napětí a proudu, kabelová vedení (optická, metalická), hodiny řízené signálem z GPS (či jiné synchronizační hodiny), PMU (obsahující filtrační prvky, A/D převodník) a PDC [13].

Každý jednotlivý prvek řetězce zpracovává signál s rozdílnou přesností, může způsobovat degradaci signálu a zařízení se mohou vzájemně ovlivňovat. Přesnost měření či zpracování signálu danými prvky závisí na typu zařízení a dalších parametrech. Obecně dosahují PMU výrazně vyšší přesnosti než zbývající prvky řetězce. Systematická chyba měření bude zanedbatelná, pokud pocházejí instalované PMU od stejného výrobce, v opačném případě mohou naměřená data z odlišných zařízení obsahovat zanedbatelnou diferenci, analogicky pro měřicí transformátory [12].



Obr. 12 – Základní struktura měřícího řetězce [7]

Nejvýznamněji ovlivňují celkovou přesnost měření tyto prvky řetězce

- *MTN, MTP* – přesnost měření se odvíjí od typu připojeného jádra (PMU se zpravidla připojují na přesnější měřicí jádra transformátorů), měření odpovídá třídě přesnosti garantované výrobcem (maximální chyby měřících transformátorů jsou popsány v normě ČSN-EN 60044-1 a ČSN-EN 60044-2) a také závisí na rozsahu, ve kterém se pohybují měřené hodnoty.

MTN – U napěťových transformátorů se pohybují měřené veličiny na ustálené hodnotě a zpravidla zůstává chyba měření během provozu konstantní.

MTP – U proudových transformátorů odpovídá přesnost měření hodnotám v rozsahu 80–120 % jmenovité hodnoty, pro nižší hodnoty přesnost měření klesá. Proudové zatížení se nepohybuje na konstantní hodnotě, ale v průběhu dne se může značně měnit → z tohoto důvodu je nutné zavést korekci systematické chyby měření (současné PMU již běžně obsahují korekční algoritmus pro potlačení systematické chyby měřících transformátorů) [18].

- *kabely (optické, metalické)* – chyba měření amplitudy a úhlu závisí na typu kabelů a jejich délce

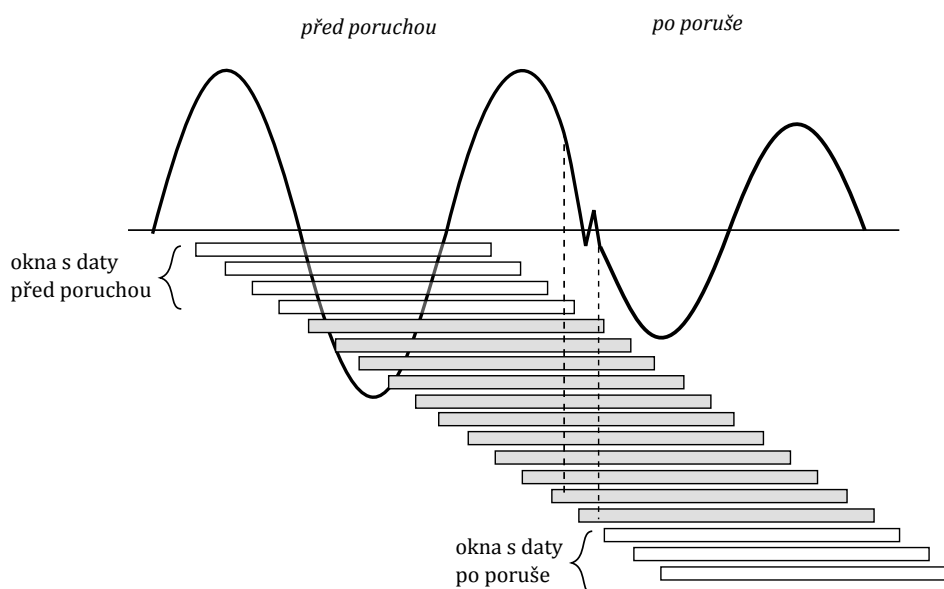
Přesnost měření relativních úhlů závisí na přesnosti synchronizace jednotlivých měřících míst [7].

2.5.3. Měření přechodných stavů

Při měření přechodných stavů klesá přesnost měřeného fázového úhlu i amplitudy. Vypovídající hodnota naměřených dat je diskutabilní, výpočet fázorového odhadu probíhá kontinuálně, ovšem v daném okamžiku obsahuje data ze dvou různých přechodných stavů, viz obrázek níže. Fázory vypočítané z šedých datových oken nerepresentují žádný smysluplný stav soustavy. Informace o frekvenci jsou chybné a analýza takovýchto dat vede k chybným závěrům [1].

Je tedy žádoucí detekovat chybná datová okna. Pro indikaci kvality fázorového odhadu lze využít *sledovač přechodných jevů*, který zajišťuje detekci okamžiků, kdy datová okna obsahují smíšená data ze dvou stavů soustavy a dále nese informaci o rušení ve vstupním signálu. Sledovač provádí výpočet rozdílu mezi vstupními daty a přepočítanými navzorkovanými daty z fázorového odhadu, tento rozdíl se nazývá *chyba estimace*. Pro čistý sinusový průběh je rovna nule [1].

Částečná eliminace chyby měření je možná také vnitřní estimací fázoru – přidanou funkcí zabudovanou v PMU.



Obr. 13 – Přechod ze stavu před poruchou do stavu po poruše. Zvýrazněná okna obsahují smíšená data [1], str. 41

2.5.4. Šum v signálu a efekt délky datového okna

Vstupní signály se pouze vzácně vyskytují bez obsahu šumu. Šum lze definovat jako neharmonické složky základní frekvence, dále jako elektrický šum způsobený indukci okolních signálů na metalické vedení či šum způsobený efektem průsaku souvisejícím s délkou datového okna. Šum ve vstupním signálu způsobuje chybu měření, kterou lze potlačit v zásadě dvěma způsoby – zvýšením vzorkovací frekvence a užitím delšího datového okna (chyba fázorového odhadu klesá s druhou odmocninou počtu vzorků/periodu a obdobně klesá s druhou odmocninou z počtu period datového okna, demonstrováno na příkladu v [1], str. 37).

2.5.5. Zvýšení přesnosti měření

Přesnost měření lze zvýšit použitím dodatečných informací – korekčními křivkami a algoritmy (např. korekce chyb měřících transformátorů, jedná se o funkci dostupnou v některých PMU), detailními statickými a dynamickými modely, zpracováním měřených informací. Chyby měřících řetězců lze potlačit eliminací systematických chyb, využitím všech dostupných měření nebo paralelní estimací v lokálních soustavách. Dále lze ovlivnit přesnost měření prodloužením datového okna. Citováno z [7], [12], [1].

2.6. Normy pro synchrofázorové měření

IEEE 1344-1995

S rozvojem výzkumu synchrofázorů se objevila potřeba definovat měření synchrofázorů a nastavit základní pravidla manipulace s daty. První norma zabývající se synchronním měřením byla vydána v roce 1995 – Standard IEEE 1344. Ta to norma představila synchrofázory a PMU energetickému průmyslu a nastínila základní koncepty a metody manipulace s daty.

IEEE C37.118-2005

V roce 2005 byla vydaná norma IEEE C37.118-2005, která výrazně modernizuje a zdokonaluje původní normu při zachování základní kompatibility. Tato norma již blíže specifikuje komunikaci a obsahuje metody pro výpočet, PMU měření a požadavky pro měření v ustáleném stavu. Účel vydání obou standardů je snaha o sjednocení měření a formátu dat tak, aby se usnadnila výměna dat a tím se podpořil vývoj nových kompatibilních měřících zařízení a aplikačních možností [3].

IEEE C37.118.1-2011

Jedná se o revizi normy 2005, která se na rozdíl od předchozí verze zabývá nejen specifikací fázorového měření v ustáleném stavu, ale také dynamickým synchronizovaným měřením během poruch v systému. Dále obsahuje rozšíření synchrofázorové definice, specifikaci požadavků na měření a testovací podmínky (zejména pro měření praktických dynamických jevů v soustavě.) Konkrétněji norma definuje měření synchrofázorů (velikost a úhel), frekvence, derivaci frekvence, dále definuje jednotky PMU (popsané jako samostatné zařízení nebo funkci zabudovanou ve stávajících zařízeních). Norma popisuje časové značky, požadavky na synchronizaci pro měření silových veličin (viz [2]).

Měření shodující se s normou zajišťují usnadnění komunikace, kompatibilitu a aplikaci spolehlivých dat.

2.6.1. Chyba měření frekvence (FE) a derivace frekvence (RFE)

Chyba měření frekvence (Frequency Error) a chyba měření derivace frekvence (Rate of Change Frequency Error) jsou v normě popsány následujícími vzorci

$$FE = |f_{sp} - f_{mer}| = |\Delta f_{sp} - \Delta f_{mer}| \quad (2.9)$$

$$RFE = \left| \left(\frac{df}{dt} \right)_{sp} - \left(\frac{df}{dt} \right)_{mer} \right| \quad (2.10)$$

Chyby jsou vyhodnocovány pro stejný časový okamžik (daný časovou značkou).

2.6.2. TVE

Teoretická hodnota synchronního fázoru se může lišit od hodnoty získané výpočtem v PMU. TVE (= Total Vector Error, celková vektorová chyba) je normou zavedená veličina, která slouží k vyhodnocení rozdílu amplitudy a fázového úhlu mezi PMU odhadem

synchronního fázoru a jeho teoretickým fázorovým ekvivalentem ve stejném časovém okamžiku [3].

Obecný cosinusový průběh je teoreticky popsán následujícím fázorem v časovém okamžiku t_0 , kde X_r je reálná složka a X_i je imaginární složka.

$$\hat{X} = X_r + jX_i \quad (2.11)$$

Fázorový PMU odhad pro stejný časový okamžik

$$\hat{X}(t_0) = X_r(t_0) + jX_i(t_0) \quad (2.12)$$

TVE je definovaný (vyjádřeno v [p.j.] teoretického synchrofázoru) [2]

$$TVE = \sqrt{\frac{(X_r(t_0) - X_r)^2 + (X_i(t_0) - X_i)^2}{X_r^2 + X_i^2}} \quad (2.13)$$

Splnění požadavku $TVE < 1\%$ zajišťuje dle normy přesný výpočet synchronních fázorů. Výrobci PMU udávají hodnoty TVE v katalogových listech, v současné době měřené synchrofázory běžně dosahují $TVE < 0,5\%$.

CITLIVOSTNÍ ANALÝZA TVE

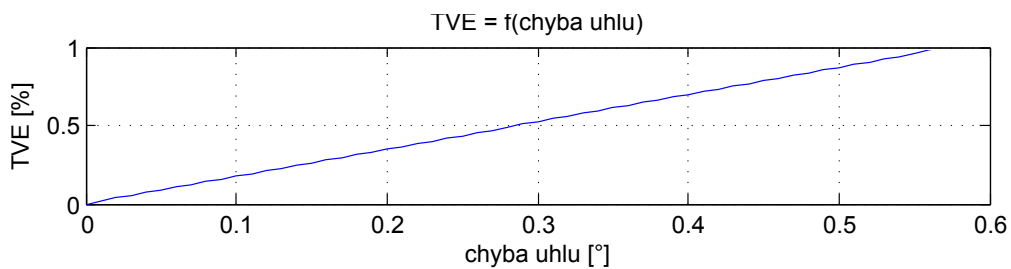
Hodnota TVE v sobě kombinuje chybu amplitudy i fázového úhlu a na první pohled není zřejmé, jakých maximálních hodnot mohou jednotlivé chyby dosáhnout a jaké kombinace chyb se mohou ukrývat pod limitem $TVE < 1\%$. Z tohoto důvodu provedeme citlivostní analýzu a podrobněji rozebereme několik různých variant.

V následující tabulce jsou uvedeny limitní chyby amplitudy a úhlů, které splňují podmínku $TVE = 1\%$ a $TVE = 0,5\%$.

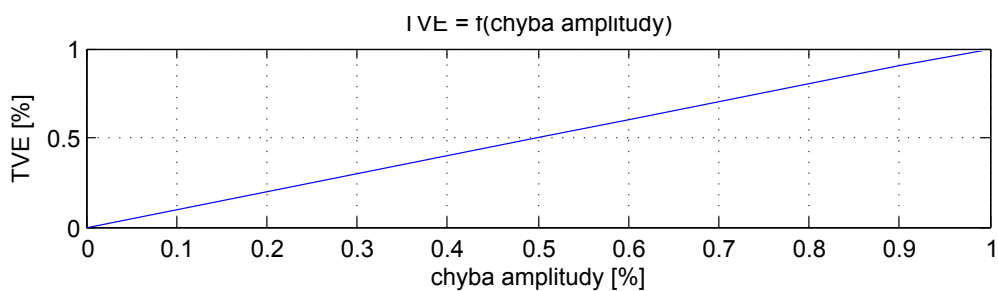
Tab. 1 – Limitní hodnoty chyby amplitudy a úhlu

chyba úhlu [°]	chyba amplitudy [%]	TVE [%]
0,57	0	1
0	1	1
0,285	0	0,5
0	0,5	0,5

V uvedených grafech jsou vykresleny závislosti TVE [%] na chybě měřeného úhlu (za podmínky, že chyba amplitudy je nulová) a závislost TVE na chybě měřené amplitudy (za podmínky, že chyba měřeného úhlu je nulová).



Obr. 14 – Závislost výsledného TVE na chybě úhlu



Obr. 15 – Závislost výsledného TVE na chybě amplitudy

Maximální chyba amplitudy dosahuje **1 %** a maximální chyba měřeného úhlu dosahuje **0,57°** při splnění podmínky $TVE < 1 \%$. Z rozboru je tedy zřejmé, že v limitu $TVE < 1 \%$ daném normou se může skrývat poměrně významná chyba měření a je velmi vhodné volit pro měření jednotky PMU s garantovanou co nejnižší hodnotou TVE.

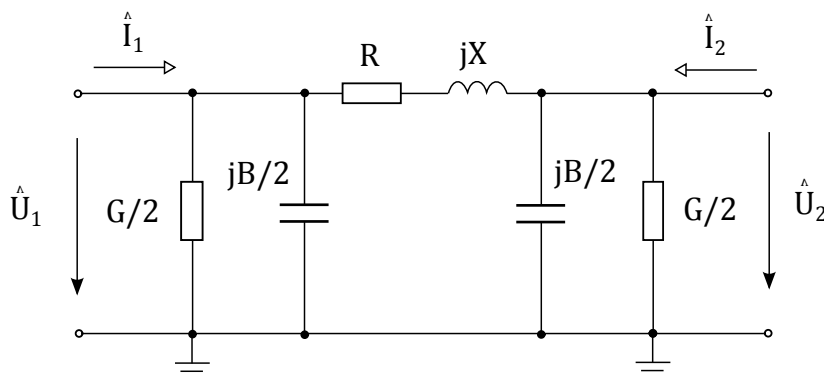
3. Sledování elektrických parametrů vedení pomocí synchronních fázorů

3.1. Elektrické parametry vedení

Elektrické parametry venkovních vedení lze obecně uvažovat pro analytické výpočty soustavy ve fázovém tvaru nebo rozložené do složkových soustav. Parametry uvažujeme *soustředěné* nebo *rozložené* (jejichž výpočet je značně náročnější). Při uvážení rychlosti šíření elektromagnetických vln a délky vedení do 300 km lze pro výpočty používat soustředěné parametry, jelikož je vzniklá chyba výpočtu zanedbatelná [20].

Některé nepříznivé jevy mohou negativně ovlivňovat přesnost výpočtu parametrů, jedná se o netranspozici vedení způsobující nesymetrii vedení a instalace vodivějších zemnicích lan, čímž se zvyšuje podíl zpětného zemního proudu protékajícím zemnicím lanem, což má za následek zvýšení nesymetrie zkratových smyček fáze-země, která nepříznivě ovlivňuje funkci ochran a lokátorů poruch.

Pro účely této práce uvažujeme fázové parametry modelované jako soustředěné. Parametry přenosového vedení namodelujeme pomocí π článku, jedná se o dostatečně přesný model pro vedení kratší než 250 km (použitím modelu vznikne chyba dosahující maximálně 2%).



Obr. 16 – Model vedení π článku [18]

V modelu vedení jsou zobrazeny čtyři základní elektrické parametry:

- *podélné*: činný odpor R a indukčnost L (vyjádřená indukční reaktancí X)
- *příčné*: kapacita C (vyjádřená kapacitní susceptancí B) a svod G

3.1.1. Činný odpor (rezistance)

Základní rovnice pro odvození činného odporu kovového vodiče

$$R_{ss} = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (3.1)$$

kde ρ je měrná rezistance vodiče o průřezu 1 mm^2 a délce 1 km [$\Omega \text{ mm}^2 \cdot \text{km}^{-1}$], l je délka vodiče [km] a S je průřez vodiče [mm^2].

Skin efekt (povrchový jev) způsobující nerovnoměrné rozložení střídavého proudu na průřezu vodiče a jeho vliv na velikost odporu lze popsat pomocí činitele k_s . Činitel k_s v sobě zahrnuje další parametry (jako jsou frekvence, průřez, permeabilita vodiče, měrná rezistance).

$$R_{st} = R_{ss} \cdot k_s \quad (3.2)$$

Zvýšení činného odporu AlFe lan vlivem skin efektu je při síťové frekvenci 50 Hz zanedbatelné (maximálně 1%). Zvětšení odporu průhybem a kroucením vodičů je rovněž zanedbatelné, u vedení VVN nepřesahuje několik $\%$ [20].

3.1.2. Indukčnost

Indukčnost je definována jako koeficient úměrnosti mezi magnetickým tokem Φ a proudem I , který ho vyvolal.

$$\Phi = L \cdot I \quad (3.3)$$

Po odvození získáme výsledný vztah pro celkovou indukčnost kovového vodiče jednotkové délky ve dvou vodičové kovové smyčce s uvážením skin efektu (ve vzorci je zahrnuta vnitřní, vnější i vzájemná indukčnost, vzorec obsahuje určité zjednodušení), kde d je vzdálenost vodičů ve smyčce, r poloměr vodiče, ξ je konstanta [20].

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{d}{\xi \cdot r} \quad \left[\frac{mH}{km} \right] \quad (3.4)$$

3.1.3. Kapacita

Kapacita je definovaná jako koeficient úměrnosti mezi elektrickým nábojem Q a elektrickým napětím U .

$$Q = C \cdot U \quad (3.5)$$

Po odvození získáme provozní kapacitu jednoduchého vedení, kde d_s je vzdálenost os vodičů, r poloměr vodiče [20].

$$C = \frac{0,0242}{\log \frac{d_s}{r}} \quad \left[\frac{\mu F}{km} \right] \quad (3.6)$$

3.1.4. Konduktance

Konduktance souvisí s příčnými ztrátami vedení, které se dělí na ztráty svodem přes izolátory a ztráty způsobené korónou. Oba druhy ztrát jsou silně závislé na počasí a napětí a nelze je vyjádřit analyticky, navíc dosahují poměrně nízkých hodnot ($< 0,02 \frac{\mu S}{km}$ pro vedení 400 kV), z těchto důvodů se zpravidla zanedbávají [20].

3.2. Výpočet elektrických parametrů pomocí synchronních fázorů

Přesná znalost impedance a admitance přenosového vedení umožňuje zvýšit přesnost nastavení elektrických ochran, pomáhá zdokonalit zpětné vyhodnocení lokace poruchy a modelování výkonových toků.

Jedna z možností využití synchronního měření fázorů a proudů je sledování elektrických parametrů vedení. Jedná se o on-line výpočtovou metodu, kde ze synchronních dat napětí a proudů získáme okamžité hodnoty významných parametrů vedení, jako jsou R , X , B a G . Nesporná výhoda je ta, že měření probíhá za plného provozu vedení bez omezení ve skutečných provozních podmínkách.

Synchronní data lze dále předat k následnému zpracování v režimu off-line, které zahrnuje filtraci dat, třídění, zobrazení dat z vybraných časových úseků, vyhodnocení, zpracování dat analytickými funkcemi apod. Vypočítané el. parametry se využijí v pokročilých aplikacích (např. funkce pro výpočet ampacity vedení, nastavení ochran, estimace stavu soustavy apod.) [21]. Dále se zaměříme na výpočet podélné impedance vedení a následné určení průměrné teploty vedení ze synchronních dat.

3.2.1. Výpočet podélné impedance vedení

Výpočet podélné impedance vedení se tradičně provádí pomocí známé geometrie vodičů, tato metoda je ovšem poměrně nepřesná – díky efektu průhybu vodičů, závislosti parametrů na okolní teplotě, meteorologickým podmínkám a proměnné zátěži vedení [11]. Přesnost výpočtu dále ovlivňuje transpozice fázových vodičů na vedení, výpočet probíhá za předpokladu souměrnosti a u netransponovaných vedení může vzniknout chyba výpočtu až několik % [20]. Výpočet podélné impedance pomocí synchronních fázorů teoreticky nabízí zpřesnění tradičního výpočtu, jedná se o přímé měření online metodou.

Pro výpočet podélné impedance lze použít různé metody, v této kapitole rozebereme čtyři vybrané metody (čerpáno z [11], str. 2-7) a dále zvážíme vhodnost jejich použití pro podmínky české přenosové soustavy. První dvě metody považujeme za klasické, vhodnější spíše pro dlouhá vedení s nízkým podílem rušení, další dvě metody byly navrženy speciálně pro krátká vedení ($l < 100$ km).

Metody byly v uvedeném zdroji literatury ověřeny na modelu venkovního vedení o délce 19,26 km, model byl vytvořen v programu ATP, vedení bylo simulováno pomocí π článku. Práce byla zaměřena na problematiku krátkých vedení – u dlouhých vedení obecně není výpočet impedance problematický, u krátkých vedení ovšem šum v naměřených datech způsobuje významnou chybu ve výpočtu. Tyto podmínky odpovídají poměrům české přenosové sítě (je složena převážně z krátkých vedení a z několika dlouhých linek). Výpočet byl vždy proveden na simulaci ideálního fázorového měření,

poté byly do měření přidány složky náhodného rušení a zkreslení. Na závěr byly porovnány výsledné hodnoty a byl vyhodnocen vliv rušení na chybu měření parametrů R , X , B .

Obecně pro všechny metody platí, že nejhorší přesnosti dosahuje výpočet činného odporu za podmínky, že synchronní fázory napětí obsahují náhodné rušení – v těchto případech chyba výpočtu přesáhla 20 %.

A. Metoda jednoho měření

Tato poměrně tradiční metoda odhadu podélné impedance je vhodná pro delší vedení a neobsahuje korekci zarušených dat. Dle [21] a [18] se používá v PMU instalovaných v některých rozvodnách českých distributorů.

Parametry přenosového vedení namodelujeme pomocí π článku (viz předchozí rozbor). Po zanedbání svodu (G « B)

$$\hat{Z} = R + jX \quad (3.7)$$

$$\hat{Y} = jB \quad (3.8)$$

Metodou smyčkových proudů a uzlových napětí lze odvodit rovnice a provést výpočet neznámých \hat{Z} a \hat{Y} , parametry \hat{U}_1 , \hat{U}_2 , \hat{I}_1 , \hat{I}_2 jsou naměřené synchronní fázory [11].

$$\hat{I}_1 - \hat{U}_1 \frac{\hat{Y}}{2} + \hat{I}_2 - \hat{U}_2 \frac{\hat{Y}}{2} = 0 \quad (3.9)$$

$$\hat{U}_1 - \hat{Z}(\hat{I}_1 - \hat{U}_1 \frac{\hat{Y}}{2}) - \hat{U}_2 = 0 \quad (3.10)$$

Podélná impedance vedení

$$\hat{Z} = \frac{\hat{U}_1^2 - \hat{U}_2^2}{\hat{U}_2 \cdot \hat{I}_1 - \hat{U}_1 \cdot \hat{I}_2} \quad (3.11)$$

Příčná admittance vedení

$$\hat{Y} = \frac{\hat{I}_1 + \hat{I}_2}{\hat{U}_1 + \hat{U}_2} \quad (3.12)$$

Probíhají-li na obou koncích vedení synchronní měření napětí a proudů ve všech fázích, provedeme výpočet podle výše uvedeného vztahu a získáme hodnotu podélné impedance a tedy i činného odporu vedení. Tato metoda odhadu podélné impedance je z uvedených metod nejjednodušší a spolehlivě pracuje pouze pro čistý signál bez rušení [11]. Malá chyba v měřených hodnotách způsobí velkou nepřesnost ve výpočtu (chyba měřeného napětí ovlivňuje výpočet podélného činného odporu a reaktance, chyba v měření proudu ovlivňuje výpočet příčné admittance) [17].

B. Metoda dvojitého měření

Metoda dvojitého měření rovněž vychází z výše uvedeného modelu – parametry vedení jsou namodelovány pomocí dvojbranu π článěk. Výpočet je řešený pomocí komplexních

konstant \hat{A} , \hat{B} , \hat{C} , \hat{D} (tzv. Blondelovy přenosové konstanty).

Obečné rovnice pro výpočet vstupních veličin π článku

$$\hat{U}_1 = \hat{A} \cdot \hat{U}_2 + \hat{B} \cdot \hat{I}_2 \quad (3.13)$$

$$\hat{I}_1 = \hat{C} \cdot \hat{U}_2 + \hat{D} \cdot \hat{I}_2 \quad (3.14)$$

Probíhají-li synchronní měření ve dvou nezávislých terminálech na začátku a konci vedení, PMU generují dvě rozdílné sady naměřených dat. Při různých zátěžových podmínkách budou generovány nové sady, ze dvou sad (generované v následujícím intervalu) lze odvodit následující soustavu rovnic o čtyřech neznámých

$$\hat{U}_{1-1} = \hat{A} \cdot \hat{U}_{2-1} + \hat{B} \cdot \hat{I}_{2-1} \quad (3.15)$$

$$\hat{I}_{1-1} = \hat{C} \cdot \hat{U}_{2-1} + \hat{D} \cdot \hat{I}_{2-1} \quad (3.16)$$

$$\hat{U}_{1-2} = \hat{A} \cdot \hat{U}_{2-2} + \hat{B} \cdot \hat{I}_{2-2} \quad (3.17)$$

$$\hat{I}_{1-2} = \hat{C} \cdot \hat{U}_{2-2} + \hat{D} \cdot \hat{I}_{2-2} \quad (3.18)$$

Značení: fázory z prvního měření: \hat{U}_{1-1} , \hat{U}_{2-1} , \hat{I}_{1-1} , \hat{I}_{2-1}

fázory z druhého měření: \hat{U}_{1-2} , \hat{U}_{2-2} , \hat{I}_{1-2} , \hat{I}_{2-2}

Řešením soustavy rovnic pomocí Kramerova pravidla získáme neznámé Blondelovy konstanty.

$$\hat{A} = \frac{\hat{I}_{2-1} \cdot \hat{U}_{1-2} - \hat{I}_{2-2} \cdot \hat{U}_{1-1}}{\det} \quad (3.19)$$

$$\hat{B} = \frac{\hat{U}_{1-2} \cdot \hat{U}_{1-1} - \hat{U}_{2-1} \cdot \hat{U}_{1-2}}{\det} \quad (3.20)$$

$$\hat{C} = \frac{\hat{I}_{2-1} \cdot \hat{I}_{1-2} - \hat{I}_{2-2} \cdot \hat{I}_{1-1}}{\det} \quad (3.21)$$

$$\hat{D} = \frac{\hat{I}_{1-1} \cdot \hat{U}_{2-2} - \hat{I}_{1-2} \cdot \hat{U}_{2-1}}{\det} \quad (3.22)$$

kde

$$\det = \hat{I}_{2-1} \cdot \hat{U}_{2-2} - \hat{I}_{2-2} \cdot \hat{U}_{2-1} \quad (3.23)$$

Vztahy pro výpočet podélné impedance a příčné admitance z Blondelových konstant

$$\hat{A} = 1 + 0,5 \cdot \hat{Y} \cdot \hat{Z} \quad (3.24)$$

$$\hat{B} = \hat{Z} \quad (3.25)$$

$$\hat{C} = \hat{Y}(1 + 0,25 \cdot \hat{Y} \cdot \hat{Z}) \quad (3.26)$$

$$\hat{D} = 1 + 0,5 \cdot \hat{Y} \cdot \hat{Z} \quad (3.27)$$

Odtud

$$\hat{Z} = \hat{B} \quad (3.28)$$

$$\hat{Y} = \frac{2(\hat{A} - 1)}{\hat{B}} \quad (3.29)$$

Přesnost této početní metody je velmi dobrá pro čistý ideální signál a přijatelná pro signál obsahující složku zkreslení, ovšem je stále velmi citlivá na náhodný šum a proto kalkulace reálného signálu nevrací spolehlivé výsledky. Celkově jsou výstupy z této metody použitelnější než v případě předchozí metody jednoho měření [11].

C. Vícenásobná měřicí metoda používající lineární regresi

Vícenásobná měřicí metoda používající lineární regresi vychází z předchozí metody dvojitého měření. Zaměříme se na rovnice (3.13) a (3.14) uvedené v předchozí metodě (jedná se o dvě komplexní rovnice o čtyřech neznámých). Vynásobením členů dojde k rozšíření na čtyři reálné rovnice, po oddělení reálné a imaginární složky členů (značeno $\text{Re}[\dots]$ a $\text{Im}[\dots]$) získáme následující soustavu rovnic

$$\text{Re}[\hat{U}_1] = \text{Re}[\hat{A}] \cdot \text{Re}[\hat{U}_2] - \text{Im}[\hat{A}] \cdot \text{Im}[\hat{U}_2] + \text{Re}[\hat{B}] \cdot \text{Re}[\hat{I}_2] - \text{Im}[\hat{B}] \cdot \text{Im}[\hat{I}_2] \quad (3.30)$$

$$\text{Im}[\hat{U}_1] = \text{Re}[\hat{A}] \cdot \text{Im}[\hat{U}_2] + \text{Im}[\hat{A}] \cdot \text{Re}[\hat{U}_2] + \text{Re}[\hat{B}] \cdot \text{Im}[\hat{I}_2] + \text{Im}[\hat{B}] \cdot \text{Re}[\hat{I}_2] \quad (3.31)$$

$$\text{Re}[\hat{I}_1] = \text{Re}[\hat{C}] \cdot \text{Re}[\hat{U}_2] - \text{Im}[\hat{C}] \cdot \text{Im}[\hat{U}_2] + \text{Re}[\hat{D}] \cdot \text{Re}[\hat{I}_2] - \text{Im}[\hat{D}] \cdot \text{Im}[\hat{I}_2] \quad (3.32)$$

$$\text{Im}[\hat{I}_1] = \text{Re}[\hat{C}] \cdot \text{Im}[\hat{U}_2] + \text{Im}[\hat{C}] \cdot \text{Re}[\hat{U}_2] + \text{Re}[\hat{D}] \cdot \text{Im}[\hat{I}_2] + \text{Im}[\hat{D}] \cdot \text{Re}[\hat{I}_2] \quad (3.33)$$

V maticovém zápisu

$$\begin{bmatrix} \text{Re}[\hat{U}_1] \\ \text{Im}[\hat{U}_1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re}[\hat{U}_2] & -\text{Im}[\hat{U}_2] & \text{Re}[\hat{I}_2] & -\text{Im}[\hat{I}_2] \\ \text{Im}[\hat{U}_2] & \text{Re}[\hat{U}_2] & \text{Im}[\hat{I}_2] & \text{Re}[\hat{I}_2] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{Re}[\hat{A}] \\ \text{Im}[\hat{A}] \\ \text{Re}[\hat{B}] \\ \text{Im}[\hat{B}] \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\begin{bmatrix} \text{Re}[\hat{I}_1] \\ \text{Im}[\hat{I}_1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re}[\hat{U}_2] & -\text{Im}[\hat{U}_2] & \text{Re}[\hat{I}_2] & -\text{Im}[\hat{I}_2] \\ \text{Im}[\hat{U}_2] & \text{Re}[\hat{U}_2] & \text{Im}[\hat{I}_2] & \text{Re}[\hat{I}_2] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{Re}[\hat{C}] \\ \text{Im}[\hat{C}] \\ \text{Re}[\hat{D}] \\ \text{Im}[\hat{D}] \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Pro N měření PMU vygenerují N sad synchronních fázorů. Pro výpočet definujeme následující pomocné matice (značení: \hat{U}_{2-1} první měření, \hat{U}_{2-N} N -té měření)

$$E = \begin{bmatrix} \text{Re}[\hat{U}_{2-1}] \\ \text{Im}[\hat{U}_{2-1}] \\ \vdots \\ \text{Re}[\hat{U}_{2-N}] \\ \text{Im}[\hat{U}_{2-N}] \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$F = \begin{bmatrix} Re[\hat{A}] \\ Im[\hat{A}] \\ Re[\hat{B}] \\ Im[\hat{B}] \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$$H = \begin{bmatrix} Re[\hat{U}_{2-1}] & -Im[\hat{U}_{2-1}] & Re[\hat{I}_{2-1}] & -Im[\hat{I}_{2-1}] \\ Im[\hat{U}_{2-1}] & Re[\hat{U}_{2-1}] & Im[\hat{I}_{2-1}] & Re[\hat{I}_{2-1}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Re[\hat{U}_{2-N}] & -Im[\hat{U}_{2-N}] & Re[\hat{I}_{2-N}] & -Im[\hat{I}_{2-N}] \\ Im[\hat{U}_{2-N}] & Re[\hat{U}_{2-N}] & Im[\hat{I}_{2-N}] & Re[\hat{I}_{2-N}] \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Estimací na principu metody nejmenších čtverců získáme rovnici pro výpočet Blondelových konstant \hat{A} a \hat{B}

$$F = [H^T H]^{-1} H^T E \quad (3.39)$$

Výpočet Blondelových konstant \hat{C} a \hat{D} bude proveden obdobně. Z rovnic (3.28), (3.29) a (3.39) se následně získají hodnoty \hat{Z} a \hat{Y} .

Tato metoda generuje velmi přesné fázorové odhady pro čistý ideální signál. Při existenci rušení a zkreslení v signálu je zjevné, že metoda pracuje výrazně spolehlivěji než předchozí dvě metody (viz testování na modelovém příkladu, uvedeno v [11], str. 5), konkrétně je výpočet velmi přesný pro zkreslený signál a méně přesný pro signál obsahující náhodné rušení (výpočet parametrů X a B sice dosahuje vysoké přesnosti, ovšem parametr R (parametr žádaný pro následný výpočet teploty a tedy klíčový pro přesnost a věrohodnost výstupů práce) dosahuje výrazně menší přesnosti, vyznačuje se citlivostí na náhodné rušení zvláště v napěťových vstupech).

Přesnost odhadovaných parametrů závisí na počtu navzorkovaných dat, přiměřenou vzorkovací frekvencí lze výrazně snížit chybu výpočtu (na výstupech z PMU je zpravidla dostupný průběh vzorkovaný dostatečnou frekvencí), platí zejména pro X a B . Problém s estimací činného odporu R z rušených napěťových vstupů nicméně přetrvává.

D. Vícenásobná měřicí metoda používající nelineární regresi

Vícenásobná měřicí metoda používající nelineární regresi vychází z první uvedené metody – metody jednoho měření. Následná soustava čtyř reálných rovnic vychází z kombinace rovnic (3.7), (3.8), (3.9) a (3.10) odvozené z π článku metodou smyčkových proudů a uzlových napětí a z jejich přepsání na reálné a imaginární části.

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}[\hat{U}_1] - R \cdot \operatorname{Re}[\hat{I}_1] + X \cdot \operatorname{Im}[\hat{I}_1] - \frac{1}{2} \cdot B \cdot R \cdot \operatorname{Im}[\hat{U}_1] - \\ - \frac{1}{2} B \cdot X \cdot \operatorname{Re}[\hat{U}_1] - \operatorname{Re}[\hat{U}_2] = 0 \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}[\hat{U}_1] - R \cdot \operatorname{Im}[\hat{I}_1] - X \cdot \operatorname{Re}[\hat{I}_1] + \frac{1}{2} \cdot B \cdot R \cdot \operatorname{Re}[\hat{U}_1] - \\ - \frac{1}{2} B \cdot X \cdot \operatorname{Im}[\hat{U}_1] - \operatorname{Im}[\hat{U}_2] = 0 \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\operatorname{Re}[\hat{I}_1] + \frac{1}{2} \cdot B \cdot \operatorname{Im}[\hat{U}_1] + \operatorname{Re}[\hat{I}_2] + \frac{1}{2} \cdot B \cdot \operatorname{Im}[\hat{U}_2] = 0 \quad (3.42)$$

$$\operatorname{Im}[\hat{I}_1] - \frac{1}{2} \cdot B \cdot \operatorname{Re}[\hat{U}_1] + \operatorname{Im}[\hat{I}_2] - \frac{1}{2} \cdot B \cdot \operatorname{Re}[\hat{U}_2] = 0 \quad (3.43)$$

Definujeme vektor měřených veličin x

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_7, x_8] \quad (3.44)$$

kde $x_1 = \operatorname{Re}[U_1]$, $x_2 = \operatorname{Im}[U_1]$, $x_3 = \operatorname{Re}[I_1]$, $x_4 = \operatorname{Im}[I_1]$, $x_5 = \operatorname{Re}[U_2]$, $x_6 = \operatorname{Im}[U_2]$,
 $x_7 = \operatorname{Re}[I_2]$, $x_8 = \operatorname{Im}[I_2]$

a dále vektor hledaných parametrů $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]$, kde $\theta_1 = R$, $\theta_2 = X$ a $\theta_3 = B$.

Dále definujeme funkce odvozené z rovnic (3.40) až (3.44) a z definice vektoru θ

$$f_1(x, \theta) = x_1 - \theta_1 \cdot x_5 + \theta_2 \cdot x_6 - \frac{1}{2} \cdot \theta_1 \cdot \theta_3 \cdot x_2 - \frac{1}{2} \cdot \theta_3 \cdot \theta_2 \cdot x_1 - x_3 \quad (3.45)$$

$$f_2(x, \theta) = x_2 - \theta_1 \cdot x_6 - \theta_2 \cdot x_5 + \frac{1}{2} \cdot \theta_1 \cdot \theta_3 \cdot x_1 - \frac{1}{2} \cdot \theta_2 \cdot \theta_3 \cdot x_2 - x_4 \quad (3.46)$$

$$f_3(x, \theta) = x_5 + \frac{1}{2} \cdot \theta_3 \cdot x_2 + x_7 + \frac{1}{2} \cdot \theta_3 \cdot x_4 \quad (3.47)$$

$$f_4(x, \theta) = x_6 - \frac{1}{2} \cdot \theta_3 \cdot x_1 + x_8 - \frac{1}{2} \cdot \theta_3 \cdot x_3 \quad (3.48)$$

Vektorová funkce pro N dostupných měření je definovaná následovně

$$F(x, \theta)^T = [f_1^1(x, \theta) \ f_2^1(x, \theta) \ f_3^1(x, \theta) \ \dots \ f_2^N(x, \theta) \ f_3^N(x, \theta) \ f_4^N(x, \theta)] \quad (3.49)$$

Složka náhodné chyby ε (uvažujeme s nulovou střední hodnotou a neznámým rozptylem) odtud

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1^1(x, \theta) \\ f_2^1(x, \theta) \\ f_3^1(x, \theta) \\ f_4^1(x, \theta) \\ \vdots \\ f_1^N(x, \theta) \\ f_2^N(x, \theta) \\ f_3^N(x, \theta) \\ f_4^N(x, \theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1^1 \\ \varepsilon_2^1 \\ \varepsilon_3^1 \\ \varepsilon_4^1 \\ \vdots \\ \varepsilon_1^N \\ \varepsilon_2^N \\ \varepsilon_3^N \\ \varepsilon_4^N \end{bmatrix} = F(x, \theta) + \varepsilon \quad (3.50)$$

Ve smyslu nejmenších čtverců lze pro řešení použít techniku nelineární regrese. Řešení lze získat iteračním procesem, v k -té iteraci jsou neznámé aktualizované dle následujících rovnic

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta\theta_k \quad (3.51)$$

$$\Delta\theta_k = (H^T H)^{-1} H^T [-F(x, \theta_k)] \quad (3.52)$$

$$H = \frac{\partial F(x, \theta)}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} \frac{f_1^1(x, \theta)}{\partial \theta_1} & \frac{f_1^1(x, \theta)}{\partial \theta_2} & \frac{f_1^1(x, \theta)}{\partial \theta_3} \\ \frac{f_2^1(x, \theta)}{\partial \theta_1} & \frac{f_2^1(x, \theta)}{\partial \theta_2} & \frac{f_2^1(x, \theta)}{\partial \theta_3} \\ \frac{f_3^1(x, \theta)}{\partial \theta_1} & \frac{f_3^1(x, \theta)}{\partial \theta_2} & \frac{3_1^1(x, \theta)}{\partial \theta_3} \\ \frac{f_4^1(x, \theta)}{\partial \theta_1} & \frac{f_4^1(x, \theta)}{\partial \theta_2} & \frac{f_4^1(x, \theta)}{\partial \theta_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{f_1^N(x, \theta)}{\partial \theta_1} & \frac{f_1^N(x, \theta)}{\partial \theta_2} & \frac{f_1^N(x, \theta)}{\partial \theta_3} \\ \frac{f_2^N(x, \theta)}{\partial \theta_1} & \frac{f_2^N(x, \theta)}{\partial \theta_2} & \frac{f_2^N(x, \theta)}{\partial \theta_3} \\ \frac{f_3^N(x, \theta)}{\partial \theta_1} & \frac{f_3^N(x, \theta)}{\partial \theta_2} & \frac{3_1^N(x, \theta)}{\partial \theta_3} \\ \frac{f_4^N(x, \theta)}{\partial \theta_1} & \frac{f_4^N(x, \theta)}{\partial \theta_2} & \frac{f_4^N(x, \theta)}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

kde θ_k, θ_{k+1} jsou vektory neznámých parametrů před a po k -té iteraci, $\Delta\theta_k$ je rozdíl vektorů (proměnná aktualizace) a H je Jakobián funkce $F(x, \theta)$. Iterační proces končí ve chvíli, kdy je $\Delta\theta_k$ menší než určená tolerance.

Výše popsaná iterační metoda pracuje spolehlivě pro čistý průběh (obdobně jako předchozí metody, chyba výpočtu dosahuje hodnoty $< 0,003\%$), s obdobnou přesností probíhá výpočet se vstupními daty obsahující zkreslení. V případě dat obsahujících náhodný šum došlo k nepřijatelným výsledkům u parametrů B a R , parametr X byl vypočten s přibližně stejnou přesností jako u čistého průběhu. Přesnost výpočtu činného odporu je citlivější na rušení v napěťových vstupech (podobně jako u předchozí metody, čerpáno z [11], str. 7).

TEORETICKÉ PŘEDPOKLADY – VLIV ŠUMU

Metody jednoho a dvojitého měření jsou výrazně citlivější na náhodné rušení a zkreslení

než metody využívající lineární a nelineární regresi, neboť neobsahují nástroje na proklad či filtraci dat. U těchto metod je tedy více než vhodné provést úpravu vstupních dat. Z teoretického rozboru předpokládáme, že náhodné rušení výrazně ovlivní vypočítané výsledky a proto se zaměříme na jeho eliminaci.

4. Monitorování teploty vedení

4.1. Teplota vodičů

Teplota vodiče přímo souvisí s průhybem vodičů vedení (vzáleností vodičů nad terénem) vlivem tepelné roztažnosti se při vyšší teplotě prodlužuje vodič, proto je důležité se touto veličinou zabývat. Malá změna délky vedení vyvolá značnou změnu průhybu \Rightarrow průhyb je značně teplotně závislý. Průhyb vodičů přesahující kritickou mez může způsobit ohrožení osob a majetku pod vedením, může vyvolat poruchy způsobené křížením se s jinými vedeními, s porostem pod vedením apod.

Z výše uvedených skutečností vychází koncepce dynamického zatěžování vedení, jedná se o zatěžování vedení přizpůsobené aktuálním povětrnostním podmínkám tak, aby vodič dosáhl právě dovolené teploty a nebyl překročen maximální průhyb vedení.

Teplota vodiče závisí na

- ohřevu způsobeným procházejícím proudem – Jouleovy ztráty
- ohřevu způsobeným slunečním zářením
- ochlazování vodiče větrem (závisí na rychlosti a směru proudění)
- teplotě okolí

$$t = f(i, A, v, s, t_{okoli}) \quad [A, W \cdot m^2, m \cdot s^{-1}, ^\circ, ^\circ C] \quad (4.1)$$

kde největší přímý vliv na teplotu vodiče má ochlazování prouděním větru.

Teplotu vodiče lze získat měřením či výpočtem.

4.1.1. Provozní teplota AlFe lan

Provozní teploty vodičů závisí na typu vodiče (materiál) a na režimu zatížení (ustálený stav, přechodný děj). Tyto teploty mohou v jednotlivých pracovních režimech nabývat různých maximálně přípustných hodnot dle normy ČSN EN 50341-3-19 [16].

T_d	dovolená provozní teplota – maximální teplota při normálním provozu
T_o	časově omezená nouzová provozní teplota
T_d	teplota při zkratu

Limitní teploty AlFe lan v různých pracovních režimech jsou uvedené v následující tabulce [16].

Tab. 2 – Maximální teploty AlFe lan [16]

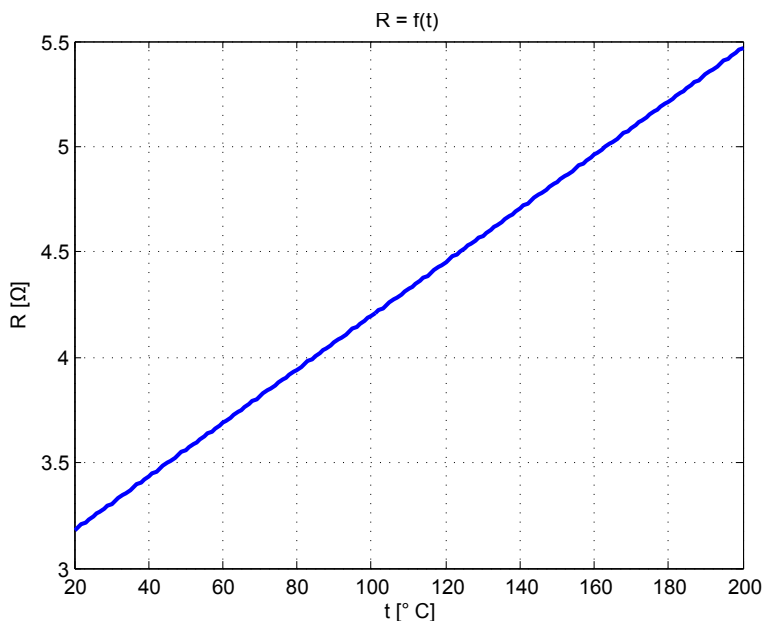
T_d [°C]	T_o [°C]	T_z [°C]
80	150	200

4.2. Monitorování teploty pomocí synchronních fázorů

Jedná se o monitorování na základě výpočtu průměrných teplot. Podélný činný odpor je funkcí aktuální průměrné teploty vedení ([18], str.3), teplotní koeficient odporu α je daný materiálem vodičů a pro dané vedení je neměnný v čase. Průběh křivky $R = f(t)$ lze naměřit experimentálně, křivka musí odpovídat danému vedení. Při znalosti činného odporu, jeho změny a koeficientu α je známý údaj o aktuální průměrné teplotě vedení a můžeme stanovit její průběh ([18], str.4).

$$R_t = R_{20}(1 + \alpha \Delta t) \quad (4.2)$$

Výše uvedený vzorec vyjadřuje lineární aproximaci reálné závislosti $R = f(t)$, která je pro potřeby výpočtu teploty v této práci dostatečně přesná. R_t jsou hodnoty získané výpočtem impedance pomocí synchrofázorů napětí a proudů měřených na obou koncích přenosového vedení dle metod uvedených výše, při znalosti parametrů α , R_{20} a t_{20} je hledanou neznámou aktuální průměrná teplota vedení t_A .



Obr. 17 – Závislost činného odporu na teplotě vodiče (model skutečného vedení linky 400 kV s AlFe lany – lineární aproximace)

4.3. Monitorování teploty vedení dalšími metodami

Teploty venkovních vedení lze měřit různými způsoby – metodami kontaktními, bezkontaktními, přímými nebo nepřímými nebo lze teploty dopočítat z jiných měřených parametrů.

Zejména při vyhodnocování je třeba si uvědomit, že výstupem metod mohou být různé údaje o teplotě – jsou to teploty průběžné, místní či průměrné, teplota může být vyhodnocována na povrchu vodiče a měření mohou být kontinuální nebo okamžité, mohou mít odlišnou přesnost a spolehlivost výstupních dat.

Nejrozšířenější metody sledování teploty přenosových vedení

- *kontaktní metoda* – jedná se o přímou metodu měření místní teploty pomocí senzorů. Tato metoda je přesná a spolehlivá, nevýhoda je nutnost instalace měřících zařízení na vedení (pro získání informace o průměrné teplotě je třeba instalovat měření na více místech) a údržba těchto zařízení. Přímé měření je vhodné pro trvalý kontinuální monitoring teploty vedení. Zařízení pro přímé měření teploty může být kombinováno se simultánním měřením protékajícího proudu, viz následující obrázek [28].



Obr. 18 – Zařízení pro kontinuální měření teploty vodiče a proudu (obchodní název OTLM) [28]

- *výpočet ze známých údajů o zatížení a povětrnostních podmínkách pomocí teplotních modelů* – do tepelného modelu vstupují následující údaje získané z meteorologických stanic: rychlost proudění vzduchu a úhel proudění vůči vedení, okolní teplota, sluneční záření a rovněž aktuální proudové zatížení. Dále mohou do modelu vstupovat údaje o námraze a vlhkosti vzduchu. Za předpokladu znalosti všech uvedených dat (získaných měřeními z meteorologických stanic umístěných na stožárech vedení nebo interpolací údajů z blízkých meteorologických stanic) je výpočet poměrně přesný a je vhodný pro trvalé monitorování teploty.
- *monitorování teploty přes měření mechanického napětí* – měřící systém monitoruje mechanické napětí na obou stranách sekce vedení, z něho vyhodnocuje aktuální průhyb (s přesností 3-6 cm) a průměrnou teplotu vodiče. Měřící jednotka je instalovaná na konstrukci stožáru, je napájena ze solárních panelů, obsahuje dvě buňky pro monitorování mechanického napětí a senzor pro měření okolní teploty. Průměrná teplota vodiče je dopočtena z dynamického teplotního modelu, do kterého

vstupují údaje o aktuálních povětrnostních podmínkách. Zařízení umožňuje přesné měření v reálném čase. Citováno z [31], [32].



Obr. 19 – Měření teploty založené na měření mechanického napětí, obchodní název CAT-1 [24]

- *termovize* – termovize je bezkontaktní měření teploty na povrchu vodiče. Jedná se o velmi rychlou metodu na principu měření elektromagnetického záření, které generují vodiče vedení a je snímáno a vyhodnoceno termovizní kamerou. Pro měření je nutno znát emisivitu měřeného objektu, tepelný snímek je okamžitě k dispozici. Přesnost měření a správnost měřených dat silně závisí na nastavení a užití zařízení. Termovizní kamera je přenosné zařízení – z čehož plyne velmi variabilní použití na libovolném vedení v libovolném čase. Jedná se o měření pouze snímaného úseku vedení a není vhodné pro trvalý monitoring teploty (zpravidla se používá pouze pro místní lokalizaci porušených částí zařízení, tzv. hotspots).
- *měření mechanických vlastních kmitů* → *průhyb, teplota* – zařízení pracuje na principu přímého měření průhybu vodiče založeném na měření vybrací vodiče (bez nutnosti znalosti dalších parametrů). Ze získaného průhybu (přesnost měření ± 20 cm) je dopočtena pomocí IEEE dynamického teplotního modelu aktuální průměrná teplota vodiče. Do dynamického modelu vstupují informace o aktuálních povětrnostních podmínkách a teplotě okolí, z čehož plynou možné nepřesnosti měření. Zařízení se instalují přímo na vodiče a jsou teoreticky bezúdržbová. Měření je vhodné pro kontinuální monitorování v reálném čase [30].



Obr. 20 – Měření teploty z údajů o průhybu vodiče, obchodní název Ampacimon [24]

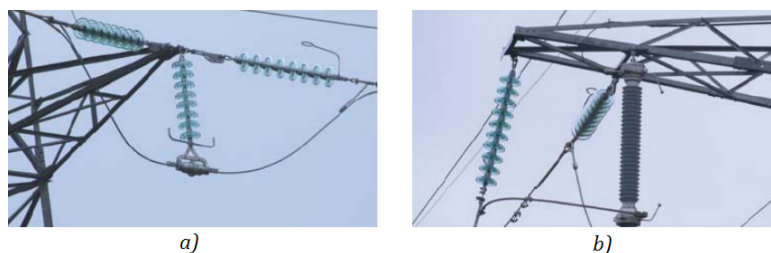
- *bezdrátové snímání teploty pomocí infračerveného záření* – jedná se o spolehlivou metodu měření teploty pomocí malých senzorů umístěných přímo na vedení. Metoda je vhodná pro kontinuální měření teploty, zařízení umožňují vzdálený přenos

dat, jsou napájena ze zabudované baterie a jsou teoreticky bezúdržbová po dlouhou dobu. Na obrázku níže je uvedený senzor vyvinutý švédskou TSO ve spolupráci s dalšími společnostmi [29].



Obr. 21 – Teplotní senzory Svenska Kraftnät [29]

- měření průběžné teploty odrazem v optických vláknech (*Distributed Temperature Sensing*) – slouží k monitorování teplotních profilů vedení (tzn. snímání teploty probíhá po celé délce vedení, nikoliv jen v určitých bodech). Princip metody spočívá v tom, že se do AIFe lan zabudují pasivní optická vlákna, do kterých je vysílán laserový paprsek, odražený paprsek je následně analyzován a dojde k vyhodnocení teploty a její lokace. Měření má řadu výhod – zachovává vysokou přesnost měření (pohybuje se v rozmezí $\pm 1\%$, danou teplotu dokáže měřící zařízení přiřadit s přesností na 1 m) i pro dlouhá vedení, měření je nezávislé a kontinuální a optická vlákna jsou prakticky bezúdržbová. Nevýhoda je právě nutnost instalovat do AIFe lan optická vlákna (použití je výhodné pro nově budovaná vedení nebo pro lana, která již obsahují optická vlákna). Zařízení je vhodné pro trvalé sledování teploty vedení.



Obr. 22 – Měření teploty odrazem v optických vláknech, obchodní název Valcap, a) přímá spojka, b) koncovka, zavěšení [24]

4.4. Přesnost výpočtu a problematika měření teploty

Měření teploty vedení je samo o sobě poměrně problematické, výsledný údaj ovlivňuje řada faktorů (umístění měřícího čidla a jeho tepelná časová konstanta, konvekční proudy, sálání okolních předmětů apod.) [26], čemuž odpovídá ve srovnání s jinými veličinami poměrně nízká přesnost. Je nutné určit, zda se jedná o teplotu průměrnou (teplota vedení

vypočítaná ze synchronních dat) nebo pouze teplotu daného místa vodiče (u vedení o délce několik desítek km mohou být teploty v jednotlivých místech vedení značně rozdílné). Rozdíl mezi teplotou na povrchu vodiče a vnitřní teplotou zanedbáme.

Výpočet teploty z činného odporu vedení je problematický, protože silně závisí na přesnosti vstupních dat – malá chyba způsobí velkou odchylku ve vypočítaných průměrných teplotách (hodnoty činného odporu dosahují poměrně nízkých hodnot – u delších vedení řádově jednotky Ω , proto i malá změna odporu vyvolá citelnou změnu vypočítané teploty, podrobně rozebráno v citlivostní analýze v následující kapitole). Ve výpočtu v následující kapitole budou porovnávány průměrné teploty vedení vypočítané odlišnými metodami, porovnány s průměrnými teplotami vedení získanými spolehlivější metodou a následně vyhodnoceny.

5. Sledování průměrných teplot konkrétního vedení v české přenosové soustavě

V následující kapitole bude proveden výpočet aktuálních průměrných teplot vybraného přenosového vedení 400 kV v české přenosové soustavě, pro výpočet budou použita reálná synchronní data naměřená v nedávné době (březen/2014) na vybrané přenosové lince. Výpočet bude proveden pro synchronizovaná data naměřená ve vybraném časovém intervalu. Získané hodnoty (R a průměrné teploty vedení) vypočítané pomocí jednotlivých metod porovnáme v souhrnných grafech společně s naměřenými teplotami vedení.

Na závěr provedeme diskuzi nad vhodností použití uvedených početních metod a také nad vhodností použití synchronních fázorů pro výpočet teploty vedení. Účelem výpočtu je ověření nebo vyvrácení teoretických předpokladů z předchozí kapitoly.

5.1. Popis vstupních dat

5.1.1. Synchronní měření fázorů napětí a proudů

Trojfázové synchronní měření napětí a proudů probíhá v 36 PMU nainstalovaných v 10 vybraných rozvodnách, jedná se o rozvodny Kočín, Přeštice, Chrást, Řeporyje, Hradec východ a západ, Slavětice, Sokolnice, Prosenice, Nošovice a Albrechtice (mapa viz Kapitola 2). Pro zpracování diplomové práce jsou k dispozici data naměřená v těchto rozvodnách v časovém rozmezí podzim 2013 - současnost ve formátu CSV. Měření probíhá na různě dlouhých linkách z obou stran vedení nebo pouze jednostranně.

Datové soubory mohou obsahovat *datum*, *časové značky*, *status vedení*, *trojfázové měření fázorů napětí a proudů* (dané efektivními fázovými hodnotami + fázovými úhly, kde libovolný úhel v měřené soustavě můžeme nastavit jako referenční a zbylé úhly budou vztahované k referenčnímu (referenční úhel = 0°)), *frekvenci*, *derivaci frekvence* – výběr dat ze systému je velmi variabilní a lze vybírat pomocí filtrů pouze fázorová data sledovaných fází pro vybrané časové úseky. Měření fázorů probíhá kontinuálně, PMU generují 50 fázorových odhadů za vteřinu (délka datového okna není známá). Další dostupné údaje jsou činný a jalový výkon v měřených bodech, tyto hodnoty ovšem PMU přímo neměří (jsou dopočítány v centrálním serveru).

Pro účel výpočtu průměrných teplot vedení v této práci byly vybrány následující údaje: datum, časové značky a trojfázové měření fázorů napětí a proudů probíhající ve stejném okamžiku. Údaje o aktuální frekvenci a derivaci frekvence jsou pro účely výpočtu nepodstatné.

Přesnost měření synchronních fázorů je následující: přesnost měření v PMU odpovídá $TVE < 0,5\%$ (platí pro rozsah 50–120% měřené veličiny) a rovněž přesnost celého měřicího řetězce (MTN a MTP, kabely, PMU, PDC) splňuje podmínku $TVE < 0,5\%$. Přenos synchronizovaných dat probíhá po optických kabelech.

Dále předpokládáme, že naměřená synchronní data jsou reálná a obsahují určité procento náhodného šumu a zkreslení, což zohledníme při hodnocení vypočítaných výstupů a rovněž při návrhu filtrace dat.

5.1.2. Měření teploty vedení

Monitorování teplot vedení se v české přenosové soustavě začalo realizovat poměrně nedávno primárně z důvodu přetěžování konkrétních linek přetoky výkonu ze sousedních zemí. Z tohoto důvodu byl zahájen projekt experimentální měření nejdříve na několika přeshraničních linkách 400 kV a 220 kV (hranice s Německem a Polskem) a poté se rozšířilo i na další linky. V současné době se monitorování teploty využívá k dynamickému zatěžování vedení.

Sledování teploty se v české přenosové soustavě se provádí několika způsoby. Nejrozšířenější metodou monitorování teploty je *dopočet teplot z měřených meteorologických údajů*. Výhoda měření je ta, že ji lze využívat plošně na území celé republiky (meteorologické stanice pro sledování povětrnostních podmínek ČHMÚ jsou hustě a poměrně rovnoměrně rozmístěné. ČHMÚ je schopen interpolovat naměřené teploty na místo a nadmořskou výšku – na stožárové místo). Nevýhoda je nižší spolehlivost a přesnost (oproti přímému měření teploty obsahuje měření výkyvy a skoky, viz srovnávací graf v další části kapitoly), která je ovšem v přijatelných mezích. V současné době se tato metoda využívá jako nástroj k dynamickému zatěžování vedení podle aktuálních meteorologických a zátěžových podmínek. Na několika vybraných stožárech byly nainstalovány experimentální meteorologické stanice.

Další metoda je *přímé měření teploty*. Na vybraných vedeních byla nainstalována měření (zařízení od EGÚ Brno, a.s., Západočeské univerzity v Plzni, CIGRE), měření probíhá kontinuálně a teploty se vyhodnocují ve společných záznamech. Výhoda měření je spolehlivost a poměrná přesnost, značná nevýhoda je nutnost instalace měřícího zařízení na dané vedení a jeho případná údržba, z tohoto důvodu se jedná pouze o experimentální měření na několika málo vybraných vedeních a s plošným rozšířením na další vedení se nepočítá.

Další testovaná metoda je měření *průběžné teploty odrazem paprsku v optických vláknech* (obchodní název Valcap). Výhoda této metody je vysoká přesnost měření teploty i lokace teploty, měření jde provádět kontinuálně, nevýhoda je nutnost zabudovat do ALFe lan pasivní optická vlákna (lze použít, pokud již lana obsahují vlákna instalovaná k jinému účelu). Jedná se o pokusné měření a širší použití nelze v brzké době očekávat.

Posledním způsobem je měření teploty vedení pomocí *termovizní kamery*. Při správném nastavení a použití kamery se jedná o poměrně přesnou metodu měření. Jedná se o přenosné zařízení a nepoužívá se k dlouhodobému monitorování teplot na vybrané lince, ale spíše k vyhledávání poškozených nebo degradovaných částí stožárů/vedení. Výhoda je, že lze použít na libovolnou linku v libovolném čase bez nutnosti instalace dalších zařízení.

5.1.3. Parametry vedení

Parametry vedení potřebné pro výpočet získáme z konstrukčních tabulek vedení či ALFe lan danými výrobcem nebo určenými měřeními na vedení.

5.2. Volba vedení

Pro výpočet podélné impedance je nutné oboustranné trojfázové měření napětí a proudů. Dále je třeba zvážit chybu výpočtu, která souvisí s délkou vedení – u krátkých vedení předpokládáme větší chybu měření způsobenou šumem v měřených datech.

Na několika vybraných vedeních probíhá měření teploty metodami popsány výše, což využijeme pro vyhodnocení vypočítaných dat a v závěru provedeme srovnání naměřených a vypočtených výstupů.

Pro výpočet je třeba zvolit vedení, která splňují tyto podmínky

- vedení, na kterých probíhá oboustranné synchronní měření fázorů napětí a proudů
- vedení, na kterých jsou přístupná měření teploty jinými metodami – ideálně musí probíhat měření na několika místech vedení (pro získání průměrné teploty a tím i zpřesnění výpočtu)
- vedení přibližně průměrné délky (extrémně dlouhé či krátké vedení je méně vhodné)

Tab. 3 – Vedení 400 kV s oboustranným synchronfázorovým měřením

označení vedení	V435	V436	V413	V475	V430	V431	V412
-----------------	------	------	------	------	------	------	------

Tab. 4 – Vedení 400 kV s měřením teploty

označení vedení	V412	V443	V444
počet měřících bodů na vedení	3 ks	1 ks	2 ks

Všechny podmínky splňuje **vedení V412**. Jedná se o problematické vedení na hladině 400 kV, které bývá nárazově extrémně namáhané přetoky výkonu generovaného větrnými farmami v Německu a protékající přes Českou republiku do okolních soustav. Vedení je jednoduché, starší konstrukce, z těchto důvodů zde bylo nainstalované experimentální měření teploty. Jedná se o tři meteostanice v kombinaci s přímým měřením teploty vodiče nainstalované na stožárech S31, S31 a S250.

Měření synchronfázorů probíhá oboustranně – data jsou generovaná PMU nainstalovanými v terminálech v rozvodnách Hradec východ a Řeporyje.

Mapa s vyznačeným vedením V412 a vyznačenými stožáry, na kterých probíhá měření teploty, je uvedena v Příloze č. 1. (převzato z [22] a doplněno).

5.3. Volba metody výpočtu

V teoretické části práce jsme rozebrali čtyři různé metody výpočtu podélné impedance vedení. Pro výpočet použijeme reálná data naměřená PMU instalovanými v rozvodnách, data odpovídají spíše krátkým vedením ($l < 150$ km) – tzn. předpokládáme, že data obsahují rušení a zkreslení, které nebude možné efektivně filtrovat.

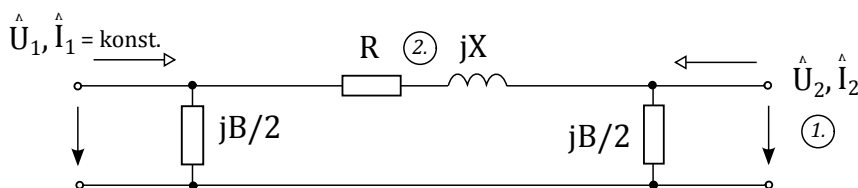
Z principu by bylo příhodné upustit od klasických prvních dvou metod výpočtu. Skutečný obsah rušení v synchronizovaných datech nám ovšem není dopředu známý, navíc

jsou první dvě metody poměrně triviální a s výhodou se používají v distribuční soustavě [18], proto na naměřená data aplikujeme postupně všechny uvedené metody a na závěr provedeme srovnání výsledných hodnot.

Předpokládáme, že přijatelné přesnosti výpočtu a získání relevantních výsledků dosáhneme aplikací metod, které částečně eliminují negativní vlivy náhodného rušení a zkreslení synchronních dat – jedná se o *vícenásobné měřicí metody využívající lineární a nelineární regresi*. Nicméně metody výpočtu popsané v předchozí kapitole byly implementované pouze na modelu vedení a nebyly již overeny na reálných synchronních datech, proto musíme zvážit možnost neočekávaných výsledků způsobených nedostatečnou přesností měřicího řetězce.

5.4. Citlivostní analýza přesnosti měřicího řetězce

Před samotnou aplikací vybraných početních metod na naměřená data je vhodné provést citlivostní analýzu a zvážit vliv chyby měření synchrofázorů napětí a proudů na vypočítaný činný odpor. Dále je vhodné provést diskuzi nad vlivem chyby činného odporu na výslednou průměrnou teplotu vedení. Tyto chyby zhodnotíme a určíme limitní hodnotu chyby měření, při přesahu této hodnoty se stane výpočet nepřesný a není vhodné ho reálně využívat. Tato analýza nám poslouží k závěrečnému zhodnocení výsledných veličin. Pro analýzu uvažujeme jednofázový model vedení vyjádřený pomocí π článku (podrobně popsáno v 3. kapitole).



Obr. 23 – Naznačení postupu citlivostní analýzy měření elektrických parametrů na modelu vedení π článku

5.4.1. Vliv chyby synchrofázorového měření na činný odpor

Při analýze vlivu chyby měření synchronních napětí a proudů postupujeme následovně

1. vstupní synchrofázory napětí a proudů \hat{U}_1 , \hat{I}_1 zafixujeme na konstantní hodnotě, která odpovídá vybranému vzorku naměřených synchrofázorů. Do výpočtu vložíme elektrické parametry R , X , B konkrétního vedení V412 (parametr G zanedbáme) a provedeme dopočet výstupních synchrofázorů napětí a proudů \hat{U}_2 , \hat{I}_2
2. vstupní synchrofázory napětí a proudů \hat{U}_1 , \hat{I}_1 ponecháme zafixované na konstantní hodnotě. Výstupní synchrofázory \hat{U}_2 , \hat{I}_2 budeme měnit (amplitudy, fázové úhly) a tím simulovat chybu měření měřicího řetězce, zároveň budeme sledovat změny elektrických parametrů vedení R , X , B
3. provedeme vyhodnocení vlivu změny amplitudy, úhlu fázorů \hat{U}_2 , \hat{I}_2 na výsledný činný odpor, zvolíme několik možných variant a vzájemně je porovnáme

Tab. 5 – Vybrané závislosti chyby činného odporu na chybě efektivní hodnoty měřených výstupních veličin U_2 , I_2

veličina	chyba ef. hodnoty [%]	chyba R [%]
U_2	0,1	31,5
U_2	1	313,1
I_2	0,1	0,2
I_2	1	1,6

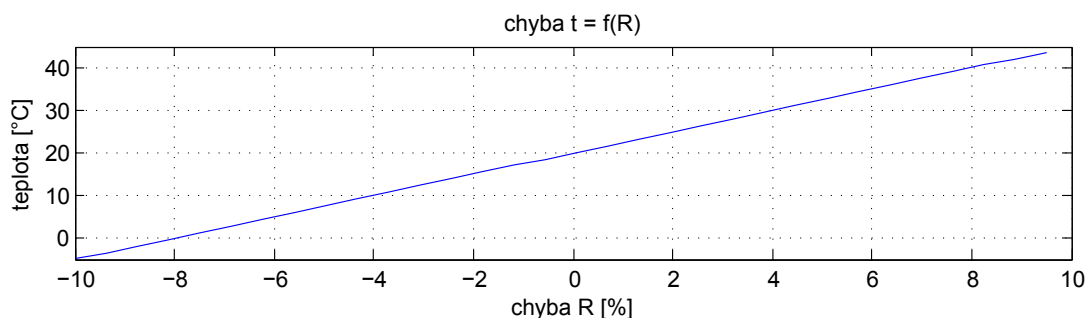
Tab. 6 – Vybrané závislosti chyby činného odporu na chybě úhlu měřených výstupních veličin U_2 , I_2

veličina	chyba úhlu [°]	chyba R [%]
U_2	0,1	23,2
U_2	1	235,6
I_2	0,1	1,2
I_2	1	11

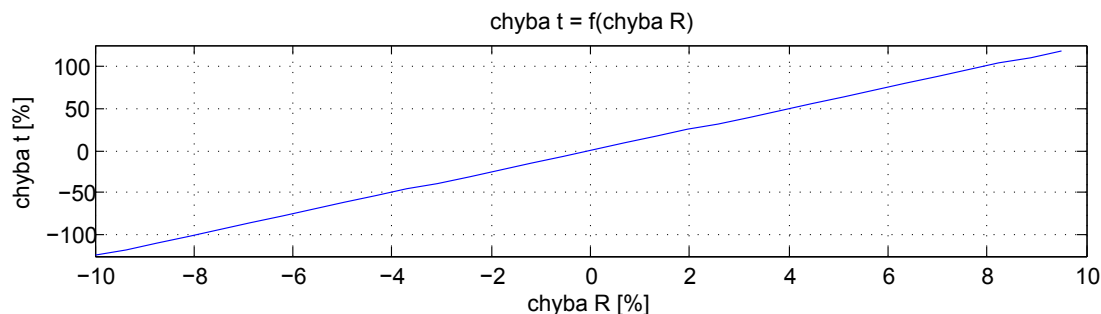
Z výše uvedených tabulek můžeme říci, že získaný činný odpor je závislý na přesnosti synchronizovaných dat vstupujících do výpočtu. Konkrétně je *silně závislý na chybě měření napětí* – již velmi malá chyba v měření efektivní hodnoty fázoru napětí způsobí významnou chybu ve výpočtu R , malá chyba v měření úhlu fázoru napětí způsobí rovněž významnou chybu výpočtu. Naproti tomu chyba v měření fázorů proudů se ve výsledném odporu neprojeví nijak výrazně (jinak je tomu ovšem při výpočtu podélné reaktance – zde se chyba v měření fázorů I významně projeví).

5.4.2. Vliv chyby činného odporu na průměrnou teplotu vedení

Citlivostní analýzu vlivu chyby výpočtu průměrné teploty vedení v závislosti na chybě činného odporu odvodíme ze vzorce (4.2) (lineární aproximace závislosti odporu na teplotě vedení). V následujících grafech je vynesena závislost teploty v [°C] a v [%] na chybě vypočítaného činného odporu v [%].



Obr. 24 – Závislost vypočtené teploty na procentní chybě činného odporu



Obr. 25 – Závislost procentní chyby vypočtené teploty na chybě činného odporu

Tab. 7 – Vybrané závislosti chyby teploty na chybě činného odporu

chyba R [%]	1	2,5	5	10
chyba t [%]	12,5	31,3	62,5	125
chyba t [°C]	2,5	6,25	12,5	25

Z uvedených výsledků je zřejmé, že již malá změna činného odporu vyvolá významnou změnu výsledné průměrné teploty vedení. Pro získání smysluplných hodnot průměrných teplot vedení, které by bylo možné využít pro řešení dynamického zatěžování vedení lze připustit chybu vypočítaného odporu maximálně $\pm 2,5 \%$ (což odpovídá toleranci získané teploty $\pm 31,3 \%$, tj. $\pm 6,25 \text{ °C}$). Při vyšší chybě výpočtu odporu lze získané hodnoty využít maximálně k vyhodnocení trendu (stoupání/pokles teploty), ale pro výpočet ampacity vedení nejsou vhodné.

5.5. Zpracování dat v MATLABu

Pro aplikaci výpočetních metod na vybraná data byl zvolen solver Mathworks Matlab ver. 7.9.0 (R2009b).

5.5.1. Vstupní data

Do výpočtu vstupují

- *datové soubory se synchrofázory* naměřenými v PMU instalovanými v rozvodně Hradec a Řeporyje (terminál HRA4-PMU02 a REP4-PMU01)
- *parametry vedení* získané z konstrukčních tabulek AlFe lan + konkrétní linky
- *místní teploty vedení* naměřené odlišnou metodou (jedná se o přímé měření teploty vodičů a výpočet teploty z údajů měřených v místní meteorologické stanici – měření probíhá na třech stožárech: S31, S51 a S250) → slouží pro ověření a porovnání výsledných hodnot

Datové soubory se synchronními fázory obsahují: datum, časové značky, efektivní fázové hodnoty, fázové úhly trojfázově měřených napětí a proudů na obou koncích vedení V412 ve formátu CSV. Data v souboru Hradec jsou uspořádána sloupcově v pořadí: datum, čas, status, efektivní fázová hodnota, fázový úhel (řazeno následovně – efektivní

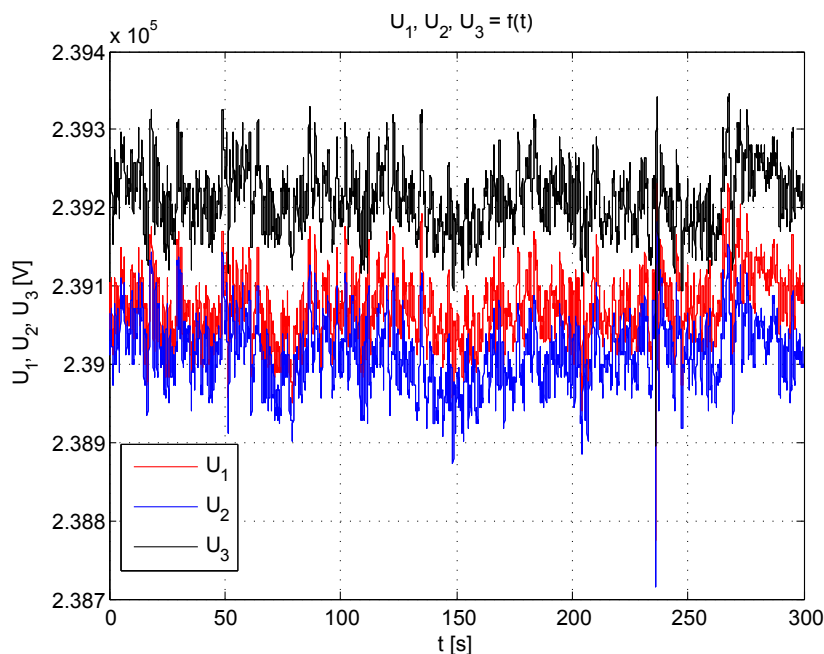
hodnota U_{L1} , úhel U_{L1} , ... efektivní hodnota U_{L3} , úhel U_{L3} , efektivní hodnota I_{L1} , úhel I_{L1} , ... efektivní hodnota I_{L3} , úhel I_{L3}). Data ze souboru Řeporyje jsou řazena obdobně, pouze synchronizace jsou řazeny následovně: U_{L3} , U_{L2} , U_{L1} , I_{L2} , I_{L1} , I_{L3} . Data z jednoho souboru jsou vykreslena v následujících grafech.

Pro výpočet jsme zvolili ustálený stav (důvody byly podrobně popsány v druhé kapitole), vybrali jsme konkrétní úsek měřený v dopoledních hodinách. Proudové zatížení linky se pohybuje kolem 15 %, směr toku výkonu je Hradec → Řeporyje.

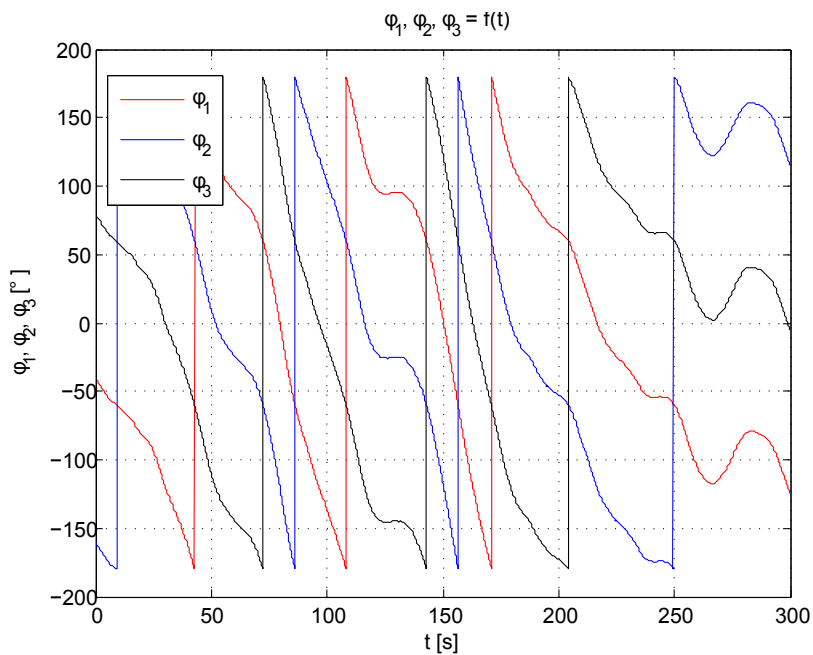
VOLBA TERMINÁLŮ A ČASOVÉHO ÚSEKU

- Terminál 1 (zvolený počátek vedení – parametry s indexem H): terminál v rozvodně Hradec východ
- Terminál 2 (koncový bod vedení – parametry s indexem R): terminál v rozvodně Řeporyje
- Datum měření: 30.3.2014
- Čas měření: 10:06:54.000 – 10:11:54.000, (úsek dlouhý 300 s, 15 000 vzorků synchronizovaných)

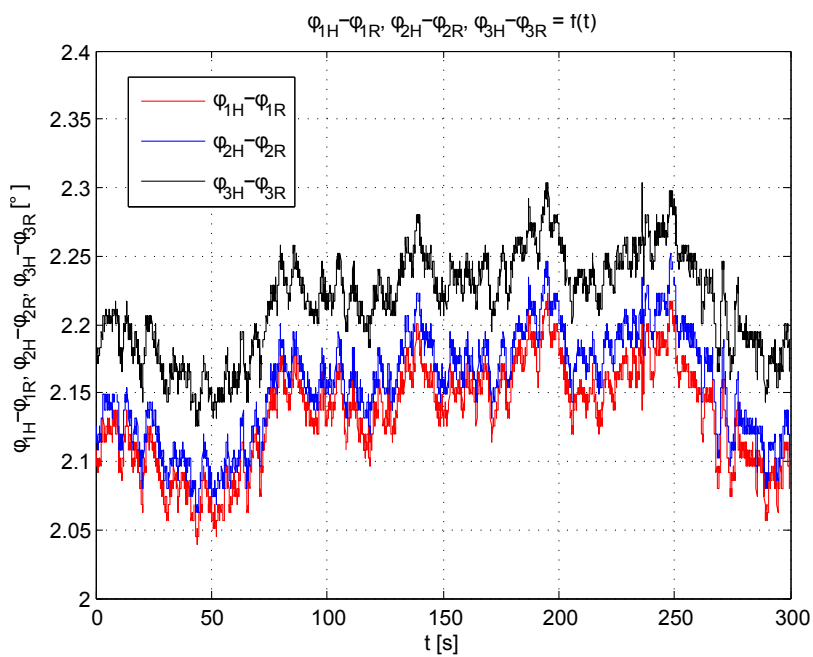
Na následujících grafech jsou vykreslena vybraná vstupní data – efektivní hodnoty napětí a proudů, úhly napětí a rozdíl úhlů napětí.



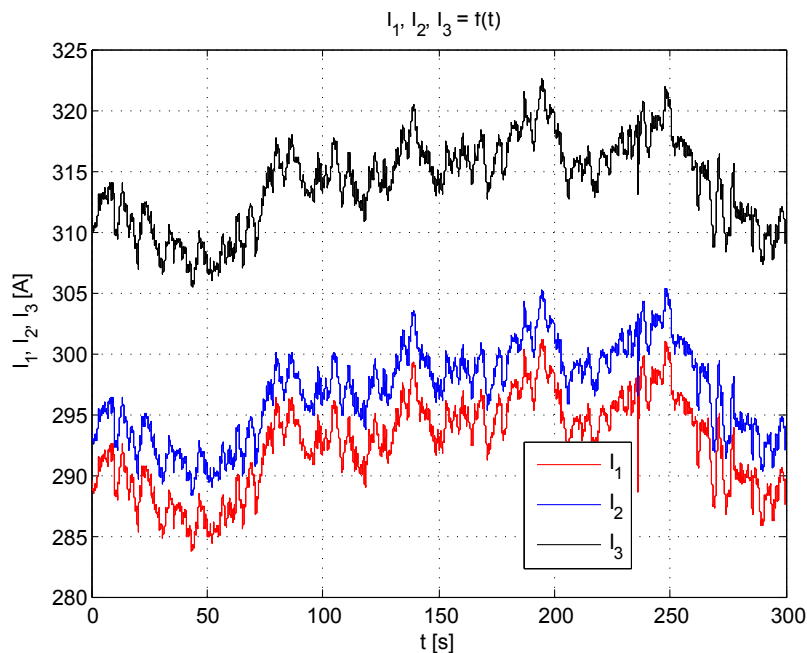
Obr. 26 – Závislost efektivních fázových hodnot napětí $U_1, U_2, U_3 = f(t)$ na sledovaném intervalu (terminál 1–Hradec)



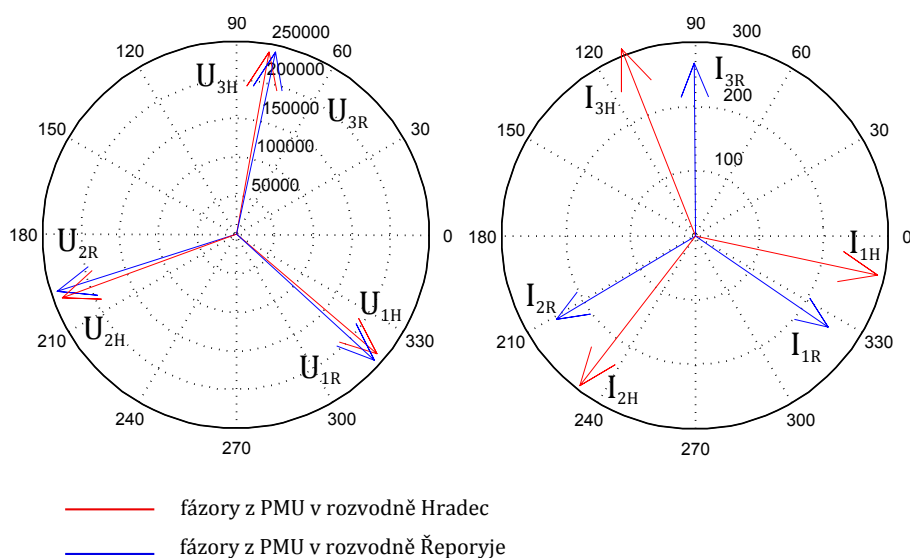
Obr. 27 – Průběh fázového úhlu $\phi = f(t)$ napětí U_1, U_2, U_3 na sledovaném intervalu



Obr. 28 – Rozdíl fázového úhlu $\Delta\phi = f(t)$ napětí U_1, U_2, U_3 na sledovaném intervalu



Obr. 29 – Závislost efektivních hodnot proudů $I_1, I_2, I_3 = f(t)$ na sledovaném intervalu (terminál 1-Hradec)



Obr. 30 – Zobrazení fázorů napětí a proudů v komplexní rovině (vzorek č.1)

PARAMETRY VEDENÍ (zdroj: konstrukční tabulky společnosti ČEPS a.s.)

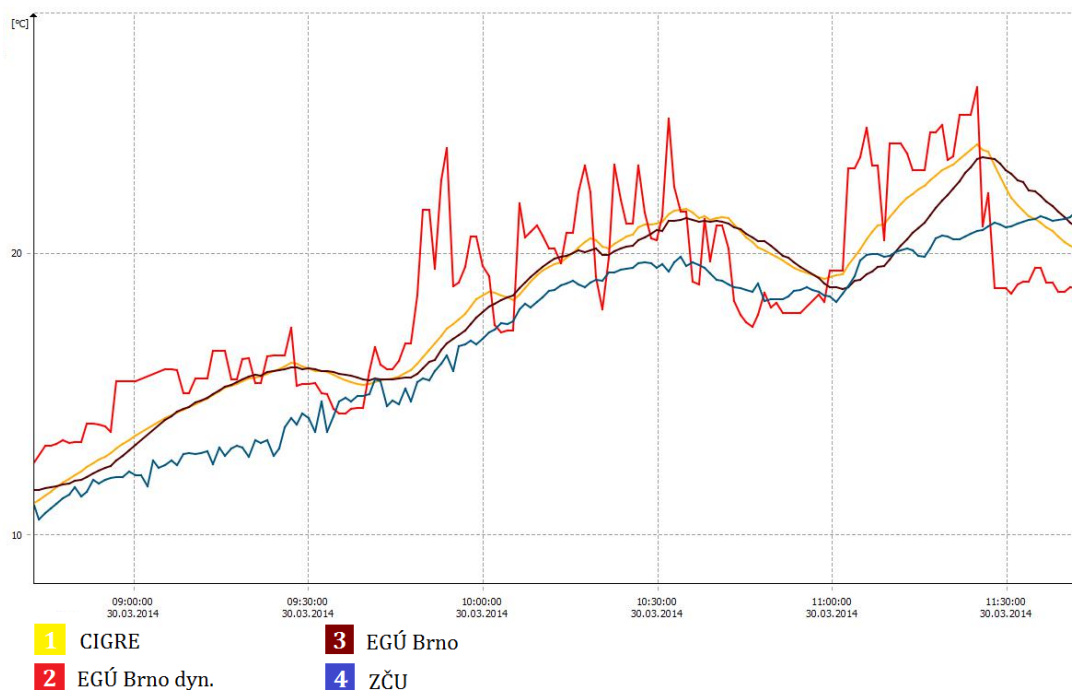
- lano 3 x AlFe 350/59, 3 svazek
- $R_1 = 3,17 \Omega$ (1 fáze) při 20°C
- $X_1 = 35,1 \Omega$ (1 fáze) při 20°C

- $B_1 = 513 \mu S$ (1 fáze) při $20^\circ C$
- $R_{DC} = 81,6 m\Omega \cdot km^{-1}$ při $20^\circ C$
- $\alpha = 0,004 \Omega \cdot ^\circ C$
- $l = 116,9 km$
- $t_{Nlana} = 80^\circ C$ (dovolená teplota konstrukce vedení a vodičů)
- $I_N = 2010 A$

MĚŘENÍ TEPLOTY VEDENÍ

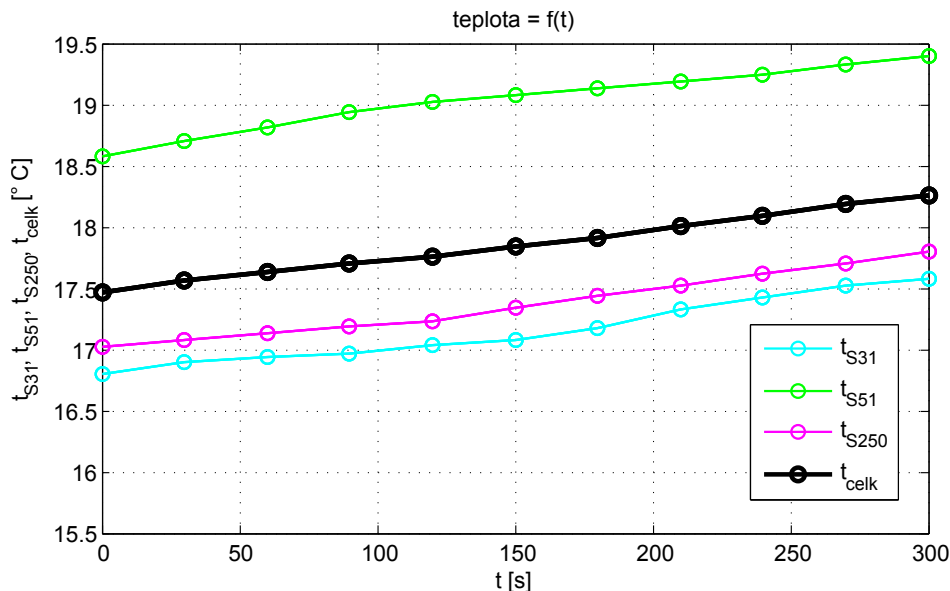
Jak již bylo uvedeno, na třech vybraných stožárech jsou instalovaná přímá měření teploty a provozní meteorologické stanice generující podklady pro výpočet pomocí tepelných modelů. Měřicí stanoviště jsou rozmístěná poměrně rovnoměrně vzhledem k celkové délce vedení (zakresleno v Příloze č.1) a lze z nich vypočítat průměrnou teplotu vedení. Všechna data jsou získávána kontinuálně, zobrazována na společném záznamu a archivována. Pro účely této práce jsme získali data naměřená ve sledovaném úseku.

Na následujícím grafu je zobrazeno porovnání měření a datových modelů teplot vedení na stožáru S51 v delším časovém úseku. Ve srovnávacím grafu jsou křivky 1, 3, 4 poměrně hladké, jedná se o zobrazení přímého měření teploty, tato měření jsou poměrně přesná a spolehlivá a proto budou použita pro následující výpočet. Křivka 2 zobrazující hodnoty dopočítané z tepelného modelu obsahuje značné skoky a místní nepřesnosti, z tohoto důvodu nebude zahrnuta do výpočtu.



Obr. 31 – Porovnání měření a vypočtu teplot vedení z modelu– stožár S51

Průběhy snímané na stožárech S31 a S250 jsou obdobné, naměřené teploty se v jednotlivých měřicích bodech mírně liší. Z křivek 1, 3, 4 postupně vypočítáme průměrnou teplotu měřicího místa S31, S51 a S250 (porovnávající grafy pro konkrétní časový interval obsahující křivky 1 až 4 pro všechny tři stožáry jsou uvedeny v Příloze č.2).



Obr. 32 – Porovnání průměrných teplot měřených na stožárech S31, S51 a S250 a celkové průměrné teploty vedení V412 zobrazené ve sledovaném časovém úseku

Na výše uvedeném grafu jsou zobrazeny časové závislosti průměrných teplot naměřených na stožárech S31, S51 a S250. Z těchto údajů následně získáme průměrnou teplotu vedení V412 (černá křivka), kterou porovnáme s údaji vypočítanými ze synchronních fázorů v závěru práce.

5.5.2. Filtrace, prokládání dat

ZHODNOCENÍ ŠUMU V REÁLNÝCH SYNCHRONNÍCH DATECH

- *efektivní hodnoty proudů*: naměřené efektivní hodnoty proudů obsahují šum, který se pohybuje v pásmu $\pm 2,5 \text{ A}$, tj. přibližně $\pm 1 \%$ (viz graf $I_1, I_2, I_3 = f(t)$ uvedený v této kapitole)
- *efektivní hodnota napětí*: naměřené hodnoty napětí obsahují šum, který se pohybuje v pásmu přibližně $\pm 240 \text{ V}$, tj. přibližně $\pm 0,1 \%$ (viz graf $U_1, U_2, U_3 = f(t)$ uvedený v této kapitole)
- *fázový úhel*: navzdory teoretickým předpokladům (předpokládali jsme ostré „skoky“, viz [11]) jsou časové závislosti fázového úhlu poměrně hladké a filtrace není teoreticky nutná

Naměřená synchronní data již prošla určitou filtrací při kalkulaci uvnitř PMU. Přesto data obsahují šum, který výrazně ovlivní výpočet elektrických parametrů vedení (šum v synchronních fázorech napětí ovlivní zejména přesnost vypočítaného činného odporu, šum v synchronních fázorech proudů ovlivní zejména kapacitní susceptanci). Jedná se o nezanedbatelnou složku, proto provedeme vyhlazení křivek vstupních dat či filtraci ve snaze dosáhnout zpřesnění výsledku. Filtrovaná data použijeme pro výpočet a provedeme diskuzi nad vlivem filtrace na výstupní hodnoty.

Filtrace dat teoreticky výrazně ovlivní výpočet činného odporu pomocí prvních dvou metod, které jsou triviální a neobsahují žádnou regresi.

5.5.3. Výpočet průměrné teploty vedení

Z konstrukčních tabulek AlFe lan vedení jsou známé hodnoty R_{DC} a R_1 při $20\text{ }^\circ\text{C}$, l a α . Pro výpočet zvolím R_{DC} – činný stejnosměrný odpor 1 lana na 1 km vedení, ze kterého získám přepočtem na délku vedení a zohledněním trojsvazku konstantu R_{20} (přesnější hodnota než udaný R_1).

$$R_{20} = \frac{R_{DC}}{3} l \quad (5.1)$$

Do výpočtu teploty potom vstupují známé konstanty a proměnné:

- $t_N = 20\text{ }^\circ\text{C}$ (jmenovitá teplota)
- $R_{20} = 3,1797$ (jmenovitý činný odpor 1 fáze)
- R (aktuální podélný činný odpor 1 fáze)

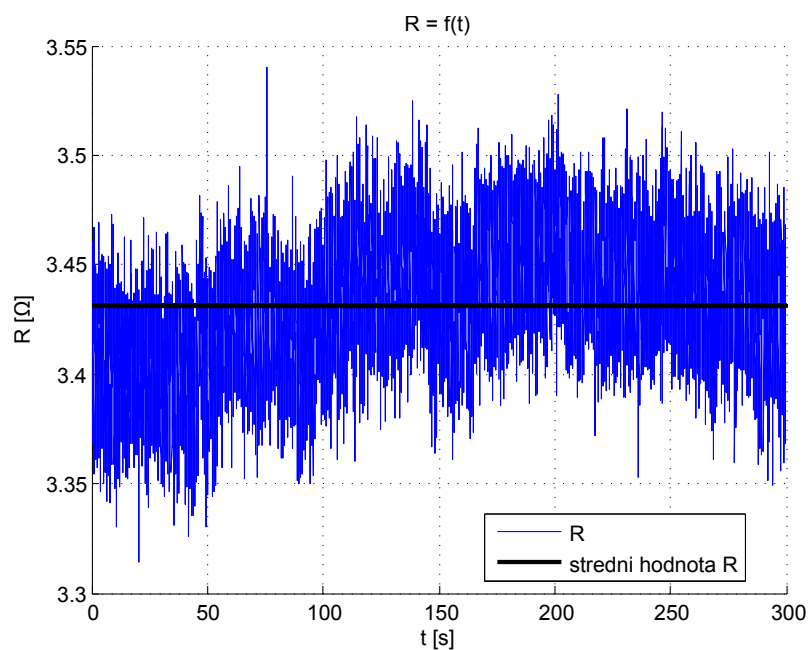
Průměrná aktuální teplota lana je

$$t_A = t_N + \frac{\frac{R}{R_{20}} - 1}{\alpha} \quad (5.2)$$

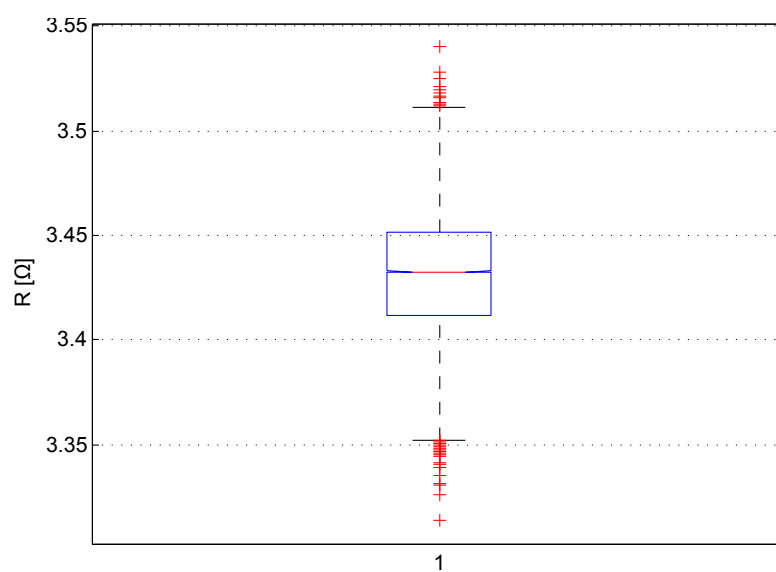
Do vzorce byly postupně dosazeny časové závislosti činných odporů vypočítaných pomocí dále uvedených metod.

5.5.4. Výpočet činného odporu vedení pomocí metoda jednoho měření

Metoda jednoho měření byla aplikována na vstupní synchronní data ze všech tří fází, pro vyhodnocení jsme vybrali hodnoty vypočtené v 2. fázi, výpočet ve zbylých fázích generuje obdobné křivky. V následujícím grafu je zobrazena časová závislost činného odporu vedení (2. fáze) získaného výpočtem a střední hodnota odporu.

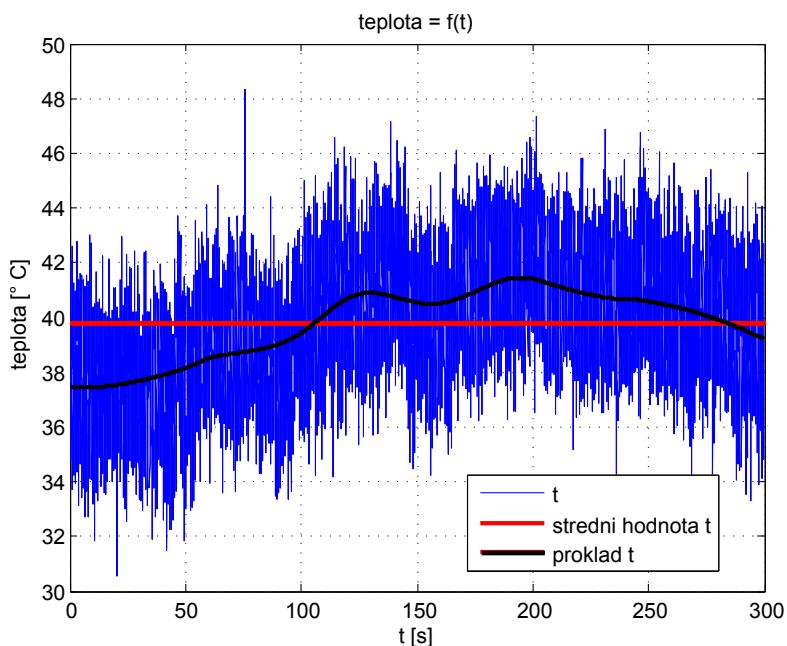


Obr. 33 – Zobrazení časové závislosti vypočítaného činného odporu 2. fáze

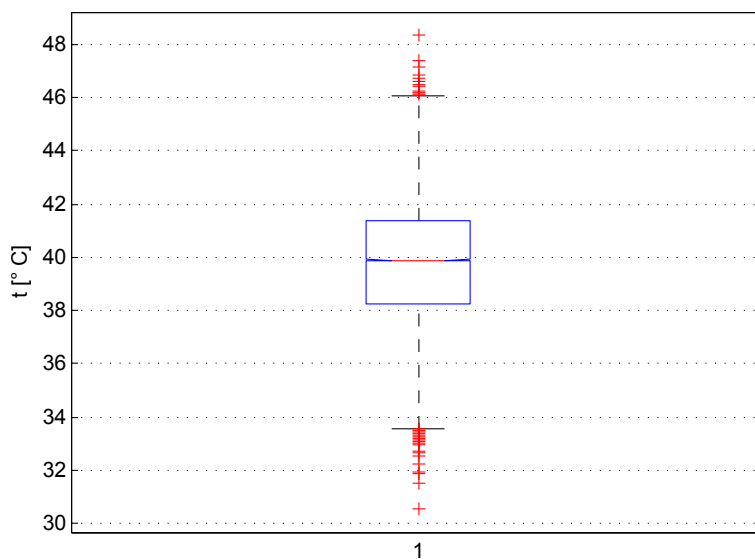


Obr. 34 – Boxplot – vypočítaný činný odpor, 2. fáze

V následujícím grafu je vynesena časová závislost vypočítané průměrné teploty vedení, střední hodnota této závislosti a vyhlazená křivka v daném časovém úseku. Dále je zobrazen boxplot vypočítané křivky.



Obr. 35 – Zobrazení časové závislosti vypočítané teploty 2. fáze

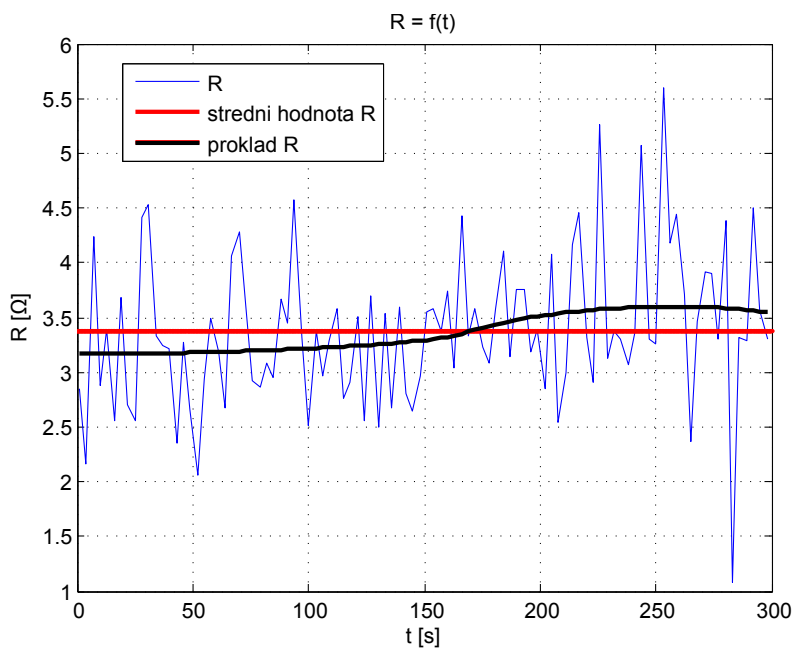


Obr. 36 – Boxplot – vypočítaná průměrná teplota, 2. fáze

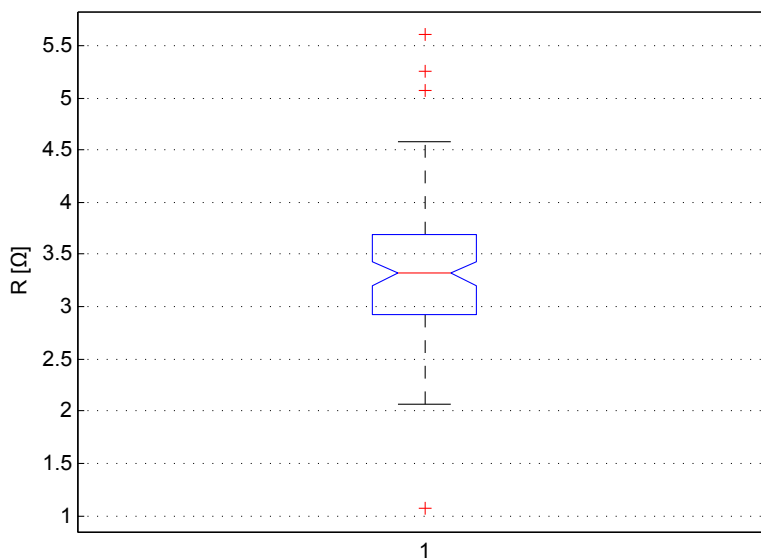
5.5.5. Výpočet činného odporu vedení pomocí metody dvojitého měření

Kalkulace činného odporu pomocí metody dvojitého měření generuje nesmyslné výsledky, což je buď způsobeno chybou ve výpočtu, kterou se pohnuž nepodařilo odstranit, nebo použitím nesprávných vstupních dat (v popisu metody bylo uvedeno, že mají vstupovat do výpočtu hodnoty naměřené při rozdílných zátěžových podmínkách, ovšem nic bližšího o těchto podmínkách autor nevedl). Proto nebudou tyto výsledky zahrnuty do závěrečného zhodnocení.

5.5.6. Výpočet činného odporu vedení pomocí vícenásobné měřicí metody používající lineární regresi



Obr. 37 – Zobrazení časové závislosti vypočítaného činného odporu

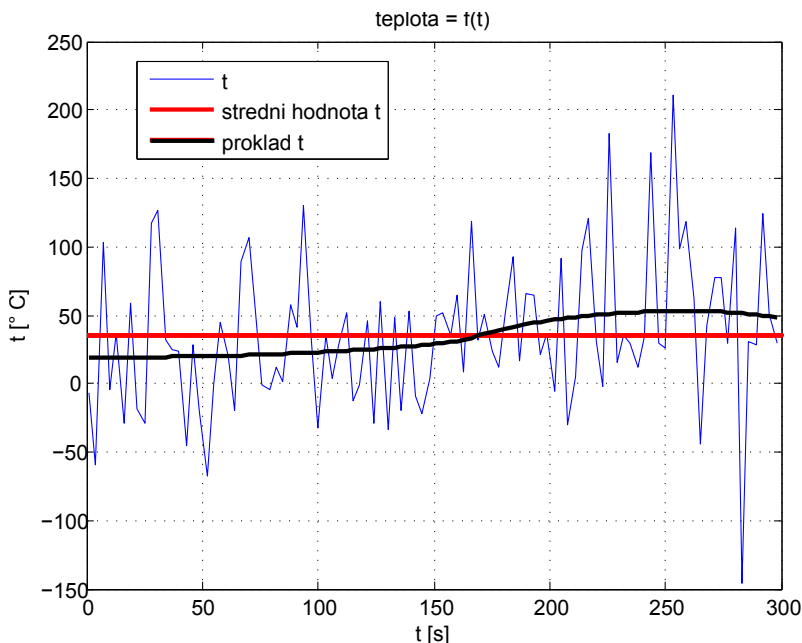


Obr. 38 – Boxplot – vypočítaný činný odpor

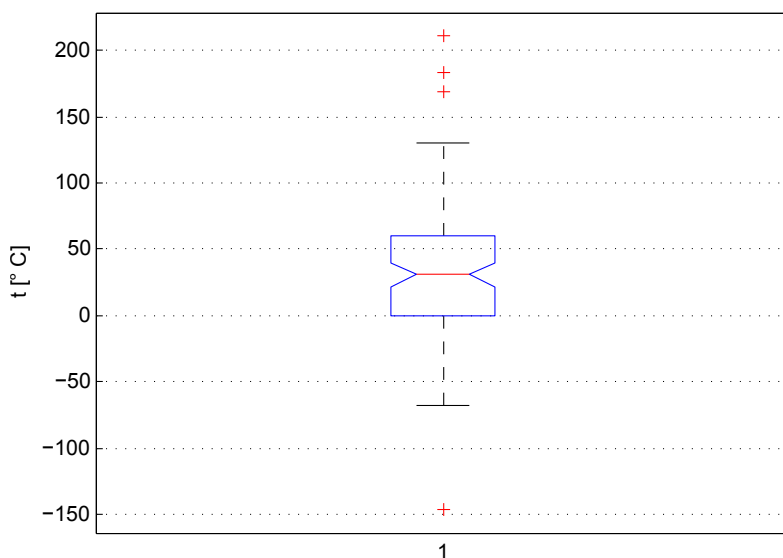
Pomocí vícenásobné měřicí metody používající lineární regresi byl proveden výpočet činného odporu ve třech fázích. Vypočtené křivky se mírně odlišují (při srovnání je zřejmý posun jednotlivých křivek), metoda je zřejmě citlivá na velikost vstupních synchronních

dat. Pro posouzení teploty vedení bylo provedeno zprůměrování těchto křivek, výpočet byl aplikován na jednotlivé intervaly pro získání trendu křivky (měřený úsek 300 s byl rozdělen na 100 intervalů), křivka $R = f(t)$ je vynesena na předchozím grafu a doplněna o přímku odpovídající průměrné hodnotě a vyhlazenou křivkou.

V následujícím grafu je vynesena časová závislost vypočítané průměrné teploty vedení, střední hodnota této závislosti a vyhlazená křivka v daném časovém úseku. Dále je zobrazen boxplot vypočítané křivky.



Obr. 39 – Zobrazení časové závislosti vypočítané teploty

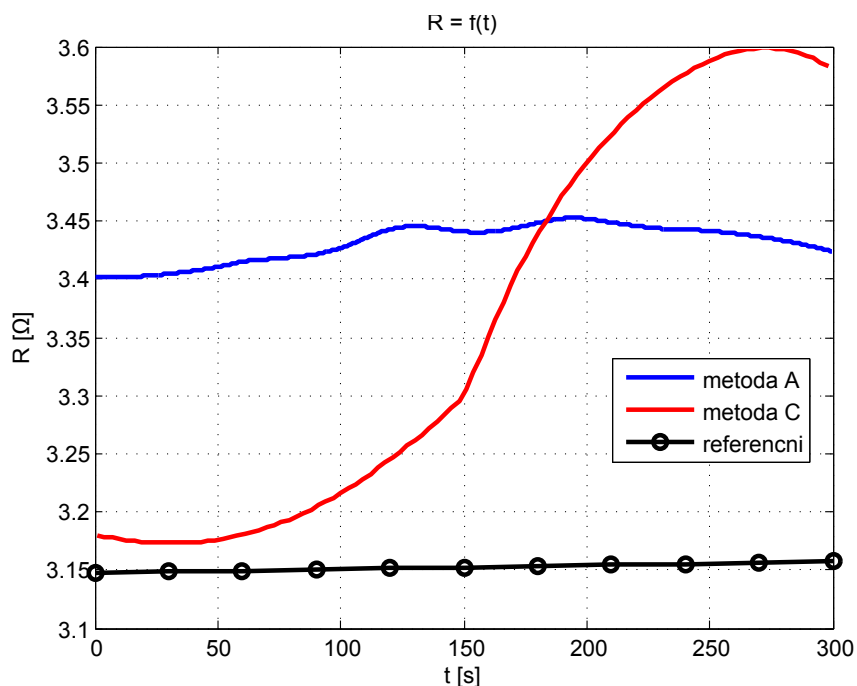


Obr. 40 – Boxplot – vypočítaná průměrná teplota

6. Vyhodnocení výstupních dat

6.1. Získané podélné činné odpory vedení

V následujícím grafu jsou porovnány časové závislosti činných odporů získaných výpočtem pomocí různých metod (jedná se o vyhlazení skutečných vypočítaných křivek).



Obr. 41 – Porovnání průměrných činných odporů získaných pomocí metod A, C a přímého měření teploty

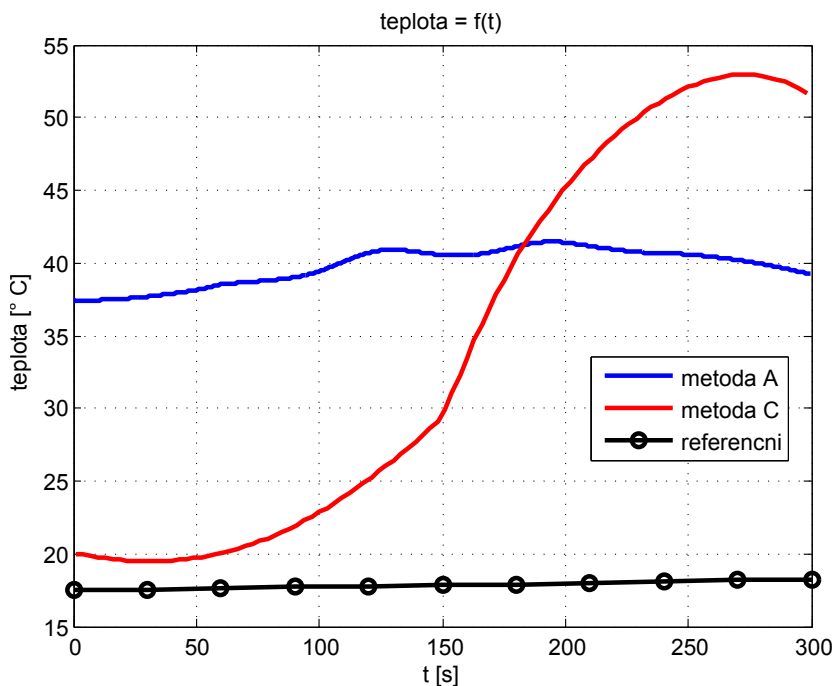
V níže uvedené tabulce jsou porovnány střední hodnoty činného odporu na sledovaném intervalu získané jednotlivými metodami a jejich procentní odchylky od správné hodnoty (správná hodnota byla získána zpětným dopočtem z průměrné teploty vedení měřené přímo, která je zvolena jako referenční).

Tab. 8 – Porovnání získaných R

metoda výpočtu	střední hodnota R [Ω]	chyba výpočtu [%]
A	3,431	8,85
C	3,382	7,29
přímé měření teploty	3,152	0

6.2. Vypočtené a naměřené průměrné teploty vedení

V následujícím grafu jsou porovnány průměrné teploty vedení získané výpočtem dle uvedených početních metod s teplotou získanou přímým měřením. Tato teplota je zvolena jako referenční vzhledem k nejvyšší přesnosti a spolehlivosti přímého měření, vypočítané teploty k ní budou vztaženy a v závěru bude zhodnocena procentní odchylka a porovnán trend získaných křivek.



Obr. 42 – Porovnání průměrných teplot získaných výpočtem a měřené teploty

V níže uvedené tabulce jsou porovnány střední hodnoty teplot na sledovaném intervalu získané jednotlivými metodami a jejich procentní odchylky od správné hodnoty (jako správnou – tj, referenční hodnotu označíme teplotu získanou z přímého měření teploty).

Tab. 9 – Porovnání získaných průměrných teplot

metoda výpočtu	střední hodnota t [° C]	chyba výpočtu [%]
A	39,79	123,1
C	35,93	101,4
přímé měření teploty	17,84	0

6.3. Porovnání výpočetních metod, přesnost výpočtu a jeho reálné využití

POROVNÁNÍ VÝPOČETNÍCH METOD

Metoda A – jednoho měření má výrazně hladší průběh než metoda C a poměrně přijatelně kopíruje křivku referenční průměrné teploty. V porovnání s referenční teplotou je

křivka posunutá o konstantu, což by mohla napravit určitá korekce. Vícenásobná měřicí metoda má průběh výrazně odlišný od referenční křivky, pokud je sledovaný interval dělený na intervaly (pro potřeby sledování trendu křivky byl interval 300 s rozdělen na 100 intervalů a výpočet byl proveden jednotlivě). Pokud ovšem provedeme výpočet na celém sledovaném intervalu a porovnáme získanou hodnotu se střední hodnotou teploty vypočítanou metodou A a referenční teplotou, tak zjistíme, že vícenásobná měřicí metoda je výrazně přesnější (o více než 20 %). Přesnost měřících metod je tedy nutné vyhodnocovat vzhledem k případnému využití – pro kontinuální sledování teploty vedení je vhodnější metoda jednoho měření, pro vyhodnocování teplot průměrováním v delších časových intervalech je vhodnější vícenásobná měřicí metoda používající lineární regresi.

PŘESNOST VÝPOČTU

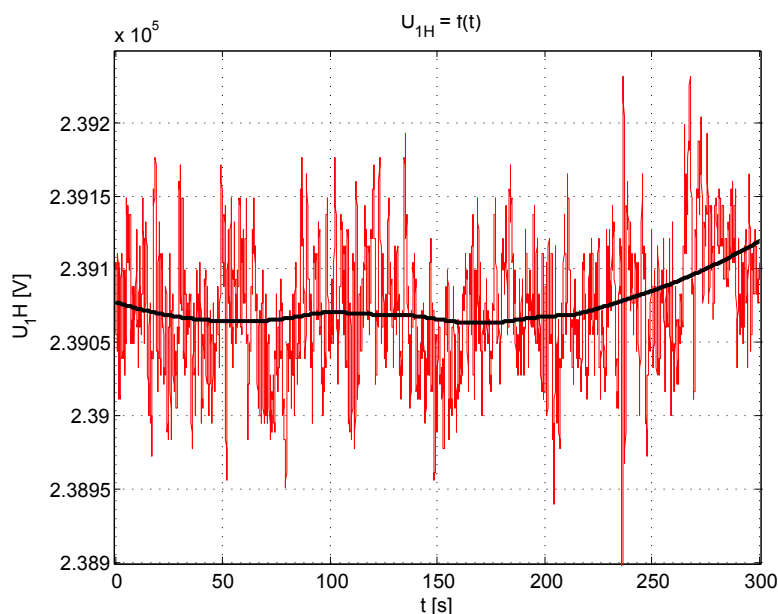
Z porovnání naměřených a vypočtených výsledných hodnot je zřejmé, že chyba výpočtu průměrné teploty je velmi vysoká (> 100 %), přestože chyba výpočtu činného odporu je poměrně nízká (~ 8 %). Z teoretických předpokladů jsme očekávali, že rušení ve vstupních datech a tedy i chyba ve výpočtu činného odporu významně ovlivní výslednou průměrnou teplotu vedení a to se potvrdilo. Vypočítaná teplota by se pohybovala v přijatelných mezích, pokud by chyba měření odporu nepřesáhla ± 2,5 %, což odpovídá chybě teploty ± 31,3 %, tj. ± 6,25 %.

Možnost reálného využití je diskutována v závěru práce.

6.3.1. Vliv filtrace vstupních dat na celkový výpočet

TESTOVANÉ DRUHY FILTACE/VYHLAZENÍ VSTUPNÍCH EFEKTIVNÍCH HODNOT SYNCHRONNÍCH NAPĚTÍ A PROUDŮ

- funkce smooth (testované koeficienty 0,1-0,6)



Obr. 43 – Zobrazení naměřené efektivní hodnoty napětí $U_{1H}=f(t)$ (červený průběh) a vyhlazení této křivky pomocí funkce smooth (černý průběh)

VLIV VYHLAZENÍ KŘIVEK VSTUPNÍCH HDONOT NA VÝPOČET ČINNÉHO ODPORU POMOCÍ JEDNOTLIVÝCH METOD

- *metoda A* – z testování je zřejmé, že vyhlazení křivek vstupních efektivních hodnot napětí a proudů mělo na výsledný činný odpor negativní vliv – ve vypočítané křivce $R = f(t)$ se objevily významné skoky (dosahující i více než $\pm 100\%$ z původní hodnoty)
- *metoda C* – z testování lze říct, že na výsledné hodnoty odporu mělo vyhlazení křivek efektivních hodnot napětí a proudů negativní vliv – u výsledného činného odporu došlo ke snížení o více než 60% (a tím došlo ke zvýšení chyby výpočtu)

Obecně lze tedy říct, že prokládání křivek vstupních hodnot nemělo kladné výsledky a nepodařilo se touto cestou zvýšit přesnost výpočtu.

7. Závěr

Cílem diplomové práce bylo provést diskuzi nad vhodností monitorování průměrné teploty venkovních linek v české přenosové soustavě za použití synchronního měření napětí a proudů. Tato metoda nabízí měření online metodou bez nutnosti odpojování linek a vychází z měření napětí a proudů, které probíhá kontinuálně v uvedených rozvodnách (a tedy není na těchto linkách nutná instalace přídatných zařízení pro měření teploty). Zároveň ale obsahuje úskalí v podobě nedostačující přesnosti měření, obzvláště v případě krátkých linek.

Přesnost měření a použitelnost monitorování teploty jsme ověřili na reálných datech naměřených na konkrétním vedení v české přenosové soustavě. Pro výpočet jsme postupně použili tři různé metody.

7.1. Zhodnocení cílů práce

1. *teoretický rozbor synchronního měření fázorů napětí a proudů v elektrizační soustavě, sledování elektrických parametrů vedení pomocí synchronních fázorů, teoretický rozbor monitorování teploty vedení* – byl proveden detailní teoretický rozbor popisující sychrofázory a jejich měření, dále sledování elektrických parametrů vedení pomocí vybraných početních metod, rovněž byl proveden teoretický rozbor monitorování teploty vedení pomocí sychrofázorů i dalšími metodami.
2. *zpracování reálných dat z vybraných vedení přenosové soustavy ČR* – na vybraném vedení bylo provedeno sychrofázorové měření ve vybraném časovém intervalu, tato data byla zpracována a byl proveden výpočet průměrné teploty vedení v daném intervalu.
3. *vyhodnocení výstupních dat* – získané hodnoty byly vyneseny do souhrnných grafů, výsledky byly porovnány z hlediska trendu křivek a středních hodnot, byla diskutována přesnost výpočtu a zvolena přesnější metoda.

7.2. Shrnutí výsledků práce

V tabulce uvedené níže se nachází souhrn výsledných středních hodnot vypočítaných a naměřených křivek průměrných teplot vedení ve sledovaném intervalu. Teplota získaná přímým měřením je zvolena jako referenční.

Tab. 10 – Porovnání získaných průměrných teplot

metoda výpočtu	střední hodnota t [° C]	chyba výpočtu [%]
A	39,79	123,1
C	35,93	101,4
přímé měření teploty	17,84	0

Po vyhodnocení výstupních teplot je zřejmé, že výpočty nevrací jednoznačné výsledky a bylo by vhodné se tématem dále zabývat.

Sledování činného odporu přenosových vedení je samo o sobě poměrně problematické, protože zejména u krátkých vedení dosahuje nízkých hodnot (běžně se R vedení pohybuje od několika setin až po jednotky Ω , ve srovnání s induktivní reaktancí dosahuje až 10x menších hodnot) a při výpočtech chodu sítě se běžně zanedbává.

Další úskalí spočívá v přesnosti měřicího řetězce. Analogové vstupy do PMU jsou zapojeny na měřicí jádra přístrojových transformátorů, která jsou sice výrazně přesnější než jádra pro ochrany, která se pro měření používala dříve (měřicí jádra dosahují přesnosti $\pm 0,2\%$, jádra pro činnost ochran $\pm 3\%$), přesto tato přesnost není dostačující a navíc se mění s velikostí měřených hodnot – přesnost měření je zachována pro hodnoty blízké jmenovitým, ovšem při nižším zatížení se výrazně zhoršuje (a pro měření extrémně vysokých hodnot se vlivem nasycení jádra stanou hodnoty neměřitelné). Teoreticky ovšem tyto skutečnosti nebrání použití metody, protože se při nízkém zatížení ohřívá vodič málo a za těchto podmínek není měření tak významné jako při průtoku jmenovitých a vyšších proudů a naopak při extrémně vysokém zatížení ztrácí sledování teploty smysl (jedná se o poruchu v soustavě, která způsobí zahřátí vodiče, ovšem působením ochran se jedná jen o krátkodobý jev). Použité PMU již obsahují integrovaný kalibrační algoritmus, který chybu měření poněkud zmírňuje. Přesnost měřicího řetězce splňuje aktuální normu IEEE C37.118.1-2011, platí TVE $< 0,5\%$, tato podmínka v sobě ovšem skrývá možnou chybu efektivní hodnoty a úhlu měřené veličiny, která významně ovlivní výpočet teploty vedení.

Chyba na straně vstupních dat významně ovlivňuje výstupní hodnoty činného odporu a úměrně tomu vzniká významná chyba ve sledované teplotě vodičů. K potlačení této chyby na přijatelnou mez nedošlo v žádné testované početní metodě a bez dalších úprav nevrací výsledky v přijatelných mezích.

7.3. Využití v praxi

Výpočet teploty vedení byl proveden se záměrem použít získané hodnoty pro řešení dynamického zatěžování vedení. Budeme-li uvažovat kontinuální *sledování průměrné teploty vedení v reálném čase*, tak získané teploty vedení nedosahují dostatečné přesnosti a bez dalších úprav nejsou pro dané použití vhodné. Pro využití hodnot v ostrém provozu by bylo nutné navrhnout vhodné kompenzační či kalibrační algoritmy, případně zvýšit přesnost prvků měřicího řetězce (kalibrací měřících transformátorů, výměnou prvků za typy s vyšší třídou přesnosti apod.).

Dalším záměrem bylo použít získané teploty jako nástroj pro dispečery přenosové soustavy – např. ve formě alarmů či varování, bude-li se blížit teplota vedení k nejvyšší dovolené hodnotě. Provedeme-li *vyhodnocení teploty v delším časovém intervalu* (např. 10 s) a vrátíme jako výsledek průměrnou teplotu daného intervalu, tak získáme mnohem reálnější výsledky. Nicméně pro využití hodnot v ostrém provozu by bylo opět nutné navrhnout vhodné kompenzační či kalibrační algoritmy (hodnoty jsou viditelně posunuté o konstantu).

7.4. Návrhy pro další práci

Diplomová práce se zabývá poměrně sporným tématem, zdaleka nedává jednoznačnou odpověď na otázku vhodnosti použití synchrofázorů pro výpočet průměrné teploty venkovních vedení a bylo by možné práci značně rozšířit.

Zde jsem navrhla několik úvah/úkolů, kterými by bylo vhodné se dále zabývat:

- *Úprava vstupních dat* – Vstupní data obsahují určitý obsah rušení, který jsme se pokusili eliminovat vyhlazením křivek efektivních hodnot. Dále by bylo možné navrhnout a otestovat odlišné metody pro efektivní filtraci či fitting vstupních signálů pro dosažení zpřesnění výpočtu.
- *Testování dalších metod výpočtu* – Výpočet odporu byl otestován pro 3 vybrané metody. V další práci lze aplikovat na měřená synchronní data odlišné výpočetní metody, které by mohly vracet přesnější výsledky.
- *Rozšíření výpočtu o měření na dalších časových intervalech* – Výpočet by bylo vhodné aplikovat na dalších sady dat naměřených v různých vybraných intervalech (ustálené stavy měřené ráno, v poledne, večer, synchrofázory měřené v různé dny apod.). Vytvořením studie, která by obsahovala porovnání řady různých výpočtů teplot na vedení V412 by se zvýšila vypovídající hodnota a přínos práce.
- *Rozšíření o měření na dalších přenosových linkách* – Velmi vhodné by bylo provést výpočet průměrné teploty na několika dalších linkách o různých délkách (nejlépe několika krátkých linkách – $l < 100$ km a několika dlouhých linkách) a výpočty následně porovnat jak s teplotami naměřenými odlišnými metodami, tak s daty získanými v této práci a následně provést diskuzi nad přesností měření-výpočtu.
- *Zvýšení přesnosti měřícího řetězce* – Měřící řetězec obsahuje několik částí s různými přesnostmi měření, zvýšením celkové přesnosti bychom dosáhli kvalitnějších výsledků, z této úvahy vychází koncept superkalibrátoru. Tato úvaha by ovšem pravděpodobně vydala na další diplomovou práci.

Literatura

- [1] PHADKE, A.G., THORP, J.S. - *Synchronized Phasor Measurement and Their Applications* Springer Science+Bussines Media, 2008, ISBN 978-0-387-76535-8,
- [2] *C37.118.1-2011 – IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*, 2011, ISBN 978-0-7381-6811-1
- [3] MARTIN, K.E. – *Synchrophasor Standards Development – IEEE C37.118 and IEC 61850*, System Sciences (HICSS), 44th Hawaii International Conference on, 2011, ISBN 978-1-4244-9618-1
- [4] KASEMBE, A.G., MÜLLER, Z., ŠVEC, J., TLUSTÝ, J., VALOUCH, V. - *Synchronous Phasor Monitoring System Application Possibilities*, 2012 IEEE, 27th Convention of Electrical and Electronic Engineers in Israel
- [5] ŠÍMA, J., VLČEK, S., SADECKÝ, B., HAVRDA, M. - *WAMS systémy pro monitoring elektrizační soustavy*, All for Power 3/2013, [cit. 22.11.2013] z www <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/wams_alstom.pdf>
- [6] POPELKA, A., JUŘÍK, D. - *Synchronní fázory – měření a možnosti využití*, Konference ČK CIRED 2007, dostupno z www <http://www.ais-brno.cz/clanky/CIRED_CZ.2007.pdf?lang=c> z [cit. 23.11.2013]
- [7] TLUSTÝ, J., ŠVEC, J., BANNERT, P., BRETTSCHEIDER, Z., KOCUR, Z., MAREČEK, P., MÜLLER, Z., SÝKORA, T. - *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*, 2011, ISBN 978-80-01-04939-6
- [8] NUQUI, R. - *Electric Power Grid Monitoring with Synchronized Phasor Measurement*, Virginia Polytechnic Institute, 2009, ISBN 978-3-639-11639-7
- [9] SCHWEITZER, E. O. III., WHITEHEAD, D. E. – *Real-World Synchrophasors Solutions*, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
- [10] GREENE, B. K. – *Novel Applications for Measurement Units and Synchrophasor Data*, Master Thesis, The University of Tennessee, 2013
- [11] SHI, D., TYLAVSKY, D. J., LOGIC, N., KOELLNER, K. M. – *Identification of Short Transmission-Line Parameters from Synchrophasor Measurements*, Power Symposium, 2008. NAPS '08. 40th North American, ISBN 978-1-4244-4283-6, [cit.9.3.2014] z www < <http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5307354>>
- [12] NORTH AMERICAN SYNCHROPHASOR INITIATIVE PERFORMANCE & STANDARDS TASK TEAM– *Synchrophasor Measurement Accuracy Characterization*, report, August 26, 2007, [cit. 5.4.2014] z www <<https://www.naspi.org/>>

- [13] UDREN, E., RAHMATIAN, F., HU, Y., MADANI, V., NOVOSEL, D. – *In-Field Synchrophasor System Calibration, Testing, and Application Validation Using High-Voltage Optical Sensors*, 21, rue d'Artois, Paris, CIGRE 2012
- [14] FLERCHINGER, B., MOXLEY, R., ERSONMEZ, E. – *All the Data Fit to Print – Applying All the Available Synchrophasor Information*, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., [cit. 5.3.2014] z [www <https://www.selinc.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=9996>](http://www.selinc.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=9996)
- [15] LIXIA, M., MUSCAS, C., SULIS, S. – *On the accuracy specifications of Phasor Measurement Units*, Department of Electrical and Electronic Engineering University of Cagliari
- [16] TLUSTÝ, J., KYNCL, J., MUSIL, L., ŠPETLÍK, J., ŠVEC, J., HAMOUZ, P., MÜLLER, M., MÜLLER, Z. – *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*, ČVUT, Praha 2011, ISBN 978-80-01-04940-2
- [17] TOMÁŠ, Z. – *Systém synchronizovaného měření fázorů s využitím zařízení firmy SEL, Inc.*, MC Projekt s.r.o., duben 2007
- [18] POPELKA, A., BÖHM, V., JUŘÍK, D., MARVAN, P. – *Ampacita vedení a možnost jejího on-line vyhodnocování*, Konference EGÚ, Poděbrady 2010, [cit.27.2.2014] z [www <http://www.ais-brno.cz/clanky/Ampacita.pdf?lang=cz>](http://www.ais-brno.cz/clanky/Ampacita.pdf?lang=cz)
- [19] Webová prezentace společnosti Schweitzer Engineering Laboratories – SEL, záložky Synchrophasor Applications, [cit.13.4.2014] z [www <https://www.selinc.com/>](https://www.selinc.com/)
- [20] MÁSLA, K., VRBA, M. A KOL. – *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*, AEM 2013, ISBN 978-80-260-44671-1
- [21] Webová prezentace společnosti AIS spol. s r. o., záložky Synchronní měření, Aplikace – Měření parametrů elektrického vedení za provozu a On-line vyhodnocování přenosové kapacity vedení – ampacity, [cit.27.2.2014] z [www <http://www.ais-brno.cz/>](http://www.ais-brno.cz/)
- [22] Webová prezentace společnosti ČEPS a.s., [cit.10.3.2014] z [www <http://www.ceps.cz/>](http://www.ceps.cz/)
- [23] Studijní materiály k předmětu Elektroenergetika 2 (A1B15EN2), ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky
- [24] Studijní materiály k předmětu Přenos a rozvod (A1M15PRE), ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky
- [25] ČELEDA, J. – *Řešení napěťové stability elektrizačních soustav v ustáleném stavu*, diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2013, [cit.17.3.2014] z [www <http://hdl.handle.net/11025/10124>](http://hdl.handle.net/11025/10124)
- [26] MAREŠ, L. – *Teplota a její měření*, webový portál Technická zařízení budov, [cit.25.3.2014] z [www <http://www.tzb-info.cz/3115-teplota-a-jeji-mereni>](http://www.tzb-info.cz/3115-teplota-a-jeji-mereni)

- [27] *VALCAP – Grid Monitoring and Rating for High Voltage Cables and Overhead Lines*, Flyer společnosti nkt cables GmbH, [cit.25.3.2014] z www <<http://www.andeswireless.com/descargas/esp/VALCAP.pdf>>
- [28] *OTLM – Overhead Transmission Line Monitoring*, záložky OTLM System, OTLM Device, [cit.1.5.2014] z www <http://www.otlm.eu/en/otlm_device/>
- [29] *Smart Temperature Sensors, Wireless Temperature Sensor System*, webová prezentace společnosti STRI – High Voltage Testing and Consulting, [cit.1.5.2014] z www <<http://www.stri.se/wwwpublic/Smart-Sensors.pdf>>
- [30] *Ampacimon – Overhead Line Monitoring*, webová prezentace zařízení, záložka Product, [cit.1.5.2014] z www <<http://www.ampacimon.com/>>
- [31] *CAT-1 Transmission Line Monitoring System*, webová prezentace společnosti Nexans, záložka Product Details, [cit.2.5.2014] z www <<http://www.nexans.us/>>
- [32] *CAT-1 Transmission Line Monitoring System – Optimize your network capabilities*, brožura společnosti Nexans, [cit.2.5.2014] z www <http://www.nexans.us/US/2008/CAT-1_Brochure_1.pdf>
- [33] *Boxplot*, Wikipedie, [cit.1.5.2014] z www <<https://cs.wikipedia.org/wiki/Boxplot>>

Dále bylo čerpáno z interních materiálů společnosti ČEPS, a.s., které není z pochopitelných důvodů možné citovat.

Dodatek

A. Boxplot

Boxplot (krabicový graf) je jedním ze způsobů grafické vizualizace numerických dat pomocí jejich kvartilů. *Krabicová část* je ohraničena shora 3. kvantilem a sdola 1. kvantilem, linie mezi nimi značí 2. kvantil – medián. *Fousky* – linie vycházející ze střední části diagramu kolmo nahoru a dolů vyjadřují variabilitu dat pod prvním a nad třetím kvantilem. Dále bývají v grafu vykresleny *outliery* – odlehle hodnoty jako jednotlivé body (červené +, viz graf níže). [33]

medián

1. kvartil

3. kvartil

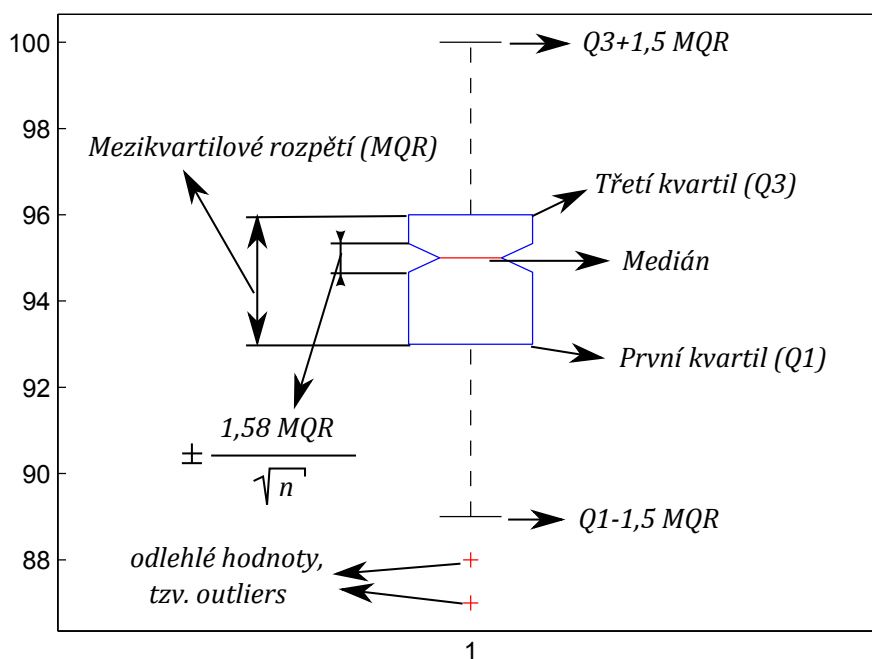
mezikvartilové rozpětí

2. kvartil, prostřední prvek

střední prvek mezi nejmenším prvkem a mediánem

střední prvek mezi mediánem a nejvyšším prvkem

rozpětí, v němž se nachází 50 % prvků



Obr. 44 – Boxplot – struktura

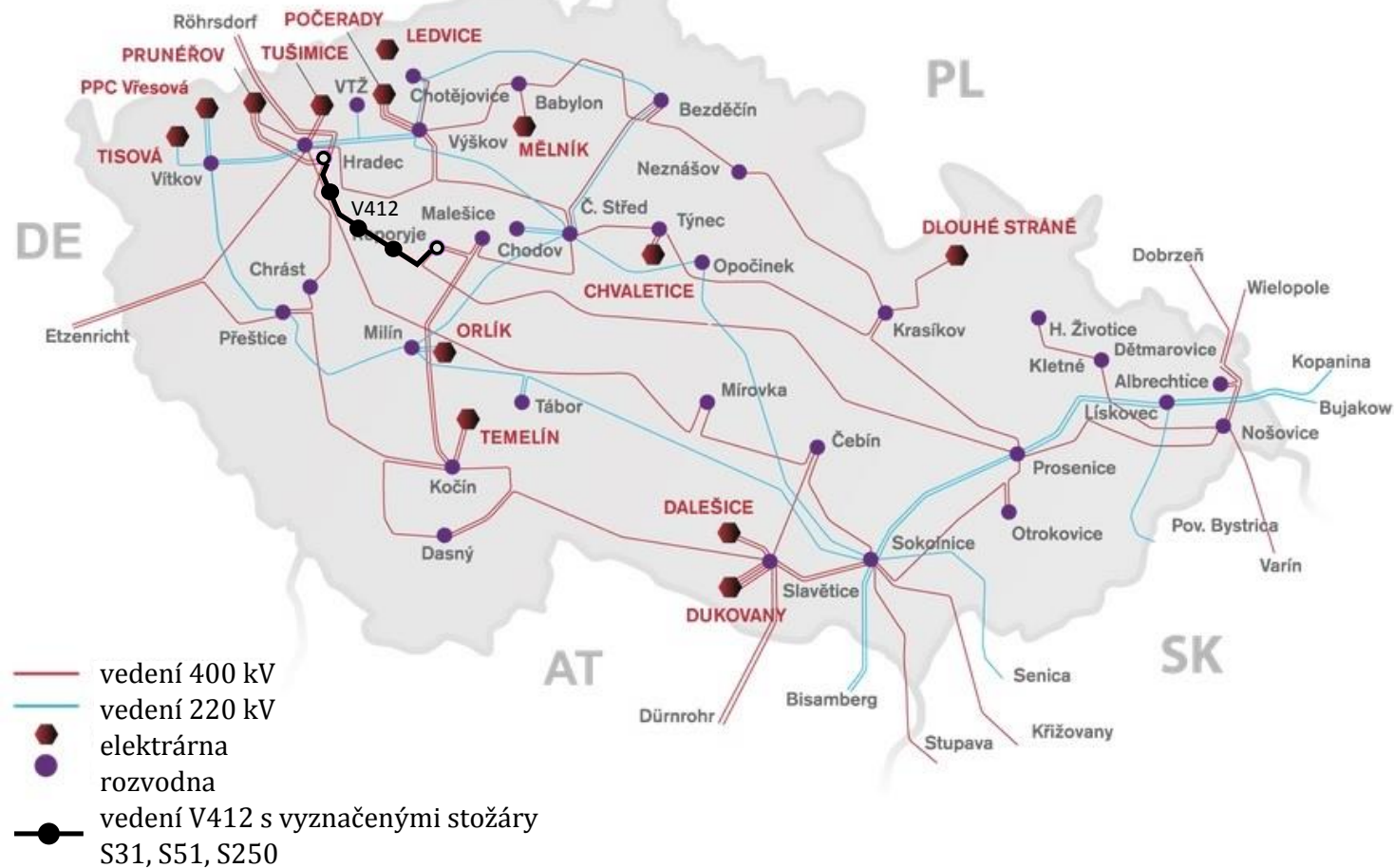
B. Obsah přiloženého CD

- Vanisova_DP.pdf – diplomová práce včetně příloh
- vybrané zdroje literatury:
 - [2] C37.118.1-2011 – IEEE Standard for Synchrophasor Measurements
 - [11] SHI, D. – Identification of Short Transmission-Line Parameters from Synchrophasor Measurement
- MATLAB_DP skripty – členění:
 - data1.csv
 - data2.csv
 - vstupReporyje.mat
 - vstupHradec.mat
 - computatin_of_temperature.m
 - * average_temperature.m
 - * complexList.m
 - * cutting_intervals.m
 - * methodA.m
 - * methodB.m
 - * methodC.m
 - sensitivity_analysis.m
 - * TVE.m

Diplomová práce byla vypracovaná výhradně v těchto programech: L^AT_EX 2_ε, MathWorks Matlab, InkScape, Paint

Příloha č. 1

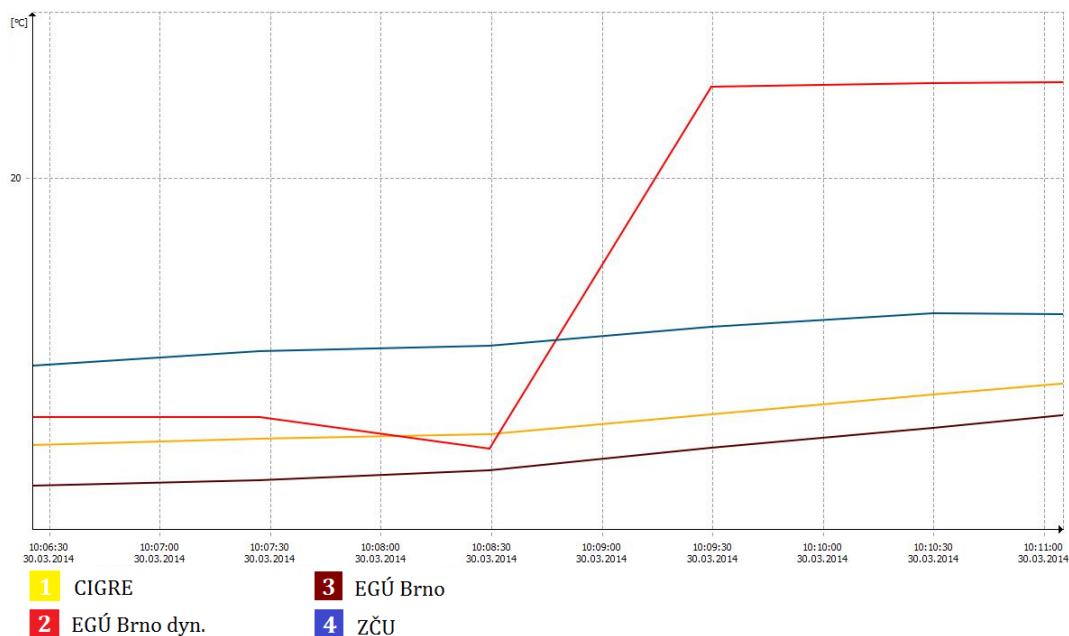
Schéma rozvodné sítě v ČR



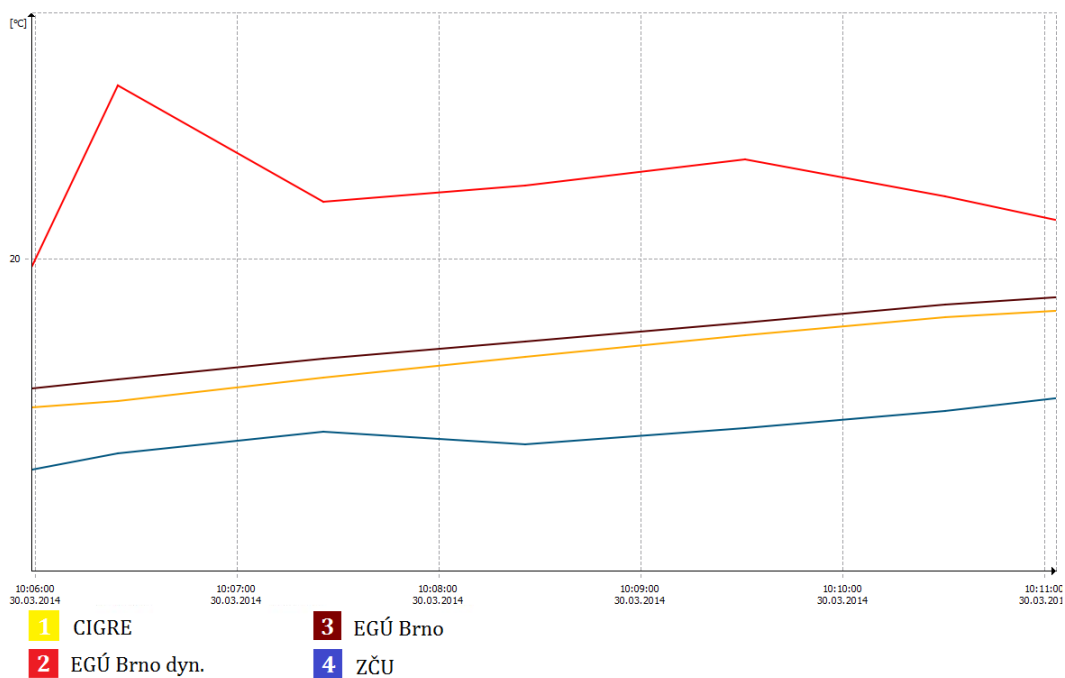
Obr. 1 – Schéma rozvodné sítě v ČR – na vyznačeném vedení V412 byl proveden výpočet činného odporu a průměrné teploty, převzato z [22] a doplněno

Příloha č. 2

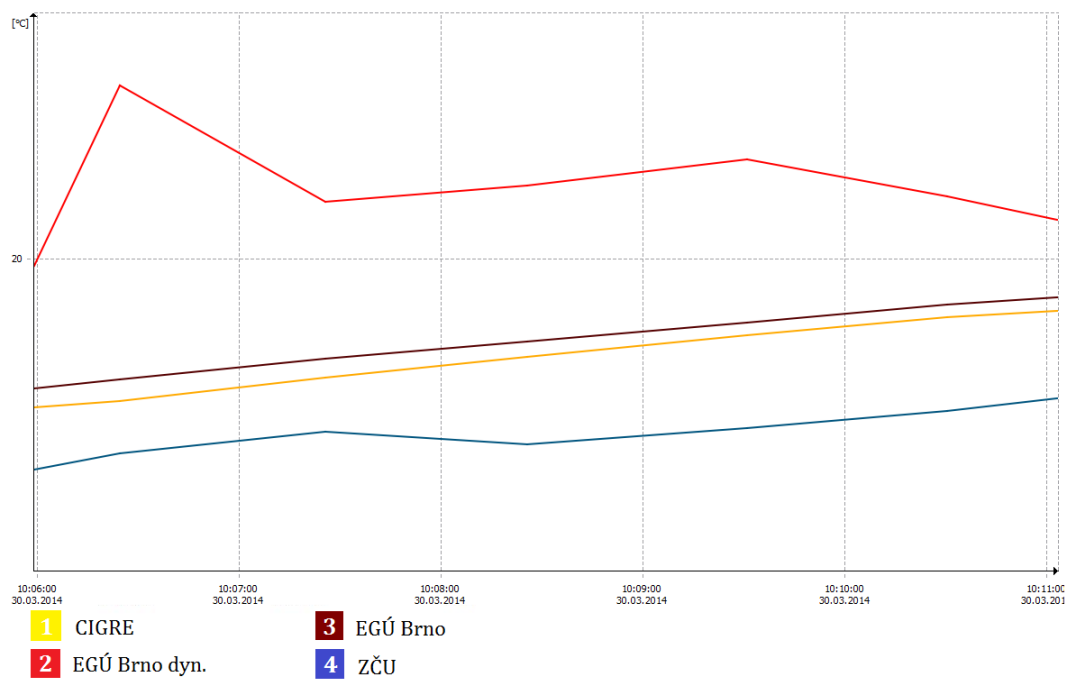
Následující grafy porovnávají naměřené a vypočtené teploty vedení sledované na vedení V412 na třech vybraných stožárech – S31, S51, S250 v časovém intervalu použitém k výpočtu. Z těchto grafů byla získaná průměrná teplota daného vedení sledovaná v čase.



Obr. 2 – Porovnání naměřených a vypočtených teplot – stožár S31

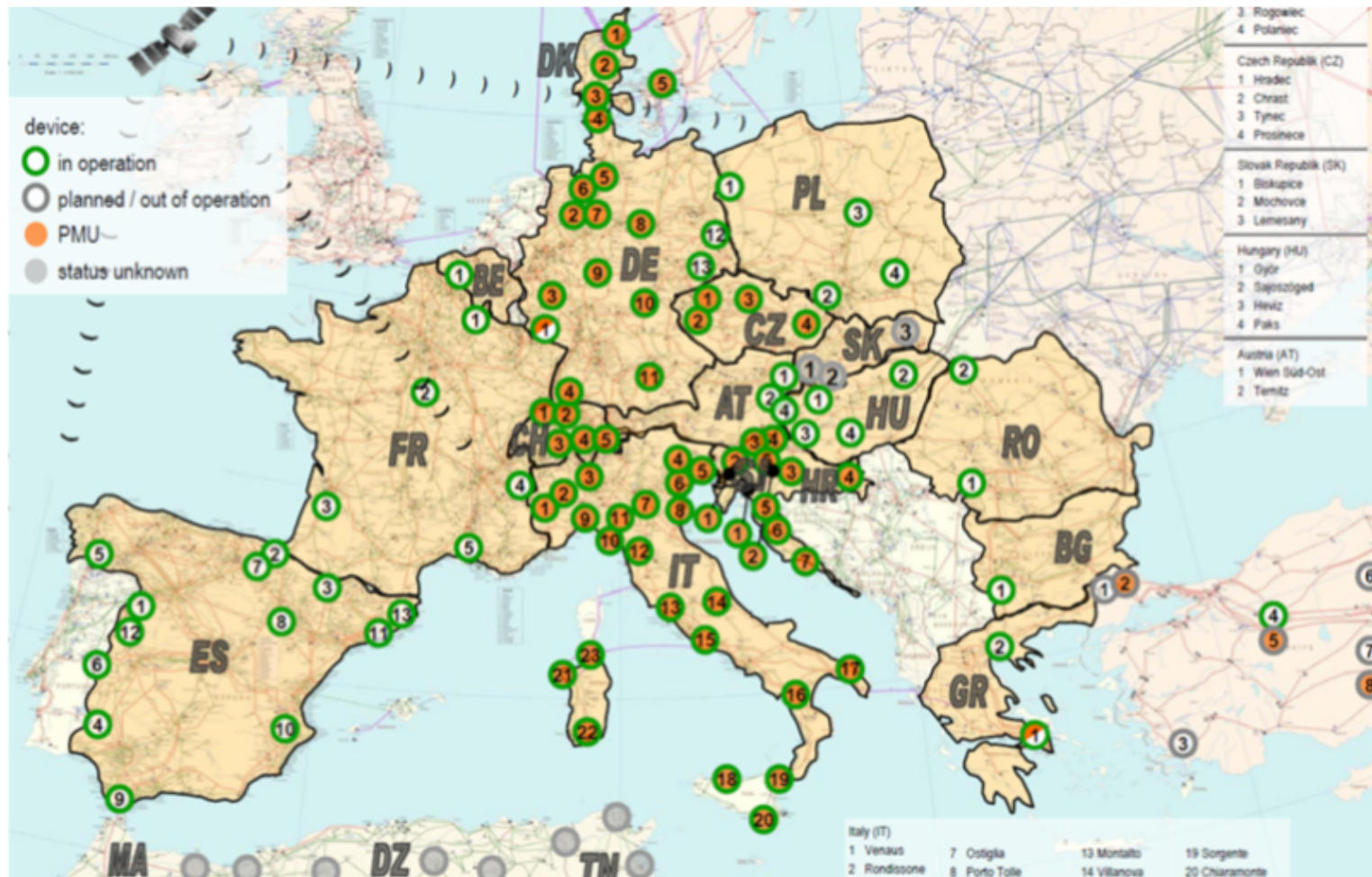


Obr. 3 – Porovnání naměřených a vypočtených teplot – stožár S51



Obr. 4 – Porovnání naměřených a vypočtených teplot – stožár S250

Příloha č. 3



Obr. 5 – Plánované instalace PMU, instalace ve výstavbě a v provozu v rámci Evropy