

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

***Pokročilé metody využití  
synchrofázorů v elektroenergetice***

**Disertační práce**

***Libor Straka***

Praha, Duben 2019

Doktorský studijní program: P 2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3907V001 Elektroenergetika

**Školitel:** *prof. Ing. Josef Tlustý, CSc.*

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a použil jen uvedenou literaturu a prameny.

V Praze dne 29.4.2019

Libor Straka

.....

### **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat panu prof. Ing. Josefu Tlustému, CSc. za cenné rady a velikou trpělivost při vedení této disertační práce, i za rady obecně. Zároveň velice děkuji doc. Ing. Zdeňku Müllerovi, Ph. D. za odborné připomínky k práci.

## **Abstrakt**

Disertační práce se zaměřuje na pokročilou metodu odhadu frekvence a fázorů pro potřeby elektroenergetiky. Přesné určení frekvence v elektrizační soustavě je klíčové pro moderní způsoby monitoringu a systémů řízení. Úvodem jsou představeny funkce a prvky sloužící pro monitorování sítí, provozu a pohledu na elektrizační soustavu s uvažováním nových trendů a rovněž základní principy a pojmy konceptu smart grids. Hlavní jádro práce je zaměřeno na podrobný popis funkce a parametrů navrhované metody. Dále je věnována pozornost porovnání její přesnosti v numerické simulaci s metodami konvenčními. K ověření přesnosti výsledků slouží rovněž modelová případová studie v distribuční síti vysokého napětí.

## **Klíčová slova**

Odhad frekvence, fázory, smart grid.

## **Abstract**

The dissertation is focused on advanced method of frequency and phasors estimation for the needs of electrical power engineering. Accurate frequency determination in electrical power grid is the key for modern means of monitoring and control systems. The introduction presents the functions and elements used for the monitoring of networks, operation and view on electricity system with the consideration of new trends, and it also introduces the essential principles and terms of the smart grid concept. The core of this thesis aims attention at detailed description of function and parameters of the proposed method. Further attention is also given to comparing the method's precision in numerical simulation with conventional methods. Additionally, a model case study in high voltage distribution presents a verification of the results accuracy.

## **Keywords**

Frequency estimation, phasors, smart grids.

# Obsah

1	Úvod.....	11
2	Cíle práce .....	12
2.1	Dílčí cíl .....	13
2.2	Hlavní cíl .....	13
3	Současný stav problematiky .....	13
3.1	Legislativa v ČR .....	14
3.2	Státní energetická koncepce .....	14
3.3	Národní akční plán smart grid .....	15
3.4	Smart grids.....	16
3.4.1	Trendy v konceptu smart grid .....	18
3.5	Obnovitelné zdroje z pohledu elektrizační soustavy .....	19
3.6	Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie.....	19
3.6.1	Kogenerační jednotky využívající pístové spalovací motory s rekuperací tepla.....	20
3.6.2	Regulační vlastnosti .....	20
3.6.3	Vliv kogeneračních jednotek na elektrizační soustavu .....	21
3.7	Monitoring v soustavě, přenos, distribuce.....	22
3.7.1	Důležitost vyhodnocování a monitoringu .....	23
3.8	WAMS.....	23
3.8.1	WAMPaC .....	25
3.8.2	Adaptace WA systémů pro distribuční síť .....	26
3.8.3	PMU .....	27
3.9	Pohled na problematiku ve světě, vybrané články na dané téma .....	29
3.10	Dílčí Shrnutí .....	34
4	Frekvence a její estimace v elektrických sítích.....	34
4.1	Vzorkování signálu.....	35
4.1.1	Detekce frekvence pomocí vzorkovací metody .....	36
4.1.2	Postup výpočtu frekvence .....	38
4.2	Harmonická analýza .....	38
4.2.1	Fourierova řada .....	39
4.2.2	Fourierova transformace .....	39
4.2.3	Diskrétní Fourierova transformace.....	40
4.2.4	Rychlá Fourierova transformace .....	40
4.2.5	Ostatní metody určení frekvence.....	41

4.3	Detekce fázoru .....	41
4.3.1	Využití Simpsonova integrálu .....	42
4.3.2	Určení fázoru .....	42
4.3.3	Výpočet výkonů .....	43
4.4	Použití fázorů při výpočtu ustáleného stavu v soustavě .....	44
4.4.1	Metoda vážených nejmenších čtverců .....	44
5	Navrhovaná metoda estimace frekvence .....	47
5.1	Navrhovaná metoda estimace frekvence využívající výpočet směrodatné odchylky .....	47
5.1.1	Analýza vstupního signálu a popis metody .....	48
5.1.2	Aplikace metody na signál s rušením .....	50
5.1.3	Vyhodnocení výsledků simulací .....	55
5.1.4	Dílčí závěr .....	57
5.2	Navrhovaná metoda estimace frekvence využívající výpočet rozptylu .....	58
5.2.1	Použití metody na spojitý signál .....	58
5.2.2	Použití metody pro diskrétní signál .....	59
5.2.3	Porovnání se standardem IEEE pro synchrofázorové měření .....	62
5.2.4	Aplikace metody u signálů s rušením .....	64
5.2.5	Srovnání s konvenčními metodami .....	64
5.2.6	Aplikace metody na skutečný průběh zatížený rušením .....	68
5.2.7	Dílčí závěr .....	70
5.3	Výpočet činného a jalového výkonu .....	70
5.3.1	Aplikace metody a výsledky simulace .....	71
5.3.2	Dílčí závěr .....	72
6	Případová studie .....	72
6.1.1	Popis vstupních parametrů .....	73
6.1.2	Matematický model a jeho realizace .....	74
6.1.3	Popis postupu výpočtu a simulace .....	76
6.1.4	Aplikace navržené metody estimace frekvence .....	77
6.1.5	Vyhodnocení a přehled výsledků .....	78
6.1.6	Porovnání přesnosti jednotlivých metod .....	84
6.1.7	Dílčí závěr .....	85
7	Zhodnocení stanovených cílů .....	87
7.1	Dílčí cíl .....	87
7.2	Hlavní cíl .....	87
8	Závěr .....	88

Přínosy práce .....	90
Náměty pro další výzkum.....	90
9 Literatura.....	92
10 Seznam publikací .....	98
10.1 Publikace vztahující se k tématu disertační práce .....	98
10.2 Ostatní publikace .....	98
10.3 Ohlasy.....	99
11 Přílohy.....	100
Příloha A.....	100
Příloha B.....	105
Příloha C.....	107

# Seznam zkratek

AC	Alternating current (střídavý proud)
ASEK	Aktualizovaná státní energetická koncepce
AMI	Automatic metering infrastructure
ČR	Česká republika
DC	Direct current (stejnoseměrný proud)
DFT	Discrete Fourier transform (diskrétní Fourierova transformace)
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity (Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny)
ES	Elektrizační soustava
EU	Evropská unie
FACTS	Flexible alternate current transmission system (systém řízení založený na výkonových polovodičových strukturách)
FFT	Fast Fourier transform (rychlá Fourierova transformace)
FVE	Fotovoltaická elektrárna
HVDC	High voltage direct current
FT	Fourier transform (Fourierova transformace)
KGJ	Kogenerační jednotka
NAP CM	Národní akční plán čisté mobility
NAP SG	Národní akční plán pro chytré sítě
PDC	Phasor data concentrator (koncentrátor fázorových dat)
PMU	Phasor measurement unit (jednotka pro měření fázorů)
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition (dispečerské řízení a sběr dat)
SEK	Státní energetická koncepce
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
WAMPaC	Wide Area Monitoring, Protection and Control (monitoring rozsáhlé oblasti, ochrana a řízení)
WAMS	Wide area monitoring system (systém monitoringu rozsáhlé oblasti)
ZC	Zero crossing (detekce signálu průchody nulou)
ZVN	Zvlášť vysoké napětí



# Seznam obrázků

Obrázek 3.1: Blokové schéma elektrizační soustavy vycházející z konceptu smart grid .....	18
Obrázek 3.2: Zjednodušené blokové schéma systémů WAMS .....	25
Obrázek 3.3: Blokové schéma obecné PMU .....	27
Obrázek 3.4: Fázor jednotkové velikosti a jednotková kružnice .....	28
Obrázek 3.5: Zobrazení cosinového a sinového členu fázoru .....	28
Obrázek 4.1: Princip vzorkování signálu a průchodů nulou .....	36
Obrázek 4.2: Hladká periodická funkce .....	36
Obrázek 4.3: Periodická funkce s uvažovaným rušením .....	38
Obrázek 4.4: Ukázka koeficientů v Simpsonově pravidlu .....	42
Obrázek 5.1: Odchylka od základní frekvence v elektrizační soustavě Evropy, převzato z [66] .....	47
Obrázek 5.2: Závislost velikosti kper u směrodatné odchylky analyzované funkce.....	50
Obrázek 5.3: Simulovaný periodický signál .....	53
Obrázek 5.4: Zašumělý signál .....	54
Obrázek 5.5: Výsledný simulovaný signál s rušením .....	54
Obrázek 5.6: Princip numerické metody pro vážené průměry .....	55
Obrázek 5.7: Princip numerické metody optimalizace pomocí paraboly .....	56
Obrázek 5.8: Porovnání numerických metod .....	56
Obrázek 5.9: Chyba určení amplitudy.....	57
Obrázek 5.10: Chyba určení fáze .....	57
Obrázek 5.11: Závislost velikosti kper u rozptylu analyzované funkce.....	59
Obrázek 5.12: Znázornění metody při různých hodnotách posunu okna.....	60
Obrázek 5.13: Numerické hledání frekvence .....	61
Obrázek 5.14: Výpočetní kroky .....	62
Obrázek 5.15: Kontrola umístění bodů v intervalu .....	62
Obrázek 5.16: Porovnání výsledků TVE u simulace .....	63
Obrázek 5.17: Simulovaný signál s rušením .....	65
Obrázek 5.18: Porovnání chyby frekvence v závislosti na velikosti rušení signálu pro jednotlivé metody .....	66
Obrázek 5.19: Simulovaný signál s rušením .....	67
Obrázek 5.20: Porovnání chyby frekvence v závislosti na velikosti rušení signálu pro jednotlivé metody .....	67
Obrázek 5.21: Závislost chyby činného výkonu na rozptylu .....	71
Obrázek 5.22: Závislost chyby jalového výkonu na rozptylu .....	72
Obrázek 6.1: Simulovaná síť vn.....	73
Obrázek 6.2: Blokové schéma modelu v Simscape Power System .....	75
Obrázek 6.3: Procesní diagram estimace frekvence.....	76
Obrázek 6.4: Mechanická frekvence generátoru .....	78
Obrázek 6.5: Porovnání mechanické frekvence se statistickou metodou s kper = 1,6 .....	79
Obrázek 6.6: Porovnání mechanické frekvence se statistickou metodou s kper = 2 .....	79
Obrázek 6.7: Porovnání mechanické frekvence se statistickou metodou s kper = 5 .....	79
Obrázek 6.8: Porovnání mechanické frekvence se statistickou metodou s kper = 10 .....	80
Obrázek 6.9: Porovnání mechanické frekvence s FFT .....	81
Obrázek 6.10: Porovnání mechanické frekvence s detekcí průchodů nulou.....	81

Obrázek 6.11: Chyba frekvence pro $k_{per} = 1,6$ .....	82
Obrázek 6.12: Chyba frekvence pro $k_{per} = 2$ .....	82
Obrázek 6.13: Chyba frekvence pro $k_{per} = 5$ .....	82
Obrázek 6.14: Chyba frekvence pro $k_{per} = 10$ .....	83
Obrázek 6.15: Chyba frekvence pro FFT .....	83
Obrázek 6.16: Chyba frekvence detekcí průchodů nulou .....	84
Obrázek 6.17: Porovnání přesnosti jednotlivých metod .....	85

## **Seznam tabulek**

Tabulka 5.1: Závislost chyby na $n_p$ .....	53
---	----

# 1 Úvod

Elektroenergetika v současné době prochází celou řadou změn, které s sebou přináší vyšší požadavky a nároky v oblasti spolehlivosti dodávky elektrické energie. Decentralizace výroby a podpora samovýrobců, vyšší podíl zdrojů s obtížně predikovatelnou výrobou, elektromobilita nebo aplikace nových akumulacích prvků mohou přivodit neobvyklé stavy, ve kterých se elektrizační soustava může nacházet. Zajištění bezpečného a spolehlivého chodu celého systému od výroby, přenosu, distribuce až po spotřebu elektrické energie, a tedy napříč všemi napěťovými hladinami, se stává nelehkým úkolem.

Přesná znalost stavu elektroenergetického systému je považována za klíčovou pro zvýšení efektivnosti, zajištění bezpečnosti dodávky elektrické energie a zabránění výpadkům. Celý systém je pak nutné monitorovat a vědět, v jakém stavu se nachází jeho jednotlivé parametry tj. velikost napětí a úhlu, činného či jalového výkonu a frekvence. V rámci velkých přenosových soustav se tak děje prostřednictvím tzv. širokého monitoringu (wide area monitoring) s využitím měření synchronních fázorů.

Pro decentralizaci výroby ve spojení s moderním způsobem řízení výroby a spotřeby elektrické energie se často používá termín chytré sítě, tzv. smart grids. Tento koncept, týkající se především distribučních sítí o nižších napěťových hladinách, vede k postupným změnám tradičního modelu elektroenergetického systému, kdy byla spotřeba zajišťována z centrálně umístěných zdrojů, a tok elektrické energie byl orientován jen jedním směrem. V konceptu smart grid je velmi důležitá snaha o výrobu z obnovitelných zdrojů elektrické energie, které jsou připojeny na úrovni distribuční sítě. I když použití obnovitelných zdrojů se může v mnoha případech instalace jevit jako problematické, je třeba se s jejich použitím a stále větším rozšířením v rozumné míře vyrovnat.

V případě smart grid dochází k aktivnímu řízení výroby a spotřeby a zavedení aktivních zákazníků „prosumerů“, kteří mají právo dodávat nadvýrobu elektrické energie do elektrické sítě. Dochází tak k obousměrnému toku energie od výrobce ke spotřebiteli a od spotřebitele k jinému spotřebiteli.

Nasazení nových technologií, rozšířená úroveň automatizace, monitorování frekvence může lépe analyzovat dopad decentralizovaných zdrojů a zlepšit řízení distribučních soustav. Koncept širokého monitoringu, řízení a ochrany může být tak rozšířen a přijat v distribučních sítích velmi vysokého a vysokého napětí a přispět ke zvýšení jejich spolehlivosti. Těmto

systemům, jejich nové metodě vyhodnocování frekvence a aplikaci, se bude věnovat část této práce.

O jednom z možných způsobů rozšíření a použití pojednává další část této práce, kde je uvažováno s nově navrženou možností vyhodnocení frekvence z pohledu distribuční sítě o vysokém napětí. Tento nový způsob je v práci aplikován na případové studii, ve které je uvažován alternativní zdroj v podobě kogenerační jednotky, jako záložního zdroj energie. Tyto jednotky nabývají na důležitosti a jsou stále častěji instalovány v průmyslových aplikacích v tuzemsku i ve světě. Na základě navrhované metody bude srovnána skutečná a odhadovaná frekvence generátoru kogenerační jednotky při přechodu do ostrovního provozu.

Spolehlivost a bezpečné fungování celé elektrizační soustavy složené ze širokého spektra výrobních zdrojů souvisí s celou řadou parametrů. Jako vhodný a účinný nástroj pro monitorování a získávání dat se jeví možnost využití synchronních fázorů napětí a proudů s použitím nové metody jejich vyhodnocení. Zároveň je možné pomocí této metody získat další důležité hodnoty o stavu elektroenergetické sítě, jako je frekvence a míra periodičnosti obvodových veličin v síti. Přesná data reálného provozu je důležité získávat při všech možných stavech, které se mohou vyskytnout, jako např. krátkodobé přetížení sítě, dynamické poruchové stavy a jejich vliv na celkovou stabilitu, frekvenci apod. Příprava a vyhodnocení dat v uzlech přenosové soustavy ČR pro monitoring synchronních fázorů napětí a proudu umožňuje získání přesných údajů z provozu soustavy. Lze tak určit možná opatření vedoucí ke zvýšení účinnosti přenosu, prevenci ztráty stability vlivem přetížení, přesnější lokalizaci poruch, a také získání informací o provozních parametrech. V přenosových sítích na hladinách napětí velmi vysokého a zvláště vysokého napětí se použití tohoto monitoringu rozšiřuje.

V této práci je uveden pohled na důležitost a významnost vyhodnocování synchronních fázorů a detekci frekvence rovněž v distribuci na úrovni napěťových hladin vysokého napětí, které může sloužit provozovatelům distribučních soustav k zajištění vyšší spolehlivosti dodávek elektrické energie.

## **2 Cíle práce**

Disertační práce je zaměřena na výzkumnou oblast zabývající se detekcí frekvence a fázorů pro oblast elektroenergetiky. Struktura a oblast stanovení cílů je charakterizována následovně.

## 2.1 Dílčí cíl

K dílčímu cíli patří zaměřit se na vybrané konvenční metody určování frekvence, fázorů v elektrizačních soustavách. V rámci tohoto cíle definovat a vysvětlit principy těchto metod.

Zde je důležitostí zdůraznit podstatu zavedení daných technologií monitoringu a pohlédnout na stav problematiky a současného stavu poznání monitoringu a řízení elektrizačních soustav ve světě.

## 2.2 Hlavní cíl

Hlavním cílem je popsat nově navrhovanou metodu estimace frekvence a fázorů pro účely elektroenergetiky. Zde se zaměřit na vysvětlení principů a vlastností metody.

Dále důkladně porovnat v numerických simulacích chování této metody využívající statistických dat s metodami konvenčními. Z výsledků simulací zhodnotit možná budoucí pozitiva užití navrhované metody a vyvodit dílčí závěry.

K dalšímu dílčímu cíli patří aplikace navržené metody na skutečný naměřený signál zatížený šumem a porovnat přesnost určení frekvence.

V závěru práce aplikovat navrhovanou metodu v případové studii. Ve studii bude připojena kogenerační jednotka jako záložní zdroj napájení při spuštění ostrovního provozního režimu v distribuční síti vysokého napětí. Zde je podstatou porovnat přesnost odhadu frekvence navržené metody a ostatních srovnávaných metod pro rozličné velikosti vstupních parametrů metody se skutečnou frekvencí na výstupu generátoru.

# 3 Současný stav problematiky

Spolehlivost dodávky elektrické energie a bezpečnost provozu zařízení využívajících tento druh energie je v zájmu celého národního hospodářství. Je podstatné, aby byly tyto dva aspekty splněny, a zároveň byla zajištěna šetrnost k životnímu prostředí. Rovněž je důležité, aby celý elektroenergetický systém, který je velmi komplexní a zahrnuje velké množství prvků a funkcí, správně fungoval. V úvodních částech je uveden stručný přehled legislativy, která se touto problematikou zabývá. Jedná se o popis dokumentů, jež mají zajistit popis, definici a vizi budoucího rozvoje elektrizační soustavy České republiky.

V této kapitole je uveden přehled od legislativních témat postupně k technické oblasti problematiky. Dále jsou popsány technologie smart grid včetně uvažování aktuálních trendů tohoto konceptu a také je provedeno shrnutí technické problematiky monitoringu elektrizačních

soustav, synchrofázorů atd. V dalších částech podkapitol je uveden vliv obnovitelných zdrojů na síť, základní přehled a možnosti připojení kogeneračních zdrojů. Nakonec pak přehled vybraných aktuálních výzkumných témat týkajících se problematiky ve světě.

Jsou zde shrnuty poznatky jak legislativní, tak technické, tedy moderní způsoby řízení, automatizace v elektrizačních soustavách a rovněž poznatky z výzkumu. Na tyto znalosti je navázáno popisem navrhované metody estimace frekvence a fázorů v elektroenergetických sítích.

### **3.1 Legislativa v ČR**

V průmyslu, a zvláště v Evropě, je kladen velký důraz na snižování spotřeby skleníkových plynů, hospodárnost při využívání energie, recyklaci materiálů, energeticky úsporné budovy, atd. K tomu se váže stále se rozšiřující legislativa, která ze zákonů Evropské Unie vychází. V České republice jsou to např. Zákon o hospodaření energií, Zákon o podmínkách obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů, atd. Uvedený legislativní rámec definuje pojmy jako primární energie, neobnovitelná primární energie, koeficient neobnovitelné primární energie, ekodesign aj. Všechny tyto zákony, prováděcí předpisy a normy vznikají ke Státní energetické koncepci, která popisuje konkrétní realizační kroky energetické politiky státu schválené vládou ČR dne 10. 3. 2004 a jejich aktualizací, poslední v květnu 2015, jejíž součástí je výhled energetiky do roku 2030 [1], [2], [3].

Legislativní úroveň se týká i rozvoje a provozu distribučních soustav. Zde je řešeno především směřování vývoje, implementace nových prvků v soustavě a výhled budoucího fungování. Podrobně je tato problematika uvedena a popsána ve Státní energetické koncepci a jejím pravidelném vyhodnocení, tedy Aktualizaci státní energetické koncepce [3], [4], [5].

### **3.2 Státní energetická koncepce**

Celkové zvýšení energetické efektivity celé propojené přenosové soustavy České republiky, jako části páteřní přenosové sítě v centrální části zemí Evropské Unie, je prioritou státní energetické politiky. Prioritou je zároveň zvýšení energetické efektivity napříč celým odvětvím od výroby, přenosu až po využití elektrické energie. V rámci dokumentu Státní energetické koncepce (SEK) Ministerstvo průmyslu a obchodu vypracovává zprávu o jejím plnění, na základě čehož potom vláda ČR svým usnesením schvaluje aktualizovanou verzi SEK. *„Hlavním důvodem pro schválení Státní energetické koncepce (SEK) je potřeba jasně artikulovat priority a strategické záměry státu v rámci sektoru energetiky a poskytnout tak*

*investorům, občanům a státní správě stabilitu v dnešním turbulentním a dynamickém období.“*

[6] Jde tedy o strategický dokument týkající se energetického hospodářství, na jehož základě jsou dány možnosti využívání energetických zdrojů, spolehlivá, bezpečná a k životnímu prostředí ohleduplná dodávka energie pro potřebu ekonomiky a obyvatel ČR.

SEK identifikuje následující priority jako *„vyvážený mix primárních energetických zdrojů i zdrojů výroby elektřiny založený na jejich širokém portfoliu, efektivním využití všech dostupných tuzemských energetických zdrojů, udržení přebytkové výkonové bilance ES s dostatkem rezerv a udržování dostupných strategických rezerv tuzemských forem energie; zvyšování energetické účinnosti národního hospodářství; rozvoj síťové infrastruktury ČR v kontextu zemí střední Evropy, posílení mezinárodní spolupráce a integrace trhů s elektřinou a plynem v regionu včetně podpory vytváření účinné a akceschopné společné energetické politiky EU; podpora výzkumu, vývoje a inovací zajišťující konkurenceschopnost české energetiky a podpora školství, s cílem nutnosti generační obměny a zlepšení kvality technické inteligence v oblasti energetiky; a v neposlední řadě zvýšení energetické bezpečnosti a odolnosti ČR a posílení schopnosti zajistit nezbytné dodávky energií v případech kumulace poruch, vícenásobných útoků proti kritické infrastruktuře a v případech déle trvajících krizí v zásobování palivy.“* [6] Lze si tedy povšimnout důležitosti z pohledu legislativy a vlády na důležitost situace týkající se energetiky. Každoročně je vyhodnocována zpráva o plnění SEK.

Podle SEK má být rovněž zajištěna vysoká spolehlivost týkající se provozu distribučních soustav v souladu s evropskými standardy s cílem zajištění přiměřeného podílu OZE a jejich integraci do inteligentních distribučních sítí [1]. Rovněž má být věnována zvýšená pozornost údržbě a zvyšování odolnosti při vzniku mimořádných krizových situací. Jedním z cílů je zajistit vybavení až 80 % odběrných předávacích míst inteligentními měřicími systémy a jejich zapojení do řízení distribučních soustav [1], [3].

### **3.3 Národní akční plán smart grid**

Další z důležitých dokumentů týkající se vývoje v elektroenergetice je Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG), který je zpracován MPO a každé tři roky aktualizován, přičemž je vydávána Zpráva o průběžném vyhodnocení plnění NAP SG [7]. Tento dokument vyhodnocuje splnění jednotlivých tematických oblastí týkajících se dispečerského řízení, flexibility, podpůrných služeb, distribuované výroby, měření, elektromobility apod.

NAP SG vychází ze Zprávy o plnění nástrojů SEK a důvod vydání je především rozvoj inteligentních sítí i s ohledem na přání spotřebitelů elektrické energie po větší svobodě a

nezávislosti při rozhodování o zajištění jejich energetických potřeb [3], [7]. Je také důležité zajistit rozvoj systémů a nástrojů pro řízení elektrizační soustavy, která bude využívat nové technologie, rozvoj infrastruktury a implementaci návrhů pro efektivní využití sítí. Toto jsou jedny z hlavních důvodů vydání uvedeného dokumentu.

Rozšíření inteligentních sítí a jejich prvků bude velmi důležité k bezporuchovému a spolehlivému provozu elektrizační soustavy. Podle NAP SG se očekává postupná změna stávající infrastruktury a postupný nárůst výroby elektrické energie z decentralizovaných zdrojů, které budou využívat hlavně obnovitelné energie. V důsledku toho dojde k lepšímu využití distribuční sítě, do níž bude většina těchto zdrojů připojena, a současně k lepšímu řízení výroby a spotřeby energie v důsledku jejich fyzické blízkosti. Rovněž se dle plánu předpokládá postupné rozšíření decentralizovaných zdrojů malého výkonu, např. instalace fotovoltaických elektráren na rodinných domech, které budou sloužit k pokrytí jejich spotřeby. V takovém případě bude ale nutné vyrovnat se s rozšířením obnovitelných zdrojů takto fungujících a zlepšit řízení a monitoring stavu elektrizačních sítí.

Zmíněné aspekty mohou představovat výzvu pro výzkum technologií používaných v přenosových soustavách založených na monitoringu a získávání dat pomocí synchronfázorů. Získaná data mohou sloužit provozovatelům distribučních soustav a zajistit tak vyšší spolehlivost a bezpečnost dodávky elektrické energie. Jedna z možností rozšíření, tedy přesná detekce a popis stavu distribuční soustavy velmi vysokého napětí pomocí fázorů harmonických veličin a následného vyhodnocení frekvence, je popsána v dalších částech práce.

### **3.4 Smart grids**

Jak je uvedeno výše, podpora sítí na bázi smart grid na legislativní úrovni je již plně implementovaná. Srovnatelně důležitý je technický pohled k čemu smart grids, někdy označované jako smart networks, slouží.

Definování smart grids stručným způsobem není snadný úkol, protože koncept je relativně nový, moderní a tuto inteligentní síť vytvářejí různé alternativní komponenty. V literatuře je tento pojem definován různými autory a organizacemi mnoha různými způsoby, obecně ale platí, že smart grids, v některé literatuře označovány také jako smart networks, jsou elektrické sítě, které efektivně propojují chování a akce všech připojených uživatelů [9].

V literatuře se můžeme dále setkat s definicí, která smart grid označuje jako inteligentní, samočinně se regulující elektrickou síť, schopnou přenášet vyrobenou energii z jakéhokoliv



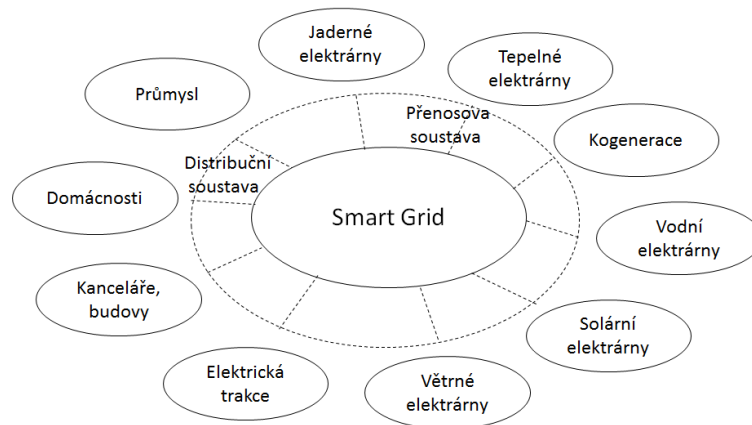
zdroje centralizované i decentralizované výroby elektrické energie až ke koncovému zákazníkovi [8].

Celý systém inteligentní sítě je automatizován pro sledování spotřeby elektrické energie ve všech lokalitách. Síťová architektura je také kombinována se softwarem spravujícím management energetické soustavy pro odhad spotřeby energie a souvisejících nákladů pro konkrétního spotřebitele. Poskytováním informací spotřebitelům o aktuální spotřebě a cenách energií pomáhá tento systém správy energie z inteligentních sítí minimalizovat spotřebu v době vysokých nákladů a špičkové poptávky. Zařízení smart grid přenášejí informace takovým způsobem, že umožňují běžným uživatelům, operátorům a automatizovaným zařízením rychle reagovat na změny v systémech inteligentní sítě, což platí i naopak.

Smyslem smart grids je modernizace systému dodávky elektrické energie. Většina tradičních elektrických sítí je založena na jednosměrné interakci od fáze výroby až po spotřebu. Od tradiční sítě se smart grid vyznačuje tím, že umožňuje obousměrnou komunikaci dat o elektrické energii, a nikoli komunikaci jen jednosměrnou. Dochází zde k interaktivní komunikaci mezi výrobními zdroji a spotřebiči nebo spotřebiteli, čímž se daná energetická soustava stává ekonomicky efektivní, udržitelná, s malými ztrátami a vysokou spolehlivostí dodávky a bezpečnosti.

Činnost všech uživatelů je do inteligentní sítě integrována pomocí dálkového ovládání a automatizaci. Pomocí digitální technologie tento systém umožňuje shromažďování dat v reálném čase týkajících se dodávek a poptávky po elektrické energii během procesu a distribuce, jejich sledování, analýzu a kontrolou, přičemž dochází ke kontinuální komunikaci v rámci celého dodavatelského řetězce, což činí monitorování, výrobu, spotřebu a údržbu účinnější.

Podle [8] výhodou takovéto elektrizační soustavy je zejména schopnost pojmout velké množství decentralizovaných zdrojů elektrické energie s možností využití obnovitelných zdrojů energie (FVE, kogenerace, větrné elektrárny, atd), spolu s novými odběry elektrické energie, především elektromobily, klimatizace, tepelná čerpadla, aj.



Obrázek 3.1: Blokové schéma elektrizační soustavy vycházející z konceptu smart grid

U elektrizační soustavy typu smart grid, oproti klasickému schématu nehraje roli, jak a kam se spotřebitel nebo výrobce připojí, jelikož řízení takového systému bude automatické (řízeno pomocí dodávaného a odebíraného výkonu v soustavě). To povede ke zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie, jelikož v případě výpadku v jedné části soustavy bude možné dodávku přepojit, a elektrickou energii dodávat z jiné strany.

### 3.4.1 Trendy v konceptu smart grid

Cílem smart grids je zajištění maximálního využití elektrické energie z jakéhokoliv výrobního zdroje a schopnost sofistikovaně reagovat na možné různé lokální provozní stavy a mimořádnosti (špatné napěťové poměry, přetížení sítě, nesymetrické zatížení třífázové soustavy nebo případný deficit výkonu). Vzniká definice několika pojmů, z nichž nejvýznamnější jsou uvedeny v [8].

Za zmínění stojí pojem tzv. Virtuální elektrárny. Jedná se o soubor několika malých decentralizovaných obnovitelných i neobnovitelných výrobních jednotek, které jsou monitorovány a provozovány nadřazeným systémem řízení energie tak, jako by se jednalo o jednu velkou elektrárnu (např. konvenční uhelnou elektrárnu), přičemž instalovaný výkon virtuální elektrárny je součet jednotlivých výkonů zdrojů, které ji tvoří [8].

Tyto dílčí jednotky (jedná se např. o kogenerační jednotky, fotovoltaické elektrárny, větrné a malé vodní elektrárny, apod.) nemohou samy o sobě zaručit nepřetržitou stabilní výrobu, ale jejich vhodnou kombinací, monitoringem a inteligentním řízením lze dosáhnout rovnováhy v systému.

V rámci sítě smart grid je následně spojen sběr dat společně s řízením sítě a spotřeby. Zavedením tohoto chytrého měření se předpokládá zapojení zákazníků do systému hromadného

dálkového ovládání tak, že budou více užívat elektrospotřebiče, jejichž řízení bude zajištěno právě chytrým elektroměrem, který obstará jejich spuštění v nízkém tarifu. Více informací je např. v [8], [10], [11], [12], [13].

Smart grid tvoří obsáhlé a stále se dynamicky rozvíjející odvětví. Komplexnímu pohledu na problematiku smart grid včetně uvažování využívaných trendů, numerickému modelu jejich vlivu na elektrickou distribuční soustavu, se věnuje mj. [8].

### **3.5 Obnovitelné zdroje z pohledu elektrizační soustavy**

Jak je popsáno v kapitolách výše, důležitou roli dalšího rozvoje elektrizačních sítí a elektroenergetiky obecně budou hrát obnovitelné zdroje energie.

OZE se uplatňují zejména při rekonstrukcích objektů průmyslové výroby, náhradě stávajících zdrojů energie a velkých spotřebičů, výstavbě nových budov, přičemž je třeba zajistit efektivní monitorování, řízení výroby/spotřeby energie, atd. Vzhledem ke zvyšujícím se nárokům na energetickou náročnost systému dochází k postupným změnám v energetickém systému a tyto zdroje se dostávají do popředí, jedná se ovšem primárně o zdroje decentralizované. Sem patří především fotovoltaika, větrné elektrárny, vodní elektrárny, kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. V mnoha publikacích se lze dočíst o principu funkce a o jejich charakteristice [14], [15], [16].

Co se týká samotných fotovoltaických systémů, jejich základní dělení spočívá ve struktuře fotovoltaického článku. Rozdělení, podrobný popis, možnosti připojení atd. jsou uvedeny např. v [14], [15], [16].

V dalším textu práce bude blíže věnováno kombinované výrobě elektrické energie a tepla. Kombinovaná výroba elektřiny a tepla náleží spíše pod alternativní než obnovitelné zdroje. Jednotka s pístovým motorem bude použita jako zdroj elektrické (a tepelné) energie pro distribuční soustavu v případové studii detekce frekvence a fázorů. Je proto důležité se alespoň stručně zaměřit se na určitá specifika těchto zdrojů.

### **3.6 Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie**

Podkapitola udává základní popis technologie kombinované výroby elektrické a tepelné energie, tzv. kogenerace, poněvadž kogenerace bude dále využita jako zdroj záložního napájení v případové studii, kde bude sledován průběh mechanické frekvence a následně vyhodnocena přesnost estimace frekvence navrhovanou metodou. Tento zdroj energie, který je hojně

využíván v průmyslu, dobře splňuje i požadavky z pohledu legislativy, např. snížení celkové spotřeby neobnovitelné primární energie.

Při spalování uhlovodíkových paliv, nebo při využívání jiných primárních zdrojů tepla se v turbíně pro vlastní mechanickou práci nebo výrobu elektrické energie využije cca 30 až 35 % energie obsažené v palivu. Tímto vznikne velké množství tzv. nízkopotenciálního tepla, jež je z velké části odváděno chladicí soustavou, čímž neumožňuje žádné jeho další využití. Toto teplo představuje tepelné ztráty procesu výroby a přeměny energie. Vzhledem k fyzikálním omezením (Carnotův cyklus) není možné toto teplo použít k další výrobě elektrické energie. Při kogeneračním procesu je odpadní teplo naopak výhodně využíváno k vytápění přilehlých objektů, ohřevu teplé užitkové vody, atd.

Obecně lze prohlásit, že v rámci kogeneračních technologií je „kvalitnější“ teplo využito pro výrobu elektrické energie a „méně kvalitní“, nízkopotenciální, pro otop či technologické účely. Takto je možné dosáhnout přibližně 80 % celkové účinnosti vztažené na energetický obsah výhřevnosti paliva. Více o kogeneraci např. v [17], [18].

### **3.6.1 Kogenerační jednotky využívající pístové spalovací motory s rekuperací tepla**

Tyto kogenerační jednotky se skládají z pístového spalovacího motoru, okruhu pro rekuperaci tepla z výfukových spalin tohoto motoru a chladicího okruhu. Spalovací motory se rozdělují podle:

- Typu použitého paliva.
- Podle způsobu zapalování paliva (na vznětové a zážehové - u vznětových motorů dojde k zapálení směsi po stlačení, v případě zážehových motorů dojde k zažehnutí směsi elektrickou jiskrou ve spalovací nebo v předzápalné komoře).
- Počtu a řazení válců - víceválcové motory a jejich uspořádání zrovnoměňuje průběh krouticího momentu přenášeného na hřídel.
- Způsobu úpravy spalovacího vzduchu [8].

### **3.6.2 Regulační vlastnosti**

Zážehové spalovací motory regulují svůj výkon změnou množství paliva a vzduchu. Při částečném zatížení dochází k poklesu dynamického kompresního poměru, což způsobí pokles mechanické a tím pádem elektrické účinnosti. Pokles účinnosti zážehových motorů při polovičním výkonu činí 8 – 10 %. U vznětových motorů se výkon reguluje pouze změnou

množství paliva a dynamický kompresní poměr se tak nezmění. Následkem odlišného pracovního cyklu je nejvyšší účinnost dosahována při zatížení kolem 60 % a při rostoucím zatížení pouze nepatrně klesá.

Změna zatížení je velmi rychlá. Spalovací motory jsou schopny najet na plný výkon za velmi krátkou dobu i ze studeného stavu. Využívají se jako záložní a nouzové zdroje.

Měrný výkon je úměrný rychlosti otáčení. Čím vyšší jsou otáčky, tím vyšší je měrný výkon. Rychloběžné motory jsou levnější v měrných nákladech na instalovanou kW. Tyto motory o malém výkonu ale mají větší ztráty a je zde větší opotřebení. Mimo to potřebují kvalitnější palivo.

Kogenerační jednotky se spalovacími pístovými motory jsou nejrozšířeněji využívaným technologickým řešením pro požadované malé a střední výkony (jednotky, desítky až stovky kW). Jedná se o zcela zvládnuté technické řešení s dlouhou provozní historií. Na trhu jsou v současnosti k dispozici komponenty (motory atd.) či celé sestavy schopné uspokojit požadavky na v podstatě jakoukoliv uvažovanou konfiguraci. V ČR jsou aktuálně v provozu stovky těchto jednotek a v souvislosti s probíhajícími rekonstrukcemi či výstavbou nových malých lokálních energocenter (administrativní objekty, nemocnice, rekonstrukce bývalých blokových kotelen, průmyslové podniky atd.) přibývají každoročně další.

Motorgenerátory těchto kogeneračních jednotek mohou (vzhledem ke koncepci a technickému řešení zahrnujícímu i možnost nouzového chlazení motorů v případě odstavení teplovodního topného okruhu) velice dobře sloužit také jako záložní a nouzové zdroje pro „svě“ objekty v případě blackoutu a rozpadu elektrizační soustavy. Pro tyto účely je dostačující, zejména jednotky o výkonech do několika set kW, dovybavit pouze příslušně výkonnými akumulátory a stanicí pro jejich dobíjení.

### **3.6.3 Vliv kogeneračních jednotek na elektrizační soustavu**

Kogenerační jednotka většího výkonu má vliv na fázor napětí a jeho úhel. Navrhovanou metodou estimace fázorů a frekvence pro elektroenergetické účely je možné detekovat, kdy kogenerační jednotka dodává elektrickou energii do sítě. Vliv na elektrickou síť je patrný především při rozběhu a plyne z její konstrukce. Spalovací motor zážehový či vznětový má určitý počet válců. Právě podle počtu válců spalovacího motoru bude jednotka při připojení elektromechanickým kýváním ovlivňovat elektrickou síť.

Další možností, jakým způsobem lze pohlížet na kogeneraci, je ekonomicky optimální rozmístění jednotek malého a středního výkonu. Vytvoření takového matematického modelu s návrhem akumulace a bivalentního zdroje tepla je např. věnován článek [19].

Výroba elektrické energie v kogeneračních jednotkách a některá její specifika jsou již uvedena. Další text se věnuje provozu elektrizační soustavy, jelikož spolehlivá dodávka elektrické energie je jedním z klíčových parametrů její funkce.

### **3.7 Monitoring v soustavě, přenos, distribuce**

Systemy na úrovni velmi vysokého napětí tvořící páteřní přenosovou síť v České republice, tj. 400 a 220 kV, jsou řízeny a monitorovány specifickými systémy typu SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), apod. Z pohledu distribuční soustavy má význam zaměřit se také na monitorování a detekci fázorů na napěťových úrovních vn a vvn. Především pak z důvodu bilancování a lepší predikce spotřeby, výroby a rovněž díky tomu, že uváděná metoda je schopna detekovat mimořádný stav v soustavě. To je velmi užitečné vědět, vyskytne – li se jakékoliv kolísání napětí v síti, změna frekvence, fází a amplitud obvodových veličin, změna jalového výkonu, apod. K podobným nestandardním jevům dochází vcelku běžně, zvláště pak ke stále obtížnému předpovídání dodávané elektrické energie z obnovitelných zdrojů. S touto situací však v podstatě nelze nic významného dělat, lze ovšem řešit, jakým jiným způsobem by se dal tento systém lépe řídit a monitorovat.

V literatuře je popsáno využití a aplikační možnost zařízení využívajícího měření a vyhodnocování fázorů pomocí PMU (Phasor Measurement Unit) a jeho použití a integraci v systémech monitoringu, ochrany a řízení sítě WAMPaC (Wide Area Monitoring, Protection and Control). V případě použití fázorů se vlastně pro určitý okamžik sítě „odřízne“ a dojde k vyhodnocení parametrů, které z nich můžeme získat. Touto technologií jsou monitorovány a provozovány přenosové sítě.

V souvislosti s výše uvedeným textem je zřejmé, že distribuční sítě budou v dohledné době technologicky provozovány jako koncepty smart grids. O systémech monitoringu sítí rozsáhlé plochy a také o principech a provozu smart grids a jejich technologiích včetně aplikací a výzkumu ve světě jsou věnovány další kapitoly.

Předmětem výzkumu a současné aplikace jsou architektura a principy systémů WAMS (Wide area monitoring system) s PMU. Problematika komunikace, systémů WAMS, vyhodnocení fázorů a sběru dat v PDC (Phasor Data Concentrator) je velmi aktuální. O tom

ostatně dokládají i stále vznikající publikace z konferencí a časopisů. V současnosti dochází k celosvětové integraci a implementaci prvků, které dané sítě využívají.

O dalších aplikačních možnostech, strukturách, funkcích a např. přesnosti měření je uvedeno v [20].

### **3.7.1 Důležitost vyhodnocování a monitoringu**

V srpnu roku 2003 postihl severovýchod USA a část Kanady rozsáhlý blackout. Podle odhadů se ocitlo přes 50 milionů lidí bez elektrické energie [21]. Výpadek velmi rozsáhlé oblasti tehdy způsobila kombinace provozního faktoru, kdy jedno z hlavních přenosových vedení bylo vlivem zatížení více prověšeno a dostalo se do kontaktu s okolními stromy a následné nesprávné vyhodnocení řídicího software. Výpadku také napomohla vedra, která v danou dobu panovala a výkon, který byl rozdělen mezi zbývající přenosová vedení. To následně vedlo k tomu, že musely být i zbývající přenosové linky vlivem přetížení odpojeny. Dalším následkem bylo odstavení několika elektráren a rozsáhlý blackout. Rok 2003 se na velké výpadky elektrizační soustavy ukázal poměrně hojným. I v Evropě se v důsledku nepravděpodobné souhry faktorů ocitl jih Švédska a východ Dánska. Události tehdy odstartovalo nechtěné vypnutí jednoho z bloků jaderné elektrárny a následná závada v rozvodné stanici. Tento blackout se stal v září a v témže měsíci vlivem přetížení soustavy došlo k blackoutu v Itálii. Jako příčinu uvádí tehdejší organizace UCTE (nyní ENTSO-E) přetížení a výboje mezi vedením a přilehlými stromy. Menší blackouty postihly elektrickou soustavu také v roce 2015 v severní části Holandska, v Turecku a v americkém Washingtonu.

Přetížení elektrizační soustavy je poměrně časté v posledních dvou dekadách. V Evropě a České republice za to může také masivní rozšíření obnovitelných zdrojů energie a jejich nevyzpytatelnost z hlediska dodávaného výkonu do soustavy. Přestože jsou k dispozici data s informacemi o proudění vzduchu či dopadajícího slunečního výkonu na plochu pro dané oblasti, stále je řízení jimi dodávaného výkonu složitější než v případě klasických velkých zdrojů, jako jsou uhelné, plynové či jaderné elektrárny.

## **3.8 WAMS**

Výše uvedené zkušenosti ukazují, že výpadky elektrické energie na rozsáhlých oblastech mohou být způsobeny v každém okamžiku, přičemž jakékoliv operace v elektrizační soustavě vyžadují spolehlivější a pokročilejší prostředky k jejímu monitorování.

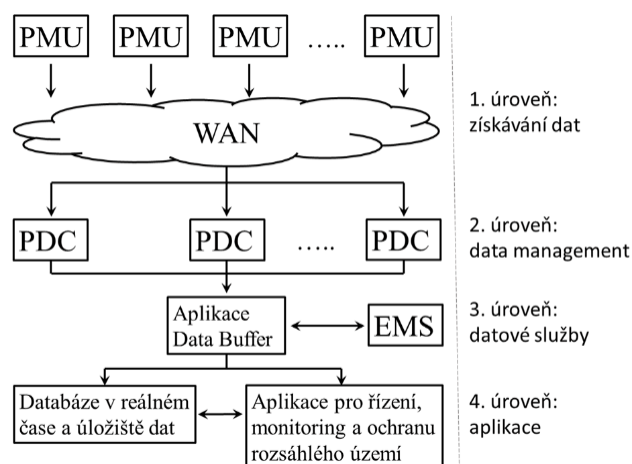
Je potřeba aby se schopnosti těchto systémů vyrovnaly s podmínkami rychle se měnící dynamiky soustavy a tudíž časově synchronizovanému měření.

Dostupnost synchronizovaných měření, poskytovaná měřicími jednotkami fázorů, PMU, je schopna nabídnout pohled na chování elektrizační soustavy v reálném čase. Takto získané znalosti o stavu soustavy vyvolaly vývoj specifických aplikací pro zvýšení efektivity využití soustavy, zajištění bezpečnosti dodávky elektrické energie a zabránění blackoutu. PMU slouží pro časově synchronizovaná měření amplitud a fázových úhlů napětí a proudu. Jednotka je časově synchronizována s časem UTC (Universal Coordinated Time), zároveň je vybavena komunikačním kanálem, který přes GPS odesílá naměřená data. Důležitosti synchronizovaného měření fázorů se věnují např. [22], [23].

Metody monitoringu výkonových systémů založených na měření PMU slouží jako doplněk k systémům RTU (Remote Terminal Unit) a SCADA. SCADA systémy jsou využívány ke shromažďování dat a sledování spotřeby elektrické energie velkých průmyslových závodů, částí měst, apod. a umožňují jejich řízení a zpracování.

Změřené fázory napětí a proudu velkého a rozsáhlého území propojených přenosových sítí jsou využívány jako vstupy pro funkce širokopásmových měřících systémů WAMS (Wide Area Monitoring System). WAMS jsou technologie sloužící ke zvýšení provozní bezpečnosti a spolehlivosti elektrizačních sítí. Výstupy těchto systémů jsou pak k dispozici operátorům, řídicím provozu a analytikům v reálném čase a rovněž slouží jako data z předchozích událostí a provozu. Získaná data využívají expertní systémy ke zvýšení bezpečnosti nebo jako vyhodnocení přenosových schopností sítě, analýzy výkonových ztrát, apod., a slouží tak jako prevence před přetížením či blackoutem. WAMS jsou tedy založeny především na PMU pro monitoring a určení reakce na události během provozu. Ve srovnání se systémy SCADA může WAMS poskytnout operátorovi rychlé a synchronní měření fázorů pomocí PMU. Technologie WAMS se systémy SCADA kooperuje a doplňuje je o získané významné informace o chování sítě. Celkový výsledek slouží k přesnější estimaci stavu systému.





Obrázek 3.2: Zjednodušené blokové schéma systémů WAMS

Základní architektura WAMS je vyobrazena v obrázku výše. Jednotlivé měřicí terminály PMU, které získávají informace o fázorech napětí a proudů z měřicích transformátorů, dodávají data do PDC. Získaná data jsou pak shromažďována ve WAMS centrálním serveru, ve kterém probíhá komunikace s EMS a systémem SCADA, a také komunikace a vyhodnocování s ostatními WAMS v sousedních zemích v korespondenci s protokolem IEEE C37.118. Komunikace probíhá převážně pomocí standardů IEEE 802.1, IEEE 802.2, IEC 61850, apod. Díky WAMS je také monitorována frekvence, přičemž okamžitý stav sítě je vyhodnocen a indikován velikostí fázoru a rozdílem fázových úhlů napětí v různých místech. Naměřené hodnoty jsou vyhodnocovány za každou periodu síťového napětí. Způsoby komunikace v sítích WAMS je věnována např. [24], [25]. Nový pohled na problematiku WAMS, pokročilým metodám zajištění bezpečnosti a spolehlivosti v elektrizační soustavě je podrobně věnována [26].

### 3.8.1 WAMPaC

Systém sloužící k monitorování, ochraně a řízení (WAMPaC) představuje komplexní infrastrukturu, která se skládá z těchto stavebních bloků:

- synchrofázorového měření,
- vysoce přesné časové synchronizace,
- datové komunikace a koncentrace
- aplikace a vizualizačních nástrojů.

Pro tyto systémy není obvyklý design, protože jejich architektura je funkcí potřeb specifických aplikací. Z pohledu výzkumu dochází k rychlému nasazování PMU v elektrických sítích a v důsledku toho vznikají systémy WAMPaC jako pokročilé infrastruktury pro monitoring,

ochranu a řízení. Mezi výzkumná témata se řadí strukturální návrh PMU, jejich umístění, aplikace a různé možnosti funkcí monitoringu rozsáhlých oblastí.

Klasifikace výzkumných aktivit na dané téma zahrnuje především:

- Algoritmy PMU a strukturu PMU/WAMS.
- Odhad stavu systému sestávající z dat PMU nebo na základě těchto údajů.
- Validace modelů, kalibrace, extrakce dat z PMU.
- Detekci událostí, poruch a umístění PMU.
- Sledování a predikce stability a ochran založených na WAMS.

Možnosti výzkumných výzev a příspěvků na daná témata v publikacích IEEE jsou popsány v kapitole 3.9.

### **3.8.2 Adaptační WA systémů pro distribuční sítě**

Zatímco dochází k postupnému nasazení PMU v přenosových sítích, možnosti rozšíření a aplikace v sítích distribučních jsou stále především na úrovni výzkumné. Byly již provedeny studie možného vývoje a implementace PMU, které by především na úrovních hladin vn a vvn mohly přispět k lepšímu monitoringu a zvýšení celkové spolehlivosti. V následujícím textu jsou prezentovány možnosti a výzvy založených na „širokoplošném“ přístupu, který by rovněž mohl vhodně rozšířit či doplnit koncept založený na smart grids. K výzvám patří především zajištění spolehlivosti a vliv připojených obnovitelných a alternativních zdrojů.

Spolehlivost je pro většinu zákazníků považována jako hlavní problém a většina přerušení dodávek energie pochází z distribuční soustavy. Nedostatek monitorovacích a automatizačních systémů je na druhé straně většinou výsledkem ekonomického kompromisu.

Různí autoři zkoumají možnosti nasazení PMU v distribuční soustavě, příspěvky se zaměřují především na robustní umístění měřicích prvků s ohledem na poruchu v soustavě, odhadu stavu distribuční soustavy, či analýzu případů použití PMU, kde poskytují klíčovou pomoc např. při rekonfiguraci systému obnovy zdrojů a ostrovnímu provozu distribuční soustavy [27], [28], [29], [30].

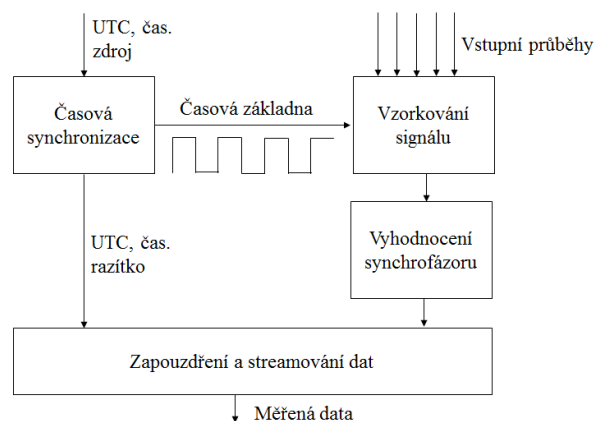
Přístup použití synchrofázorového měření v distribučních sítích tak může přispět k jejich spolehlivějšímu a bezpečnější funkci. Jedna z možností rozšíření uvedených příspěvků, tedy popis nové metody estimace frekvence je právě hlavním cílem této práce popsaným v kapitole 0.

### 3.8.3 PMU

PMU jsou jednotky navržené pro elektrickou síť, které vyhodnocují napěťové nebo proudové průběhy určité frekvence. Z těchto průběhů pak PMU získávají fázory veličin, konkrétně synchronizované fázory vypočtené ze vzorků dat za použití standardizovaného času jako referenční hodnotu pro měření. Jednotky musí být schopny přijímat čas z přesného zdroje, k čemuž slouží GPS, který poskytuje UTC s požadovanou dostatečnou přesností. Dále tyto jednotky vyhodnocují frekvenci signálu. Více o možnostech těchto jednotek je uvedeno v normě [24], [25].

Podle [31] zavedení měření pomocí PMU zlepšuje možnosti monitoringu a analýzy dynamického chování elektrizační soustavy. Tato opatření vedou k rychlému vyhodnocení a efektivním zásahům při nouzových situacích.

K časové synchronizaci slouží časově – synchronizační jednotka, která generuje časovou základnu, tedy stabilní a přesnou interní časovou referenci, kterou používá jednotka pro úpravu signálu a analogově digitální konverzi pro vzorkování vstupních průběhů. Navzorkované průběhy jsou vzorek po vzorku přeneseny k algoritmu odhadu synchrofázoru. Tyto odhadované hodnoty pak dále do jednotky, která slouží k datovému zapouzdření a streamování podle IEEE protokolu [24], [25].



Obrázek 3.3: Blokové schéma obecné PMU

#### 3.8.3.1 Synchrofázor

Za zmínku stojí shrnutí definice synchronního fázoru, synchrofázoru, kde pro periodický sinusový signál  $x(t)$ , za který může být dosazena hodnota napětí či proudu, platí<sup>1</sup>:

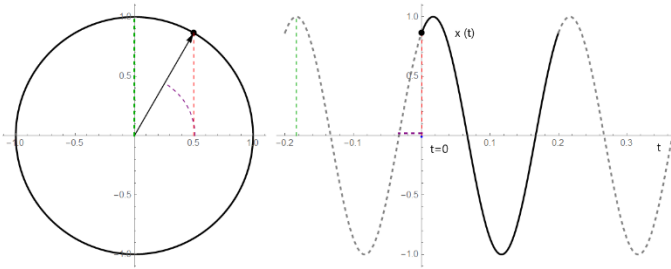
<sup>1</sup> V určitých případech, většinou v anglicky psané literatuře, bývá funkce  $\sin$  nahrazena  $\cos$ .

$$x(t) = X_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (3.1)$$

Pak hodnota fázoru, který je komplexním číslem, může být vyjádřena v těchto tvarech:

$$\hat{X} = \left(\frac{X_m}{\sqrt{2}}\right) \cdot e^{j \cdot \varphi} = \left(\frac{X_m}{\sqrt{2}}\right) \cdot (\cos(\varphi) + j \cdot \sin(\varphi)) = X_r + j \cdot X_i \quad (3.2)$$

Zobrazení obecného fázoru na jednotkové kružnici, úhlového posunu je uvedeno zde:

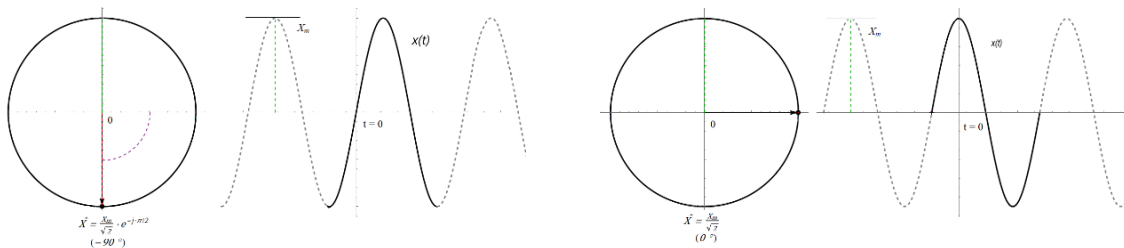


Obrázek 3.4: Fázor jednotkové velikosti a jednotková kružnice

Synchrofázor představuje hodnotu fázoru, kde  $\varphi$  jako hodnota fázového posunu úhlu k periodické funkci je synchronizovaná s UTC.

Pro periodický signál:

$$x(t) = X_m \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi) = X_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi) \quad (3.3)$$



Obrázek 3.5: Zobrazení cosinového a sinového členu fázoru

Zde je  $f_0$  jmenovitá úhlová frekvence (50 Hz), reprezentovaná fázorem v rovnici (3.2). V případě časového měření pak bude i amplituda  $X_m$  chápána jako časová funkce a sinusová funkce také, může být definována funkce  $g(t)$ , která bude označovat odchylku aktuální od nominální frekvence:

$$g(t) = f(t) - f_0 \quad (3.4)$$

Potom periodická funkce bude mít tvar:

$$x(t) = X_m(t) \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \int_{t_0}^t f \cdot dt + \varphi\right) \quad (3.5)$$

$$x(t) = X_m(t) \cdot \cos \left( 2 \cdot \pi \cdot \int_{t_0}^t (f_0 + g(t)) \cdot dt + \varphi \right) \quad (3.6)$$

$$x(t) = X_m(t) \cdot \cos \left( 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + (2 \cdot \pi \cdot \int_{t_0}^t g(t) \cdot dt + \varphi) \right) \quad (3.7)$$

Synchrofázor potom bude:

$$\hat{X}(t) = \left( \frac{X_m(t)}{\sqrt{2}} \right) \cdot e^{j \cdot (2 \cdot \pi \cdot \int_{t_0}^t g(t) \cdot dt + \varphi)} \quad (3.8)$$

V určitých případech se bude hodnota amplitudy časového průběhu rovnat přímo její velikosti  $X_m(t) = X_m$ . Pak je konstantní  $g(t) = \Delta f$  hodnota offsetu od nominální frekvence a platí:

$$\int_{t_0}^t g(t) \cdot dt = \int_{t_0}^t \Delta f \cdot dt = \Delta f \cdot t \quad (3.9)$$

Rovnice popisující synchrofázor se pak zjednoduší na tvar:

$$\hat{X}(t) = \left( \frac{X_m(t)}{\sqrt{2}} \right) \cdot e^{j \cdot (2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot t + \varphi)} \quad (3.10)$$

Tento synchrofázor bude pak rotovat frekvencí  $\Delta f$ . Více o této technice včetně průběhů lze nalézt v [24], [25].

### 3.9 Pohled na problematiku ve světě, vybrané články na dané téma

Výkonová disbalance, riziko přetížení soustavy a následného blackoutu se neustále zvyšuje. Uvedené skutečnosti je třeba brát v úvahu při implementaci nových prvků sloužících k měření, zpracování dat, apod., a dalšímu rozvoji elektrizační soustavy. Z toho důvodu je potřeba zaměřit pozornost na výzkum a vývoj ve světě. Shrnutí vybraných článků a výzkumných témat obsahuje tato kapitola.

O metodě rozdělení elektrizační soustavy do jednotlivých sekcí a následné obnově jejího provozu pojednává článek [32]. V článku je představen nový pohled na strategii během obnovy energetického systému po částečném či úplném blackoutu. Z ekonomického, a také celkově národního významu, byly vyvinuty různé strategie pro rychlé a bezpečné obnovení soustavy. Jedno z nejvíce praktických a ekonomických hledisek spočívá v rozdělení napájecího systému do jednotlivých částí, tzv. ostrovů. Jakmile jsou tyto ostrovy v provozu, následuje proces k celkovému obnovení soustavy. Daný příspěvek má za cíl vyvinout systematický algoritmus pro rozdělení do sekcí s ohledem na různá omezení v soustavě jako schopnost blackstartu

generátorů, rovnováhu mezi dodávaným a odebíraným výkonem, apod. Každý ostrov využívá WAMS a je plně viditelný při komunikaci uvedenou metodou. Tento požadavek je zásadní pro obnovovací proces.

Plánované studie, realizace a integrace systémů WAMS založených právě na datech z PMU jsou řešeny rovněž na národní úrovni. Z článků zabývajících se touto problematikou a celkovým testováním systému je věnováno např. [33], kde v rámci Western Electricity Coordinating Council (WECC) byly provedeny tři testy dynamiky a stability příslušných systémů včetně sběru získaných dat v reálném čase. Z testů systémů vyplývá vliv stability pro dynamické profily v síti. Korelační analýza dat z PMU ukazuje, že je možno sledovat velmi malé dynamické interakce v celé síti se zanedbatelným rušením při provozu systému.

Monitoring sítí využívajících WAMS je aktuální z hlediska potřeb přenosových energetických vedení a silových vedení obecně i z hlediska aktuálního výzkumu ve světě. Z mnoha odborných příspěvků se například různými situacemi, jež se v provozu vyskytují, zabývá článek [34]. Výzkumníky je řešen vliv různých provozních situací na páteřní přenosovou linku v dané oblasti a vliv na celkovou stabilitu v několika případových studiích. V příspěvku je diskutováno optimální rozmístění PMU v síti, popis algoritmu rozdělení sítě do sekcí. Sekcionalizovaná síť je následně upravena tak, aby splňovala požadavky ostrovního provozu a jeho následné obnovy. Podle závěrů vede použití PMU ke snížení celkového počtu ostrovů při obnově sítě a systém se jeví jako efektivní.

Další zmíněný článek [35] se zabývá využitím WAMS v sítích HVDC (High Voltage Direct Current). Cílem je zde návrh praktického systému pro řízení tlumení kolísání napětí HVDC založeném na WAMS. Síť HVDC jsou provázané a charakterizované dobrou říditelností s velkou nastavitelnou přenosovou kapacitou. Výhodou těchto sítí oproti systémům FACTS (Flexible Alternarte Current Transmission Systems) a PSS (Power System Stabilizers). V příspěvku jsou popsány systematické a praktické prostředky pro návrh HVDC systému řízení určené k tlumení napěťového kolísání. Zavedení těchto prostředků má za cíl zlepšení řízení soustavy. Je zde řešena studie z pohledu řídicího a vyhodnocovacího systému aplikovaného na elektrizační soustavu s moderními prvky zvyšujícími spolehlivost, zmíněnými WAMS s PMU. WAMS se tak ukazuje se svými daty jako důležitý a cenný ukazatel zpětné vazby pro řízení a ovládací systémy sloužící k tlumení kolísání v HVDC. Hlavním jádrem článku je nasazení a aplikace řídicího systému pro tlumení oscilací v HVDC pro elektrizační páteřní soustavu na jihu Číny. Podle závěrů článku uvedený systém, založený na WAMS s vícenásobným uspořádáním, může zvýšit tlumení kolísání napětí některých interakčních režimů v soustavě, a

podle testování výsledků z různých provozních podmínek se ukazuje, že navrhované ovládací zařízení je efektivní a robustní.

Podobný případ, jako v předchozím odstavci, ve kterém je elektroenergetická soustava řešena z pohledu řízení, je popsán v článku [36]. Zde je autory zdůrazněno, že regulace uzavřené smyčky elektrizační soustavy založená na získávání dat z WAMS čelí mnoha výzvám týkajících se komunikace, mezi které patří síťová zpoždění, nesoulad datových paketů, či jejich úplná ztráta. Navržené zpětnovazební regulátory sloužící k monitoringu rozsáhlých oblastí elektrizační soustavy jsou v současné době dostatečně robustní proti zmíněným komunikačním negativům. Výpočetní algoritmus se zakládá na metodě LMI (Linear Matrix Inequalities). Článek popisuje způsob řešení zpětnovazebního řízení uzavřené smyčky vycházející z dat WAMS, rovněž uvádí návrh kompenzace komunikačních síťových efektů. Daná výpočetní metoda je založena na synchronizovaném vzorkování v čase. Data po zpracování slouží k získání časového zpoždění při vzdálené zpětné vazbě signálů z datových paketů PMU a následné extrapolaci stavu elektrizační soustavy. Tato metoda závisí spíše na správné synchronizaci měřicího hardwaru než na složitých algoritmech pro zvládnutí časového zpoždění.

Odlišná možnost zpracování dat získaných z komunikace WAMS je uvedena např. v [37]. V článku jsou identifikovány oblasti synchrofázorové datové komunikace, které lze zlepšit pomocí teorie CS (Compressive sampling). Je uvedeno, že výpočetní metoda založená na CS je schopna rekonstruovat synchrofázory ve srovnání s normou [24], [25]. Různé scénáře provozu jsou v korespondenci s [24], [25] a popsány pomocí matematických modelů. Výzvu pro WAMS technologie představují chybějící datové pakety. Výpočetní simulace ukazuje, že chybějící nebo špatně identifikovaná data mohou být uspokojivě rekonstruována pomocí užití CS. Rovněž početní výkonost této metody se jeví být lepší než stávající interpolační techniky. Podle výsledků počítačových simulací se ukazuje, že algoritmy v CS provádí rekonstrukci a vyhodnocení dat uspokojivě také za přítomnosti možného rušení vstupního signálu. Přesnost metody v porovnání s existujícími interpolačními a kompresními technikami využívaných ve WAMS vykazuje lepší výsledky. Testování CS ukazuje, že dynamika elektrizační soustavy může být zachycena pomocí synchrofázorů s frekvencí nižší než dle Shannon Kotělnikova teorému.

Zpracování dat je rovněž uvedeno v [38], především pak z pohledu důležitosti obnovy dat po selhání komunikace. Je důležité správné prostorové rozmístění jednotek PMU a PDC, nejlépe tak, aby se maximalizovaly hodnoty spolehlivosti komunikační sítě. Příspěvek řeší

metodu rozdělení WAMS, návrh nového algoritmu pro současně optimální rozložení PMU a PDC. Předkládaná metoda počítá s instalací jednotek PMU na všech systémových sběrnicích. V následujícím kroku jsou redundantní jednotky postupně vynechány, aby byla zajištěna pozorovatelnost systému s maximální komunikační spolehlivostí. Prokázání a použitelnost metody je provedeno na rozměrově reálných elektroenergetických systémech. Při nepředvídatelné události, jako je ztráta měření a výpadek venkovního vedení, musí být zajištěn spolehlivý chod celé soustavy. K tomu má podle autorů sloužit popsáná výpočetní metoda. Jak ukazují výsledky simulací, dojde k mírnému zvýšení počtu jednotek PMU v soustavě oproti stávajícímu stavu, díky čemuž se tak co nejvíce zvýší spolehlivost komunikační sítě.

V dalším článku [39] je poskytnuto komplexní shrnutí oblasti celé technologie synchrofázorového měření a vyhodnocení. Příspěvek se zabývá komplexním pohledem na problematiku a zároveň aplikaci jednotek PMU jako částí systému rozsáhlého monitoringu, ochrany a řízení. Publikace rovněž uvádí, jak vlastně široká oblast výzkumu a vývoje pod danou problematiku patří. Výzkumné výzvy a okruhy rozděluje do celkem devíti témat:

- SMT (Synchrophasor Measurement Technology) algoritmy a otázky struktury PMU a WAMS.
- Základní problematika a úvod SMT, PMU a WAMS.
- Techniky umístění jednotek PMU v síti.
- Odhad stavu sítě sestávající se z dat PMU nebo jež je na nich založen.
- Validace modelu, kalibrace a extrakce dat z PMU.
- Detekce poruch a jejich umístění pomocí PMU.
- Dynamická stabilita, monitoring a předpověď stavu založené na WAMS.
- Řízení strategie provozu založené na WAMS.
- Systémy ochrany založené na WAMS.

Rovněž v tomto přehledu se ukazuje komplexnost a provázanost WAMS mezi oborově různě zaměřenými oblastmi. Mezi tyto oblasti náleží elektroenergetika, systémy sítí a komunikací, řízení, měření a vyhodnocení dat, a také jejich zpracování. Zároveň jsou v článku popsány typy používaných algoritmů.

V publikaci [40] se uvádí možnosti, jak zlepšit komunikační infrastrukturu, jakým způsobem optimálně rozmístit PMU a možnosti adaptability navrhované metody. Cílem je návrh metody pokročilé komunikace společně s nalezením nákladově optimálního řešení. Účinnost a použitelnost metody je zároveň ověřena standardy IEEE. Metoda komunikační



infrastruktury je zobecněna kritériem n-1 a je navrženo řešení optimalizující počet rozmístění PMU. Srovnání výsledků získaných navrhovanou metodou ukazují, že dílčí optimalizace může vést ke globální optimalizaci celé komunikační sítě.

Aplikace PMU a WAMS v Evropě, především pak ve Švýcarsku, Itálii a s nimi propojenými soustavami, příklady užití technologií a data z monitoringu jsou uvedeny v [41]. Cílem je zde zlepšení detekce dynamického chování elektrizační sítě a zároveň zvýšení množství pozorovaných dat, která jsou dodávána technologií WAMS. Důraz je kladen hlavně na výměnu dat PMU mezi různými provozovateli přenosových soustav, a to především fázorů napětí a údajů o frekvenci během online operací a zásahů do soustavy.

Optimální rozmístění jednotek PMU a problém komunikační infrastruktury, konkrétně šíření datového zpoždění, rovněž popisuje článek [42]. Cílem je zde prozkoumat proveditelnost mikrovlnné komunikace jako alternativy k existujícímu systému.

Zatím jeden z posledních vydaných článků [43] uvádí WAMS a PMU jako systémy pro optimalizaci parametrů, tedy rozmístění PMU a PDC, a také komunikační infrastruktury při instalaci optických vláken. S využitím daných technologií je zároveň zmíněno, že největší překážkou pro rozšíření technologie WAMS jsou obrovské investiční náklady. Pro zvýšení robustnosti systémů jsou modelovány následky všech možných kontingencí založených na n-1 početní metodě. Také náklady na samotný systém řízení energie lze optimalizovat a tím snížit celkové náklady provozní.

Problematika optimálního rozmístění a komunikací jednotlivých PMU je rozebírána také ve [44], [45], [46].

Technologie vycházející z WA(x) s PMU získávají data pro další zpracování z rozsáhlých oblastí a stejně tak rozsáhlá oblast se zabývá jejich výzkumem a možnými výzvami, jak je již výše uvedeno. V dalším textu kapitoly je uveden zbývající stručný přehled odborných publikací založených na problematice.

Za zmínku stojí také příspěvky týkající se srovnání výpočetního algoritmu průchodu nulou a zjištění RMS [47], nebo porovnání kvality elektrické energie získané diskretní Fourierovou transformací [48], [49]. Jakým způsobem spojit zpracování dat z WAMS, a doplnit tak vhodně SCADA, je věnováno např. v [50]. Výzkumníci v článku popisují jedno z možných nastavení koordinace systémů.

Dále pak příspěvek [51] se zabývá technologií PMU, kolísáním frekvence a možnou implementací v sítích nízkého napětí. Detekce frekvence a jedno z možných optimálních nastavení monitoringu elektrizační soustavy je v [52].

Výše uvedený text ukazuje pouze část zabývajících se hlavními problémy a výzvami v elektrizačních přenosových soustavách, kde jsou užívány, nebo v budoucnu budou užívány jednotky PMU pro získávání dat, řízení a jako součást infrastruktury WA(x). Neméně důležitou oblastí jsou také témata zabývajících se kybernetickou bezpečností, ochranami proti napadení datových systémů a hacknutí, která jsou uvedena např. v [53] a [54]. Výzkum se dále zaměřuje i na aplikaci genetických algoritmů pro zvýšení spolehlivosti WAMS [55]. Hlavním cílem této kapitoly je uvést přehled řešené oblasti výzkumu a poukázat na obsáhlou a aktuální problematiku.

### **3.10 Dílčí Shrnutí**

Výše popsané technologie jsou vhodné pro detekování mimořádných stavů, které se v elektrizační soustavě vyskytují. Lze nalézt vcelku obsáhlé odborné příspěvky vztahující se k tématu integrace a využití WAMS založeném na vyhodnocování dat z jednotek PMU. Uvedená problematika je aktuální a nabývající na významu z hlediska aplikace v konkrétních provozovaných energetických elektrických sítích a zároveň z pohledu výzkumných aktivit na dané téma. Témata a priority výzkumu ve světě na problematiku je důležité zmínit, neboť doplňují objektivní posouzení oblasti rozvoje.

Použití a instalace systémů pracujících na uvedeném principu monitoringu vzrůstá a rozšiřuje se. Výzkum v Evropě, USA i ve světě se orientuje počítačové simulace a modely pro různé scénáře a případové studie možných vyskytovaných běžných i nepředvídatelných stavů v provozu soustavy. Také se z pohledu výzkumu hledají efektivní algoritmy výpočtu a zpracování dat z PMU, jejich rychlejší a přesnější vyhodnocení. Důležité je rovněž správné fungování komunikačních procesů, zpracování získaných dat a jejich shromažďování z důvodu např. vyhodnocení situací a reakcí systému na podobnou či identickou událost z dřívějšího atd.

## **4 Frekvence a její estimace v elektrických sítích**

Ke správné funkci moderních způsobů monitoringu, regulace, řízení elektrizační soustavy je nezbytné přesně vyhodnotit a zpracovat získaná data. Důležité je znát přesnou hodnotu frekvence a fázorů obvodových veličin.

Na kvalitu dodávané elektrické energie jsou kladeny určité požadavky, především pak na hladinu napětí a na frekvenci. Zvýšení odebíraného činného a jalového výkonu se projeví na změně obou kvalitativních parametrů. Je třeba dané parametry sledovat a vyhodnocovat, zvláště pokud je porušena rovnováha mezi dodávaným (vyráběným) a odebíraným (spotřebovávaným) výkonem. V případě napětí je za normálních provozních podmínek dovolená odchylka  $\pm 10\%$  pro síť vvn a  $\pm 5\%$  pro síť zvn (v ČR síť 400 kV). Co se týká frekvence, je povolená odchylka  $\pm 1\%$ , tato odchylka je u synchronního připojení k propojenému systému.

Je však dobře známé, že napětí nebo proudy, zvláště při velkých poruchách, budou mít k ideálnímu sinusovému průběhu daleko. A právě v takovýchto případech bude nutné frekvenci správně a přesně vyhodnotit. V této kapitole se popisují a definují některé principy konvenčních metod estimace frekvence a výpočtu fázorů. Uvést daný přehled a popsání funkce jednotlivých je důležité, jelikož bude srovnávána přesnost výsledků s navrhovanou metodou.

## 4.1 Vzorkování signálu

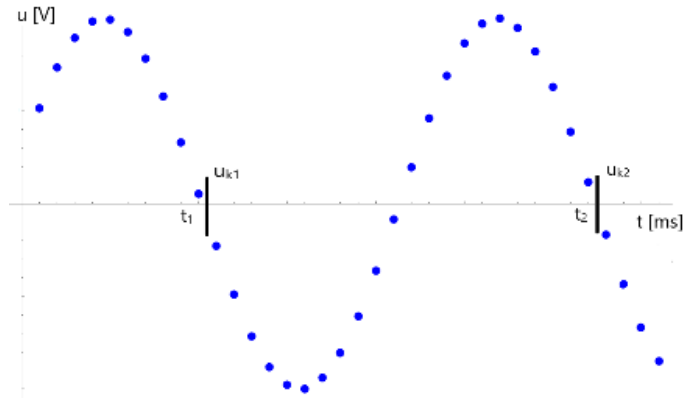
Co se týká určení a vyhodnocení frekvence periodického signálu, lze použít řadu nástrojů. Vzorkovací metoda, nazývaná též detekce průchodů nulou, spočívá v tom, že se stanoví určitá úroveň signálu a podle zvoleného počtu vzorků za sekundu a vzorkovací periody, lze určit frekvenci signálu. Pro detekovaný signál musí platit Shannon Kotělnikovův teorém, tedy že vzorkovací frekvence musí být alespoň dvojnásobná (v praxi i více než desetinásobná) oproti maximální frekvenci obsažené ve vzorkovaném signálu ( $f_v > f_m$ ).

Pro periodu  $T$  (s) bude platit:

$$T = (k_1 - k_2) \cdot T_s \quad (4.1)$$

Koeficienty  $k_1$  a  $k_2$  jsou čísla vzorku po 1. a 2. průchodu signálu nulou.  $T_s$  je perioda vzorkování (ms). Frekvence (Hz) je potom převrácená hodnota:  $f = \frac{1}{T}$ .

Situace je znázorněna na obrázku:



Obrázek 4.1: Princip vzorkování signálu a průchodů nulou

Přesnost této metody hodně závisí na zvoleném počtu vzorků na periodu. Při neceločíselném počtu vzorků na periodu mohou být výsledky určení frekvence nepřesné. Záleží také na kvalitě vstupního signálu. V následujícím textu bude uveden popis této metody a ověření na příkladech periodické funkce.

#### 4.1.1 Detekce frekvence pomocí vzorkovací metody

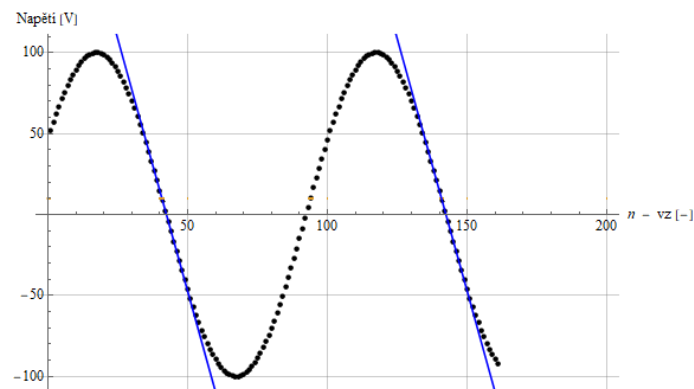
V této kapitole je popsána aplikace a popis vzorkovací metody na příkladu a možnosti jejího fungování včetně vyobrazení metody na hladké periodické funkci a funkci s rušením.

##### Hladká periodická funkce

Pro obecný periodický signál platí, že jej můžeme popsat pomocí periodické funkce, jak je zmíněno v kapitole 3.8.3.1.

Pokud bychom si vzali obecný signál se stejnosměrnou složkou, pak rovnice, která jej popisuje, může být:

$$y(t) = 100 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t + \varphi) \quad (4.2)$$



Obrázek 4.2: Hladká periodická funkce

Tento periodický signál je navzorkován frekvencí 5 kHz, (zvolena perioda vzorkování  $t_{vz} = 0,0002$  s).

Algoritmus výpočtu spočívá v určení vhodné úrovně, kde frekvenci vyhodnotit. Aby vzorkovací metoda pro určení frekvence fungovala správně, je potřeba zvolit vhodnou úroveň.

Jak je vidět na obrázku 4.2, jsou v daném průsečíku zkoumaného signálu a úrovně, kde je frekvence určována, dvě protínající přímky ve tvaru:

$$y_1(x_1) = b_1 - a_1 \cdot x_1 \quad (4.3)$$

$$y_2(x_2) = b_2 - a_2 \cdot x_2 \quad (4.4)$$

A rovnice úrovně, což je konstanta:

$$y_3(x) = c \quad (4.5)$$

Výpočet periody je pak:

$$y_1(x_1) = y_2(x_2) = y_3(x) = 50 \quad (4.6)$$

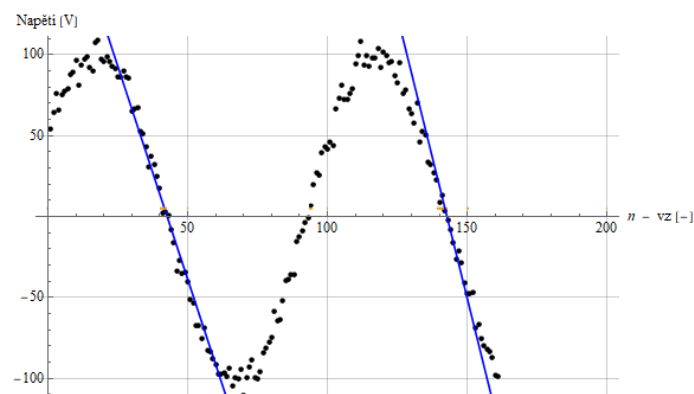
Tímto způsobem se vypočítají kořeny a jejich rozdíl vynásobený periodou vzorkování je výsledkem periody signálu. Frekvence je následně převrácená hodnota takto vypočtené periody.

Více popisu včetně vyhodnocení chyby metody, jež je v použití na hladkém signálu velice přesná, je uvedeno např. v [56].

## Periodická funkce s rušením

Mnohem častěji je důležitější znát, jak se daná metoda zachová v případě, kdy bude zkoumaný periodický signál obsahovat rušení. Tento šum základní harmonické může být v provozu způsoben z mnoha důvodů, např. díky frekvenčním měničům, nelineární charakteristice spotřebičů (drážky ve statoru či rotoru indukčních strojů, svářečky, obloukové pece, apod.)

Jak je vyobrazeno na následujícím obrázku, sklon protínajících tečen je rozdílný ve srovnání, kdy data budou aproximovat průběh hladké funkce.



Obrázek 4.3: Periodická funkce s uvažovaným rušením

### 4.1.2 Postup výpočtu frekvence

V případě periodického signálu, který bude v sobě obsahovat šum, je postup vyhodnocení frekvence stejný, jako u signálu s hladkým průběhem. Tento šum má vliv na relativní chybu metody a lze předpokládat, že větší počet bodů, ze kterého se bude zpracovávat lineární aproximace, bude mít také vliv na přesnější určení frekvence. Lze tedy tvrdit, že se zvyšujícím počtem bodů pro interpolaci, bude celková relativní chyba klesat. Vyhodnocení na konkrétním případě včetně závislosti chyby na počtu bodů je uvedeno v [56].

## 4.2 Harmonická analýza

Harmonická analýza slouží k popisu libovolného periodického signálu pomocí součtu kosinových a sinusových průběhů, přičemž frekvence je dána celočíselným násobkem její základní harmonické složky. K rozložení periodické funkce se využívá Fourierova transformace. Je důležité popsat, jak fungují Fourierovy transformační algoritmy a jaké jsou případné problémy při tomto zpracování signálu.

### 4.2.1 Fourierova řada

Harmonická analýza využívající vyjádření pomocí Fourierovy řady je důležitá a využívána např. při zpracování signálů, kontroly dynamiky systémů aj. Nejběžnější popis periodické funkce jako součet sinů a kosinů je:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n \cdot \omega_0 \cdot t) + \sum_{i=1}^{\infty} b_n \cdot \sin(n \cdot \omega_0 \cdot t) \quad (4.7)$$

Kde  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ , ( $s^{-1}$ ) je frekvence základní harmonické složky,  $n$  (-) představuje násobek  $n$ -té harmonické. Koeficient  $\frac{a_0}{2}$  vyjadřuje stejnosměrnou složku signálu,  $a_n, b_n$  jsou koeficienty  $n$ -té harmonické, platí pro ně:

$$a_0 = \frac{2}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot dt \quad (4.8)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \cos(n \cdot \omega_0 \cdot t) \cdot dt \quad (4.9)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \sin(n \cdot \omega_0 \cdot t) \cdot dt \quad (4.10)$$

V elektrizační soustavě předpokládáme, že průběh zkoumané funkce je sinusový, nebo se sinusovému průběhu co nejvíce blíží, a to i třeba s uvažovaným šumem. V takovém případě je výše uvedený popis méně vhodný. Pokud preferujeme použití pouze funkce sinus:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} c_n \cdot \sin(n \cdot \omega_0 \cdot t + \varphi) \quad (4.11)$$

U výše uvedené rovnice je využito fázového posuvu a náhradou kosinových členů a platí, že  $\varphi = \arctan\left(\frac{a_n}{b_n}\right)$ ,  $c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ .

### 4.2.2 Fourierova transformace

Pro matematické vyjádření je použita spektrální funkce  $F(\omega)$ . Tato spektrální funkce představuje Fourierův obraz signálu funkce  $f(t)$ :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt \quad (4.12)$$

Výše uvedený vztah vyjadřuje Fourierovu transformaci (FT) signálu, jde o lineární integrální transformaci spojité funkce  $f(t)$ .

Pro obraz  $F(\omega)$  ve frekvenční oblasti:

$$F(\omega) = |F(\omega)| \cdot e^{j \cdot \arg(F(\omega))} \quad (4.13)$$

Modul  $|F(\omega)|$  udává amplitudové spektrum,  $\arg(F(\omega))$  udává fázové spektrum zkoumaného signálu  $f(t)$ . Zpětná FT a podrobněji o FT obecně a podmínkách jejího použití např. v [57] nebo v [58].

### 4.2.3 Diskrétní Fourierova transformace

Zobrazení spojitých signálů a jejich analýza pomocí FT je velmi používaným nástrojem, jelikož umožňuje vzájemně jednoznačný převod signálů z/do časové reprezentace do/z reprezentace frekvenční. Pro analýzu a transformaci diskrétního signálu je zavedena Diskrétní Fourierova transformace (DFT), která je pro technickou praxi vhodnější. Jeho použití je široké a zahrnuje spektrální analýzu, kompresi dat, výpočet parciálních diferenciálních rovnic, apod.

Jde o numerickou metodu, ve které se diskrétní hodnoty získají vzorkováním v čase zkoumané funkce. Bude – li vstupní signál funkce  $f(n)$ ,  $n = 0, \dots, N - 1$ . Potom obraz  $F(k)$  na funkci  $f(n)$  se bude nazývat Fourierovo spektrum (tedy výsledek DFT):

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cdot e^{-\frac{2\pi \cdot j \cdot k \cdot n}{N}} \quad (4.14)$$

Pro zpětné získání funkce, tedy inverzní DFT platí:

$$f(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} F(k) \cdot e^{\frac{2\pi \cdot j \cdot k \cdot n}{N}} \quad (4.15)$$

### 4.2.4 Rychlá Fourierova transformace

Algoritmus Rychlé Fourierovy transformace (FFT) byl publikován v roce 1965 a díky své efektivitě výpočtu se snadno prosadil do praxe. V případě výpočtu DFT by vyhodnocení zabralo  $O(n^2)$  operací. Počet kroků algoritmu je tedy úměrný kvadrátu počtu vzorků, jde o kvadratickou složitost výpočtu. V případě FFT se jedná o efektivní algoritmus, který má numerickou náročnost výpočtu  $O(2 \cdot n \cdot \log_2 n)$ . Algoritmus je založený na mocninách dvou a je nejrozšířenějším typem FFT. [58] Díky tomu dojde k obrovskému zrychlení analýzy zkoumané funkce.



## 4.2.5 Ostatní metody určení frekvence

Je důležité zmínit, že pro určení frekvence existuje mnohem více metod, než je zmíněno v této práci. Jako jednu z nich lze uvést Finite Rate of Innovation (FRI). Algoritmus vzorkování je považován za "State of the Art" pro aplikaci signálového zpracování, vzorkování komunikačních systémů, aj., je důkladně popsán v [59].

Touto metodou je možné detekovat vysoké frekvence zatížené šumem i s jejich případnou rekonstrukcí, pokud dojde k výpadku několika period signálu. Podle [59] je možné získat sinusové vlny s libovolně vysokou frekvencí spolu s přesným umístěním spínacích bodů. FRI tak představuje velice silný nástroj, vhodný pro dosažení minimální vzorkovací frekvence, který je možné použít pro spoustu aplikací. Jak je například uvedeno v článcích [60], [61], [62], [63], pro vzorkování v širokopásmové komunikaci, formulaci vícedimenzionálních signálů, zpracování biologických signálů, vylepšení rozlišení obrazové analýzy apod.

Výzkum a použití metody je tak možný v celé řadě technických oblastí, kde je potřeba zpracovat a vyhodnotit periodický signál. Z hlediska aplikace FRI v elektroenergetice pro detekci frekvence jde o skoro nadbytečně silný algoritmus. Pokud by totiž nastala situace potřeby rekonstrukce frekvence touto metodou, např. po výpadku pěti, deseti a více period, je velmi pravděpodobné, že výsledný poruchový stav je natolik vážný, že není důvod se zabývat přesností určení frekvence.

## 4.3 Detekce fázoru

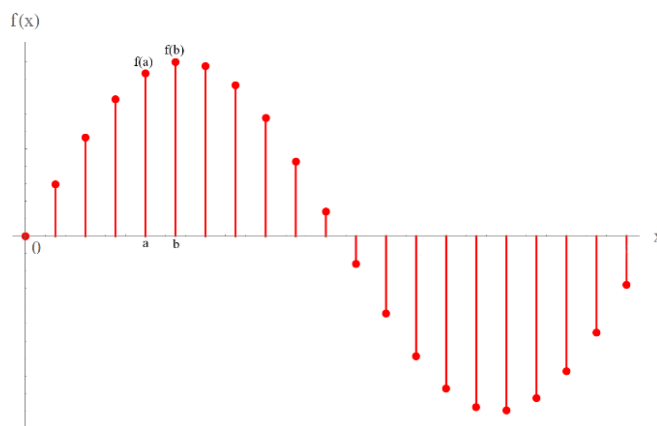
Fázor, jak je uvedeno, udává informaci o amplitudě a fázovém posunu harmonické veličiny. Fázor se používá pro popis veličin a v analýze střídavých elektrických obvodů, jelikož popisuje chování energetického systému v ustáleném stavu. Sada synchronních fázorů poskytuje užitečné informace pro zjištění stavu sítě, spolehlivosti, bezpečnosti a také poskytuje informace, které jsou důležité například pro určení lokalizace poruchy v síti, amplitudě, tedy proudové zatížitelnosti nadzemního vedení, a dále poskytuje důležité informace pro řízení výkonových toků založených na polovodičových výkonových prvcích, tedy FACTS. Jedna z nejdůležitějších aplikací popisu synchronních fázorů pro elektrické sítě je lokalizace poruch, a to z důvodu co nejpřesnějšího popisu. Aby mohly zařízení FACTS pro řízení činných, jalových výkonů, napětí a proudů v soustavě správně fungovat, je důležité správně vyhodnotit vstupní parametry, tedy vstupní fázory napětí a proudů, a také přesné určení frekvence vstupního signálu.

### 4.3.1 Využití Simpsonova integrálu

Pro analýzu signálu bylo využito numerické integrace pomocí Simpsonova pravidla. Tato metoda umožňuje vypočítat určitý integrál signálu. Numerické integrace využívá pro aproximaci funkce  $f(x)$  kvadratický polynom (tedy parabolické oblouky místo přímek, které se používají u lichoběžníkového pravidla). Simpsonovo pravidlo lze odvodit integrací prokladu třetího řádu Lagrangeova interpolačního polynomu ve třech rovnoměrně rozmístěných bodech. V tomto případě platí pro funkci  $f(x)$ :

$$\int_a^b f(x) \cdot dx \approx \frac{b-a}{6} \left[ f(a) + 4 \cdot f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right] \quad (4.16)$$

Při použití této metody je nutné znát funkční hodnoty pro body  $f(a)$ ,  $f(b)$  a také  $f\left(\frac{a+b}{2}\right)$ . Je vidět, že čím blíže budou body  $a$  a  $b$ , tím bude hodnota integrálu přesnější. Výsledek je přes sumu všech vzorků zkoumaného signálu.



Obrázek 4.4: Ukázka koeficientů v Simpsonově pravidlu

Vzhledem k tomu že pravidlo používá kvadratické polynomy na aproximované funkce, dává vlastně přesné výsledky při aproximaci až do kubického stupně, což je dostačující pro řešení analýzy signálu v našem případě. Více o Simpsonově pravidle pro numerické integrování je uvedeno například v [63].

### 4.3.2 Určení fázoru

Pro výpočet je velmi užitečné rozdělit libovolnou periodickou funkci na řadu harmonických funkcí a v lineárních obvodech je možnost řešit je samostatně, a poté sjednocením získat řešení původního problému, nebo k jeho přiblížení, které je žádoucí, či praktické z hlediska přesnosti. Využijí se tedy metody harmonické analýzy a numerického výpočtu integrálu k získání a výpočtu fázoru z navzorkovaného signálu.

Z Eulerova vztahu platí:

$$e^{j\xi} = \cos(\xi) + j \cdot \sin(\xi) \quad (4.17)$$

$$\sin(\xi) = \text{Im}(e^{j\xi}) \quad (4.18)$$

Pro obecný harmonický signál platí:

$$x_b(t) = X_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (4.19)$$

Fázor se pak určí jako:

$$x_b(t) = X_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = \text{Im}(X_m \cdot e^{j\varphi} \cdot e^{j\omega t}) = \text{Im}(\hat{X}_m \cdot e^{j\omega t}) \quad (4.20)$$

$$\hat{X}_m = X_m \cdot e^{j\varphi} \quad (4.21)$$

V tomto případě člen (4.21) udává fázor z hodnoty maxima funkce.

Obdobně pro kosinový signál:

$$\begin{aligned} x_a(t) &= X_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) = X_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2} + \varphi\right) = \\ &= \text{Im}(X_m \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot e^{j\varphi}) \end{aligned} \quad (4.22)$$

Potom platí:

$$x_a(t) = \text{Im}\left(X_m \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot e^{j\varphi}\right) = \text{Im}(X_m \cdot j \cdot e^{j\omega t}) \quad (4.23)$$

Po provedení součtu výše uvedených vztahů:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_b(t) + x_a(t) = b_n \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) + a_n \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) = \\ &= \text{Im}(b_n \cdot e^{j\omega t}) + \text{Im}(a_n \cdot j \cdot e^{j\omega t}) = \text{Im}[(b_n + j \cdot a_n) \cdot e^{j\omega t}] \end{aligned} \quad (4.24)$$

Výše uvedený vztah představuje součet sinů a kosinů jako náhradu periodického signálu s danými koeficienty  $a_n$ ,  $b_n$ , což jsou koeficienty Fourierovy řady.

### 4.3.3 Výpočet výkonů

V této kapitole bude uvedeno, jakým způsobem lze ze zpracovaného signálu získat z fázorů hodnoty pro činný a jalový výkon. Pro okamžitou hodnotu elektrického výkonu platí:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (4.25)$$

Pro napětí a proud platí, že jsou to harmonické funkce:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_u) = U_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T} + \varphi_u\right) \quad (4.26)$$

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_i) = I_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T} + \varphi_i\right) \quad (4.27)$$

Pro střední hodnotu výkonu platí:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_{t=t_1}^{t_1+T} p(t) \cdot dt = \int_{t=t_1}^{t_1+T} u(t) \cdot i(t) \cdot dt = \quad (4.28)$$

$$= \frac{1}{T} \cdot \int_{t=t_1}^{t_1+T} \left( U_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T} + \varphi_u\right) \right) \cdot \left( I_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T} + \varphi_i\right) \right) \cdot dt \quad (4.29)$$

$$= \frac{U_m \cdot I_m}{T} \cdot \int_{t=t_1}^{t_1+T} \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T} + \varphi_u\right) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T} + \varphi_i\right) \cdot dt = \quad (4.30)$$

$$= \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_i)$$

Výše uvedený vztah vyjádřený z efektivních hodnot může být s použitím Eulerova vztahu vyjádřit výkon jako součin fázorů napětí a proudu s komplexním sdružením:

$$P = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_i) = U \cdot I \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_i) = U \cdot I \cdot \operatorname{Re}(e^{j(\varphi_u - \varphi_i)}) = \quad (4.31)$$

$$= \operatorname{Re}(U \cdot I \cdot e^{j(\varphi_u - \varphi_i)}) = \operatorname{Re}(U \cdot e^{j(\varphi_u)} I \cdot e^{j(-\varphi_i)}) = \operatorname{Re}(\hat{U} \cdot \hat{I}^*) \quad (4.32)$$

O porovnání přesnosti statistické a interpolační metody pro určení výkonů je v [56].

## 4.4 Použití fázorů při výpočtu ustáleného stavu v soustavě

Informace a data získané z PMU je možné dále zpracovávat. Jedna z možností, ke které se také dají fázory využít, je výpočet ustáleného stavu, v tomto případě pomocí metody vážených nejmenších čtverců.

### 4.4.1 Metoda vážených nejmenších čtverců

Pro vyřešení odhadu ustáleného stavu bylo vyvinuto mnoho různých metod. V energetických systémech je běžně používaná metoda vážených nejmenších čtverců. Svou výpočetní jednoduchostí patří mezi nejpoužívanější výpočetní metody. Cílem této metody je minimalizovat vážený součet čtverců mezi rozdíly odhadovaných a naměřených hodnot.

Stručný popis metody je uveden v této kapitole. Díky existenci chyby měření lze samotné měření lze vyjádřit jako:

$$\vec{z} = h(\vec{x}) + \vec{v} \quad (4.33)$$

Kde  $\vec{z}$  je vektor získaný z měření obsahující reálné a imaginární části naměřených fázorů napětí a proudů,  $\vec{x}$  označuje stavové proměnné obsahující reálné a imaginární části fázorů napětí,  $\vec{v}$  je vektor chyby měření,  $h(\_)$  popisuje nelineární vztah mezi měřeními a stavovými proměnnými.

Za předpokladu, že  $\vec{v}$  má normální rozdělení:

$$E(\vec{v}) = 0 \quad (4.34)$$

$$E(\vec{v} \cdot \vec{v}^T) = R \quad (4.35)$$

Kde  $R$  je kovarianční matice chyb měření.

Maximální pravděpodobnost odhadu  $\vec{x}$  je hodnota, která minimalizuje výkonost indexu vážených nejmenších čtverců:

$$J(\vec{x}) = [\vec{z} - h(\vec{x})]^T \cdot R^{-1} \cdot [\vec{z} - h(\vec{x})] \quad (4.36)$$

Pokud je bílý šum (náhodný signál s neomezeným spektrem, kde hodnoty v různých bodech mají nulovou korelaci) nezávislý na naměřených hodnotách, pak platí pro matici  $R$ :

$$R = \text{diag}(\vec{v}^2) = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_1^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Kde  $m$  je číslo měření.

Rovnice (4.36) a (4.37) ukazují, že vážení je nastaveno jako inverzní vůči matici šumu. Proto měření o vyšší kvalitě má nižší hodnotu šumu a větší váhu, zatímco nízká kvalita měření má vyšší hodnotu rušení a váhu nižší.

Minimální hodnotu  $J(\vec{x})$  lze vypočítat na základě:

$$\frac{\partial J(\vec{x})}{\partial x} = 0 \quad (4.38)$$

Vložením (4.36) do rovnice (4.38) vychází:

$$H(\vec{x}) \cdot R^{-1} \cdot (\vec{z} - h(\vec{x})) = 0 \quad (4.39)$$

Kde  $H(\vec{x})$  je Jakobiho matice funkcí z měření  $h(\vec{x})$ . Pro  $H(\vec{x})$  platí:

$$H(\vec{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial h_2}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_m}{\partial x_1} & \frac{\partial h_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Kde  $n$  je počet stavových proměnných.

Nelineární funkci  $h(\vec{x})$  lze linearizovat rozšířením do Taylorovy řady okolo bodu  $x_0$  s vynecháním členů vyšším než 2 a více.

$$h(\vec{x}) \approx h(\vec{x}_0) + H(\vec{x}_0) \cdot \Delta\vec{x} \quad (4.41)$$

Rovnice (4.39) a (4.41) lze řešit iterativními metodami, jako je např. Newton Raphsonova metoda. Při  $(k + 1)$  iteraci mohou být stavové proměnné vypočteny z jejich  $k$ -té iterace.

$$\Delta\vec{x}^{(k)} = \left[ H^T(\vec{x}^{(k)}) \cdot R^{-1} \cdot H^T(\vec{x}^{(k)}) \right]^{-1} \cdot H^T(\vec{x}^{(k)}) \cdot R^{-1} \cdot [\vec{z} - h(\vec{x}^{(k)})] \quad (4.42)$$

$$\vec{x}^{(k+1)} = \vec{x}^{(k)} + \Delta\vec{x}^{(k)} \quad (4.43)$$

Iterační výpočet může skončit, pokud splňuje následující kritérium:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (\vec{x}_i^{(k+1)} - \vec{x}_i^{(k)})^2} < \varepsilon \quad (4.44)$$

Nebo:

$$|J(\vec{x}^{(k+1)}) - J(\vec{x}^{(k)})| < \varepsilon \quad (4.45)$$

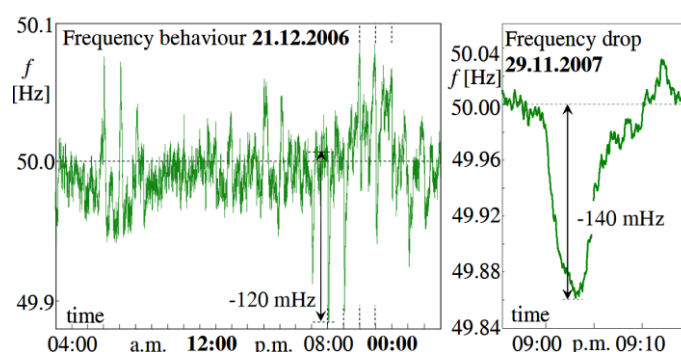
Kde  $\varepsilon$  je předem stanovený konvergenční koeficient.

Více o aplikacích a použití lze nalézt např. v [31].

## 5 Navrhovaná metoda estimace frekvence

Odhad frekvence a následné určení fázorů v síti je důležitá část pro popis dějů pobíhajících v elektrizační soustavě. Poskytnuté informace jsou rozhodující z hlediska zvýšení spolehlivosti, bezpečnosti a popisu kvality elektrické energie. Hlavním jádrem této práce je navrhovaná metoda pro odhad těchto důležitých elektrotechnických veličin. Formulací tohoto výzkumného problému je věnován následující text.

Mnoho vědeckých prací se zabývá přesnými fázorovými výpočty s ohledem na proměnlivý kmitočet. Předpoklad základní frekvence systému napájení je 50 (resp. 60) Hz, nemusí být zcela správný. Zaprvé, elektrická síť je vždy dynamický systém. Zadruhé, kvůli některým výše zmíněným důvodům (OZE, apod.) v moderních elektrizačních soustavách, má základní frekvence často relativně velké odchylky od nominální hodnoty. V následujícím grafu je vyobrazena odchylka od základní frekvence v elektrizační soustavě v Evropě [66].



Obrázek 5.1: Odchylka od základní frekvence v elektrizační soustavě Evropy, převzato z [66]

### 5.1 Navrhovaná metoda estimace frekvence využívající výpočet směrodatné odchylky

Podstatou popisované metody pro detekci fázorů a frekvence je numerická integrace a statistická analýza založené na minimalizaci směrodatné odchylky klouzavého průměru. Tato metoda slouží pro odhad okamžité frekvence signálu ovlivněného šumem. Vyhodnocení fázorů se provádí optimalizací pomocí prokladu parabolou.

Algoritmy pro popis frekvence časově proměnných signálů byly vyvinuty za účelem analýzy kvality elektrické energie. Více typů možností detekce signálu je uvedeno např. v [65].

K celkovému zlepšení stability elektrizační soustavy je možné přispět instalací PMU a zpracováním jejich dat. Správný a přesný odhad stavu je klíčový pro analýzu nepředvídaných

událostí, řízení stability a optimalizaci toku elektrické energie. Tato vyhodnocení dat jsou důležitá pro EMS, proto musí mít měření z hodnot fázorů veličin vysokou přesnost.

### 5.1.1 Analýza vstupního signálu a popis metody

Víme z praxe, že průběh vstupního signálu bývá často zkreslen jinými signály různých frekvencí. Je pak nutné vybrat signál o jedné frekvenci, zpravidla té hlavní. Extrakce jedné složky frekvence se provádí například pomocí výpočtu Fourierovy transformace. U diskretních systémů pak pomocí diskretní Fourierovy transformace (DFT) nebo rychlé Fourierovy transformace (FFT). Více o DFT, či FFT výše, či například ve [58], [63], [67], [68], [69]. Ve všech praktických případech je možné vzít v úvahu takovou část časového intervalu, kde je fázor uvažován. Z definice fázoru totiž plyne, že signál je pro každý čas neměnný. Určení vhodného časového intervalu je velmi důležité pro odhad fázorů praktických průběhů zkoumaných signálů [70].

Princip spočívá v tom, že pro zvolenou délku intervalu  $L$  počítá průměrné hodnoty  $x$  pro několik různých hodnot  $t_0$ . Poté se vypočítá směrodatná odchylka  $\sigma$  pro tytéž hodnoty  $t_0$ . Pokud vychází směrodatná odchylka průměrů nulová, pak délka intervalu  $L$  se rovná délce pozorovaného signálu  $T$ .

K analýze byl zvolen signál o síťové frekvenci 50 Hz a spojitá periodická funkce signálu  $s(t)$  s periodou  $T$ . Pro tuto funkci potom platí, že střední hodnota  $m$  na intervalu  $L$  je rovna:

$$m = \frac{1}{L} \int_{t=t_0}^{t_0+L} s(t) \cdot dt \quad (5.1)$$

, kde  $L$  určuje délku intervalu, pokud je  $L = T$ , pak střední hodnota  $m$  je nezávislá na  $t_0$ . Pokud  $L \neq T$ , pak se střední hodnota mění s různou  $t_0$ . Pro různé intenzity proměnné je poté vyjádřena směrodatná odchylka  $\sigma$ .

Protože je analyzovaná funkce periodická, pro  $L = T$  hodnota  $m$  bude stejná v každém výchozím počátečním bodě  $t_0$ . Dále platí, že střední hodnota přes délku  $L$ , která je odlišná od  $T$ , se liší pro různé  $t_0$ , tudíž závisí na  $t_0$ . Pro různé intenzity proměnné je pak vyjádřena směrodatná odchylka  $\sigma$ . Princip výpočetní metody tedy spočívá v tom, že pro zvolenou délku intervalu  $L$  se počítají průměrné hodnoty  $m$  pro několik různých hodnot  $t_0$ . Poté se vypočte směrodatná odchylka  $\sigma$  pro tytéž hodnoty  $t_0$ . Pokud vychází směrodatná odchylka nulová, pak délka intervalu  $L$  se rovná délce pozorovaného signálu  $T$ .



### 5.1.1.1 Postup výpočtu

Výpočetní postup lze rozdělit na několik matematických operací. Pro základní úvahu se vyjde z předpokladu, že signál bude spojitý a jeho délka bude větší, než je jeho jmenovitá perioda. Tato hodnota bude pro popis navrhované metody důležitá a je definována jako  $kper$ .

Nejprve, pro zvolený interval  $L \in [Tmin, Tmax]$  se vypočte střední hodnota pro  $t_0 \in [0, (kper - k)T_0]$ . Pokud můžeme předpokládat, že se hledaná perioda signálu bude nacházet v tomto intervalu. Dále se vypočte směrodatná odchylka  $\sigma$  získaných výsledků a hledá se koeficient  $k$  sloužící k nalezení minimální směrodatné odchylky.

Pro zkoumanou (vyšetřovanou) sinusovou funkci signálu  $s(t)$  platí střední hodnota  $m$  pro časový interval  $t \in [t_0, t_0 + k \cdot T]$ :

$$m = \frac{1}{L} \int_{t=t_0}^{t_0+kT_0} \sin\left(2\pi \cdot \frac{t}{T}\right) dt \quad (5.2)$$

, kde  $L$  je obecně neceločíselný násobek původní periody  $T$ . A platí pro něj:

$$L = k \cdot T \quad (5.3)$$

Nakonec pro směrodatnou odchylku platí:

$$\sigma(k, kper) = \sqrt{\frac{1}{(kper - k)T_0} \int_{t_0=0}^{(kper-k)T_0} (m - \bar{m})^2 dt_0} \quad (5.4)$$

Kde  $[0, kper \cdot T_0]$  je časový interval zvolený pro vyhodnocení odchylky a  $\bar{m}$  je střední hodnota  $m$  během celého intervalu,  $k$  a  $kper$  označuje rozteč intervalu. Pro definici hodnoty  $\bar{m}$  jako střední délky intervalu střední hodnoty celé funkce  $m$  pak platí:

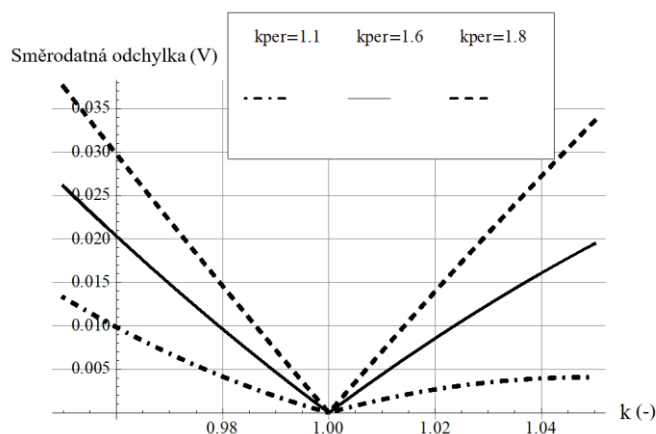
$$\bar{m} = \frac{1}{(kper - k)T_0} \int_{t_0=0}^{(kper-k)T_0} m \cdot dt_0 \quad (5.5)$$

Níže zobrazený graf znázorňuje závislost směrodatné odchylky na  $kper$  (počet vzorků na periodu) pro  $k = 1$  nastává ostré minimum a délka intervalu nabývá přesně hodnot  $L = T$ .

Za poznámku stojí, že  $kper$  je volitelná konstanta, která definuje délku zkoumaného intervalu. Je jasné, že pro nalezení skutečné periody analyzované periodické funkce by měla konstanta být v intervalu nejméně tak dlouhém jako délka skutečné periody. S určením periody funkce mohou však vzniknout určitá úskalí. Volba hodnoty  $kper$  ovlivňuje strmost funkce, jak je vyobrazeno níže a rovněž ovlivňuje problém s optimalizací výpočtu. Větší hodnota  $kper$  je

výhodná pro lepší přesnost a také eliminuje chybu s počátečním odhadem periody vyšetřované funkce. Problém ale spočívá v tom, že vyžaduje větší výpočetní náročnost.

Pro přesný výsledek určení frekvence potřebujeme znát hodnoty funkce  $s(t)$  pro více, než jednu periodu, a tedy získat ostré minimum směrodatné odchyly pro přesnou detekci frekvence. Ovšem pro hodnotu  $kper = 1.6$  tedy 1,6 násobek periody pro funkci  $s(t)$  dostáváme dostatečně přesné výsledky.



Obrázek 5.2: Závislost velikosti  $kper$  u směrodatné odchyly analyzované funkce

### 5.1.2 Aplikace metody na signál s rušením

K příkladu použití navrhované metody slouží porovnání výsledků simulace a následné zhodnocení na periodickém signálu s rušením. Zde je důležité zhodnotit a aplikovat metodu na modelové analýze a ověřit přesnost výsledků.

Jak je známo, při zpracování diskretních signálů bývá v první řadě signál navzorkován určitým počtem vzorků na periodu a poté probíhá jeho další zpracování. Pro uvedený signál o délce intervalu  $[t_0, t_0 + k \cdot T]$  s koeficientem  $kper = 1,8$  odpovídá hodnotě ostrého lokálního minima. Ke stanovení periody signálu  $T$  se vytvoří počet dvojic složený z  $n$  prvků a směrodatné odchyly těchto prvků. Pro  $n_i$  prvek dvojice vypadat takto:

$$\{n_i, \sigma(n_i)\} \quad (5.6)$$

Dále se vytvoří okna obsahující vzorky po sobě následujících délek, tedy:

$$n_i = n_1, n_1 + 1, \dots, n_1 + (np - 1) \quad (5.7)$$

, pro každý z těchto vzorků se určí směrodatná odchyly vzorku  $\sigma(n_i)$ , následně délka okna  $n_i$  s nejnižším  $\sigma(n_i)$  by odpovídala hledané periodě  $T$ .

Z důvodu posunu přes celý  $kper$ , tedy násobek původní frekvence, je třeba zadefinovat koeficient  $nx$ . Pak pro vzorkovanou periodu bude platit:

$$nx \cdot \Delta t = T \quad (5.8)$$

Cílem bude najít dvojice (rovnice) v blízkosti minima.

Pro další analýzu bude označeno  $k_i$  jako normalizované  $n_i$  a platí pro něj:

$$k_i = \frac{n_i}{nx} \quad (5.9)$$

Dále tedy se bude  $nx$  zkoumat jako funkce dvojic:

$$\{k_i, \sigma(k_i)\}, \quad i = n_1, n_1 + 1, \dots, n_1 + (np - 1) \quad (5.10)$$

Ideální hodnota je pro  $k=1$ , proto výše uvedené dvojice s minimem  $\sigma(k_i)$  jsou lokalizovány v okolí  $k=1$ . Pro zadefinovanou délku okna  $q$  odpovídající směrodatné odchylce  $n_1 < q < n_1 + (np - 1)$ , poté pro  $k=1$ , lze délku okna  $q$  s určitým posuvem  $shift$  psát jako:

$$(q + shift) \cdot \Delta = k = 1 \quad (5.11)$$

Posun tedy bude náležet do intervalu  $shift \in [-0.5, 0.5]$ .

Necht' je  $k_f$  hodnota nalezená touto metodou, to znamená, že odchylka od ideální hodnoty je:

$$|k_f - 1| = |\Delta k| \quad (5.12)$$

Za ideální případ se považují pro funkci  $np$  dvojice, které dávají hodnoty  $k_f$  s minimální chybou. Je potřeba také vyhodnotit maximální chybu  $k_f$  pro možný rozsah posuvu a minima  $np$ . Pokud vyhodnotíme  $k_f$  jako vážený průměr, bude platit:

$$k_f = \frac{\sum_{i=n_1}^{n_1+(np-1)} k_i \cdot \mu(\sigma(k_i))}{\sum_{i=n_1}^{n_1+(np-1)} \mu(\sigma(k_i))} \quad (5.13)$$

, kde váhová funkce  $\mu$  užitá ve váženém průměru musí být funkce směrodatné odchylky  $\sigma(k)$ , tedy:

$$\mu = \mu(\sigma(k)) \quad (5.14)$$

Pro ideální případ  $k=1$  je směrodatná odchylka  $\sigma(k)=0$ , z čehož vyplývá požadavek na váhovou funkci:

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0^+} \mu(\sigma) \stackrel{!}{=} \infty \quad (5.15)$$

Po několika numerických simulacích byla zvolena hodnota váhové funkce:

$$\mu(\sigma) = \sigma^{-1} \quad (5.16)$$

Ačkoliv funkce mnoha komplikovaných analytických výrazů dává přesnější výsledky v některých konkrétních případech, v mnoha složitějších selže. Výraz (5.16) poskytuje dostatečnou a stabilní přesnost výsledků, u kterých složitější analytické vyjádření selhalo.

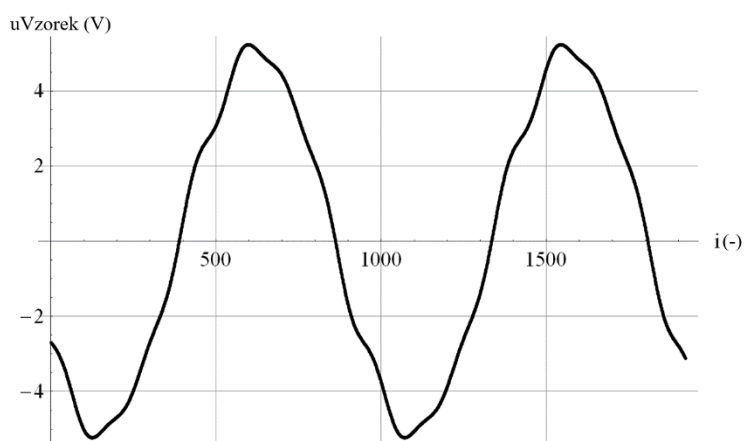
Výpočet směrodatné odchylky  $\sigma(k)$  je časově nejnáročnější úkol uvedené metody. Aby bylo možné minimalizovat složitost navrhované metody, hodnota  $np$  by měla být tak malá, jak je to možné, za podmínky stále splňující přesnosti. V simulacích je právě modelován vliv vybrané  $np$  na přesnost metody. Dále pak je porovnán princip této numerické metody při použití prokladu pomocí paraboly.

Vzorkovací rozsah byl definován  $sr = 960$ , to znamená 960 vzorků na jednu periodu o  $T = 20 \text{ ms}$ , což odpovídá frekvenci 50 Hz. V tabulce je uvedena maximální chyba pro zvolené  $np = 1, 2, \dots, 12$ . Nejmenší chybu je získána pro  $np = 4$ .

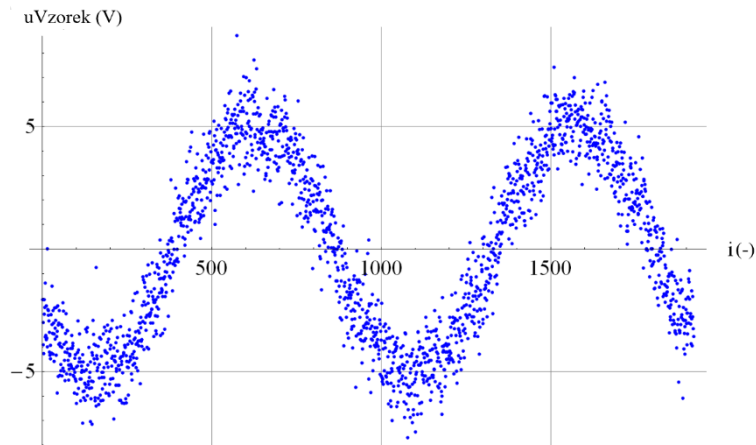
Tabulka 5.1: Závislost chyby na np

np	$10^6 \cdot  \Delta k $
1	5.21
2	10
3	106
4	22
5	0.21
6	18.2
7	0.41
8	16.3
9	0.82
10	15.2
11	1.41
12	2.0

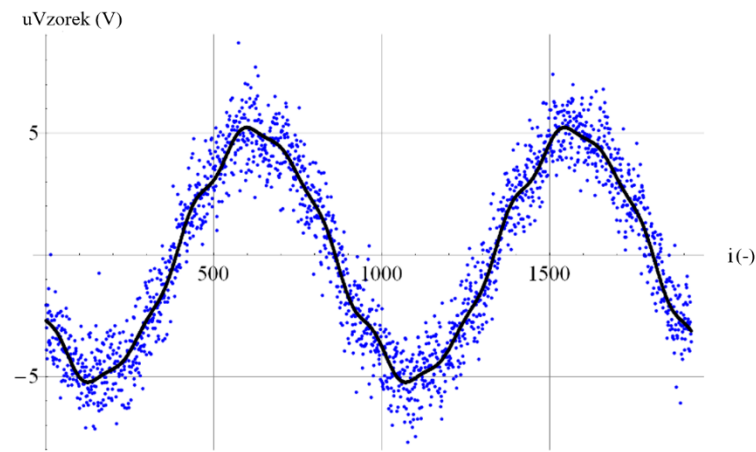
Výše uvedený způsob pro  $np = 4$  je poté aplikován na šum a zkreslený signál. Ty jsou znázorněny na obrázcích:



Obrázek 5.3: Simulovaný periodický signál



Obrázek 5.4: Zašumělý signál



Obrázek 5.5: Výsledný simulovaný signál s rušením

Pro vyšší harmonické simulovaného signálu platí:

$$\sin\left(n_h \cdot 2\pi \frac{t}{T}\right), \quad n_h = 2, 3, \dots, \infty \quad (5.17)$$

Byl použit signál s vyššími harmonickými pro  $n_h = 3, 5$ , pro simulaci zkresleného profilu napětí v síti, celkové harmonické zkreslení je přibližně 10 %. V simulacích se přidá šum signálu s Gaussovým rozdělením pravděpodobnosti s průměrnou hodnotou 0,5 a směrodatnou odchylkou 1. Původní signál, šumový a celkový zjišťovaný signál jsou uvedeny na obrázcích 5.3 až 5.5.

Dále je třeba nalézt pomocí numerické metody pro minimální chybu  $np = 4$  dvojice s minimální směrodatnou odchylkou.

Pro tento účel byla použita technika prokladu pomocí paraboly, výsledky simulací jsou uvedeny dále.

Tato použitá metoda dává dostatečně přesné výsledky, avšak ke zlepšení algoritmu pro přesnost výsledků z navrhované metody je lepší použít hodnotu variance (rozptylu) místo směrodatné odchylky. Jelikož rozptyl neobsahuje ve svém předpisu odmocninu, je snazší implementace této metody výpočtu do výpočetního software.

### 5.1.3 Vyhodnocení výsledků simulací

#### Chyba analýzy frekvence

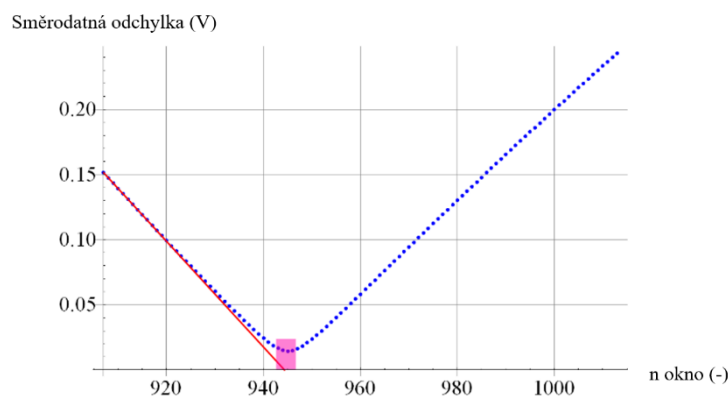
Frekvence první harmonické rušeného signálu byla  $f_{sig} = 50.7449 \text{ Hz}$ , frekvence zjištěná použitou metodou vážených průměrů byla  $f_{as1} = 50.7684 \text{ Hz}$ . Celková chyba je pak:

$$\delta_{f1} = \left| \frac{f_{sig} - f_{as1}}{f_{sig}} \right| = -0.0457\% \quad (5.18)$$

Při použití prokladu s využitím paraboly byla frekvence první harmonické rušeného signálu stejná, tedy  $f_{sig} = 50.7449 \text{ Hz}$ , frekvence zjištěná použitou metodou byla  $f_{as2} = 50.7885 \text{ Hz}$ . Celková chyba pro další metodu je pak:

$$\delta_{f2} = \left| \frac{f_{sig} - f_{as2}}{f_{sig}} \right| = -0.0009\% \quad (5.19)$$

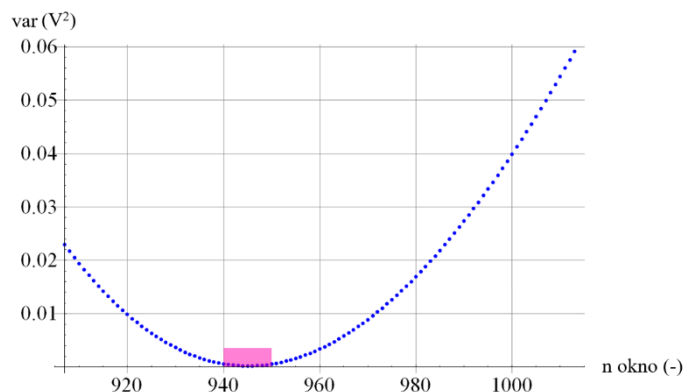
Výsledky jsou graficky znázorněny na obrázcích 5.6 až 5.8 včetně jejich vzájemného porovnání:



Obrázek 5.6: Princip numerické metody pro vážené průměry

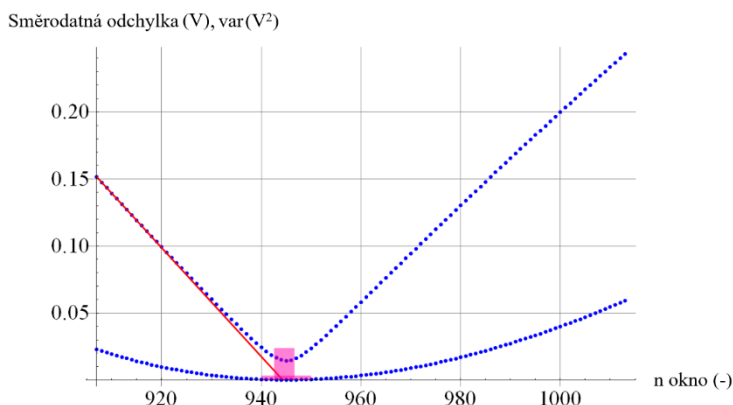
Výše uvedený obrázek znázorňuje závislost směrodatné odchylny (níže v grafu potom rozptylu) na délce okna pohybujícího se přes naměřená data. Princip prokladu spočívá v tom, že se vezmou dva body, proloží přímkou a hledaná hodnota  $n$  se nachází v okolí průsečíku

s vodorovnou osou udávající počet vzorků v okně. Fialově vyobrazený obdélníček určuje vhodný nastavení hodnot  $n$ .



Obrázek 5.7: Princip numerické metody optimalizace pomocí paraboly

V případě optimalizace pomocí paraboly jsou zkoumány tři body v intervalu a poté dochází k prokladu těchto tří bodů parabolickou funkcí. Cílem je nyní nalezení minima hodnoty rozptylu (variance) pro  $n$  počet bodů. Obrázek níže ilustruje porovnání obou metod, tedy velikost směrodatné odchylky nebo rozptylu na délce okna  $n$ .

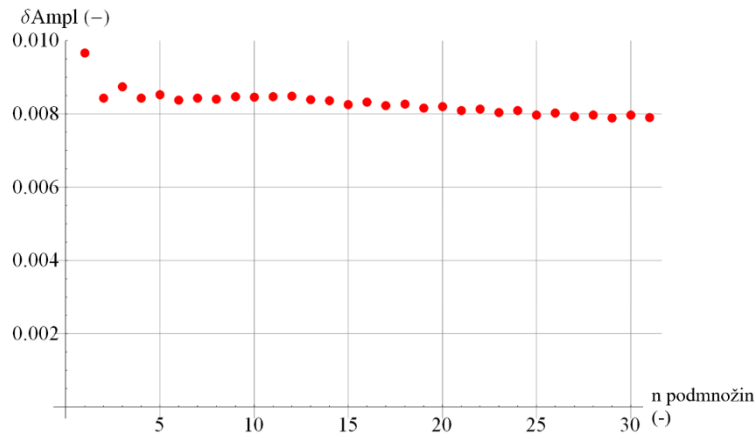


Obrázek 5.8: Porovnání numerických metod

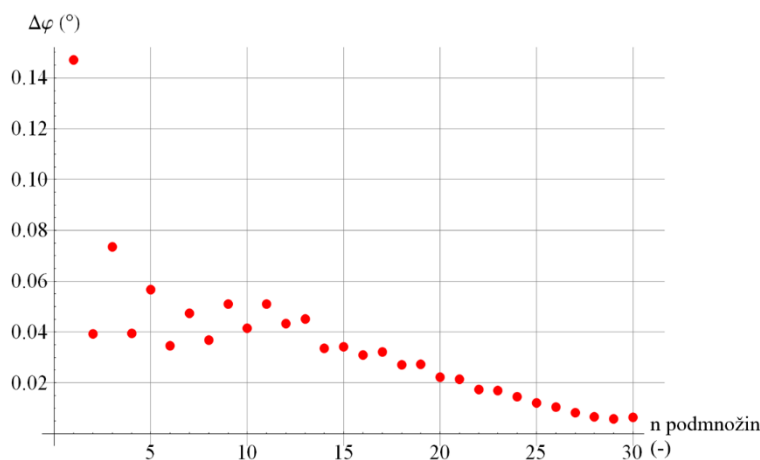
### Chyba určení fázoru

Po definované frekvenci a pro zvolený  $kper = 1.6$  byly vypočítány hodnoty fázorů, tedy hodnoty amplitud a jejich fázový posuv, přičemž fázor byl počítán pro každé okno příslušné délky a výsledek byl počítán jako průměrná hodnota těchto fázorů. Níže uvedené grafy popisují velikost chyby amplitudy a úhlu fázoru v závislosti na velikosti podmnožin  $n$  vzorků. Mírné zlepšení přesnosti amplitudy je na obrázku 5.9 a výrazné zlepšení přesnosti fázového úhlu je na obrázku 5.10.





Obrázek 5.9: Chyba určení amplitudy



Obrázek 5.10: Chyba určení fáze

### 5.1.4 Dílčí závěr

Zavedení monitoringu pomocí PMU zlepšuje možnosti spolehlivosti a řízení v elektrizačních soustavách. Důležité je, aby takto získaná data měla vysokou přesnost. Ne všechna PMU respektují změny frekvence v soustavě, které vznikají během provozní situace v síti. V této kapitole je představena navrhovaná metoda odhadu frekvence spočívající v porovnání výpočtu směrodatné odchylky. Je popsáno, jakým způsobem probíhá výpočetní algoritmus, demonstrace a výpočetní postup na signálu s rušením.

Oba navrhované postupy řešení, čili výpočet vážených průměrů nebo proklad parabolou, dosahují nízkých hodnot směrodatné odchylky a rozptylu pro signály se šumem. Výsledky simulací ukazují, že navrhovaná metoda poskytuje velmi přesné výsledky pro odhad frekvence. Je patrné, že použití prokladu v parabolickou funkci je výhodnější, i méně výpočetně náročné.

## 5.2 Navrhovaná metoda estimace frekvence využívající výpočet rozptylu

Metoda je v této části pro názornost popsána nejprve pro signál spojitý, později bude tento přístup demonstrován na průběhu diskretním. Tento postup lépe demonstruje princip a chápání předkládaného algoritmu.

Tato metoda využívající statistický ukazatel je výpočetně pokročilejší oproti metodě uvedené v kapitole 5.1. V tomto případě metoda spočívá v porovnání hodnoty rozptylu (variance) místo směrodatné odchylky  $\sigma$ . Výpočet rozptylu je výhodnější, poněvadž není potřeba v numerických simulacích počítat s odmocninou, která se vyskytuje u směrodatné odchylky. Výsledky testování na funkci s rušením navíc ukazují, že metoda, kde se využívá rozptyl, dává i přesnější výsledky.

### 5.2.1 Použití metody na spojitý signál

Stejně jako v rovnici (5.1), která popisuje spojitou funkci signálu, zde platí vztah (5.2), a také stejná pravidla pro výpočet střední hodnoty, jako je uveden v kapitole při počítání se směrodatnou odchylkou v 5.1.1.

Také zde se vypočte pro zvolený interval  $L \in [T_{min}, T_{max}]$  střední hodnota pro  $t_0 \in [0, (k_{per} - k) \cdot T_0]$ . Rovněž zde musí být splněn předpoklad, že se hledaná perioda nachází v intervalu. Následně se vypočte rozptyl (variance) získaných výsledků a hledá se koeficient  $k$  k nalezení minimálního rozptylu.

Navrhovaná metoda v tomto případě využívá výpočet rozptylu, jenž v podstatě kvantifikuje variabilitu dat. Pro skutečnou periodu  $T$  funkce by měl být rozptyl roven nule. V podstatě jde o shodný postup, jaký je uvedený v kapitole 5.1.1, pouze je hodnota směrodatné odchylky nahrazena rozptylem.

V následujícím textu bude místo  $L$  bude použito  $k \cdot T_0$ , kde  $k$  je korekční koeficient počátečního odhadu  $T_0$  periody  $T$ . Střední hodnota funkce  $s(t)$  na intervalu je  $t \in [t_0, t_0 + k \cdot T_0]$ :

$$m = \frac{1}{k T_0} \int_{t=t_0}^{t_0+kT_0} s(t) dt \quad (5.20)$$

Rozptyl středních hodnot je následující:

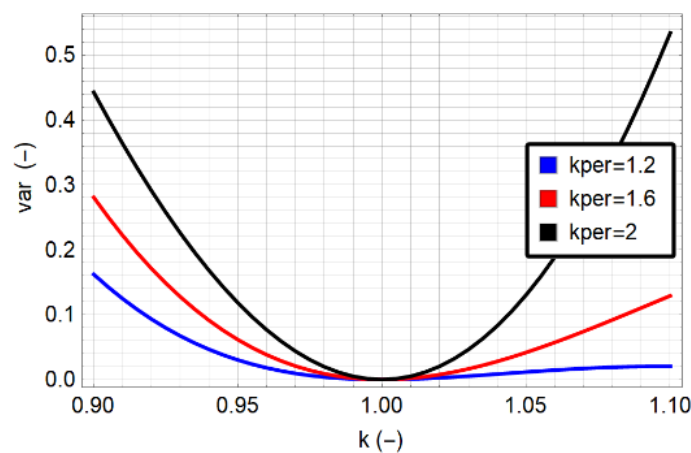
$$Var(k) = \frac{1}{(k_{per} - k)T_0} \int_{t_0=0}^{(k_{per}-k)T_0} (m - \bar{m})^2 dt_0 \quad (5.21)$$

Kde  $[0, k_{per} \cdot T_0]$  je časový interval zvolený pro vyhodnocení odchylky a  $\bar{m}$  je střední hodnota  $m$  během celého intervalu.

$$\bar{m} = \frac{1}{(k_{per} - k)T_0} \int_{t_0=0}^{(k_{per}-k)T_0} m \cdot dt_0 \quad (5.22)$$

Koncovým krokem algoritmu je najít vnější funkci  $Var(k)$ .

Vyobrazení velikosti rozptylu na velikosti konstanty  $k_{per}$ :



Obrázek 5.11: Závislost velikosti  $k_{per}$  u rozptylu analyzované funkce

Jako v předchozí kapitole z výše uvedené závislosti plyne jednoduchý závěr, že pro větší velikost  $k_{per}$  lze dosáhnout lepšího rozptylu.

## 5.2.2 Použití metody pro diskrétní signál

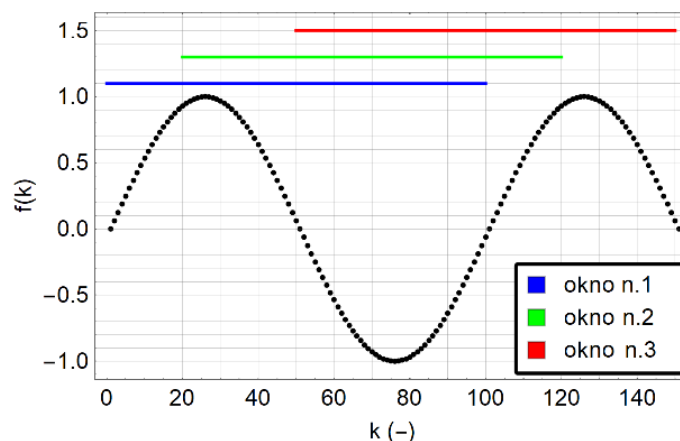
Tato část se zabývá aplikací metody na diskrétním nebo navzorkovaném signálu. V inženýrské praxi je zcela běžné, že se signál předpokládá jako spojitá funkce, ale je reprezentována konečným počtem vzorků (samplů). Doba periody je v takovém případě reprezentována počtem vzorků. Je třeba poznamenat, že toto je jeden z klíčových problémů, jelikož je nepravděpodobné, že vzorkovaný signál bude mít celočíselný počet vzorků za skutečnou periodu.

Pro zvolený příklad demonstrace metody je zvoleno množství vzorků za periodu  $n_0 = f_{sampling} \cdot T_0$ . Dále, množina možných vzorků za periodu je  $n = \{n_{min}, n_{min} + 1, \dots, n_{max}\}$ , kde meze  $(n_{min}, n_{max})$  jsou rozumným způsobem předpokladu funkce základní harmonické. Funkce estimace frekvence je zkoumána na intervalu

$[1, k_{per} \cdot n_0]$ . Průměrná hodnota diskretního signálu pro  $n$  vzorků se vzorkem počátečním (startovacím) je:

$$\overline{x_j(n)} = \frac{1}{n} \sum_{i=j}^{j+n} x_i \quad (5.23)$$

Kde  $x_i$  je člen  $i$ -tého vzorku. Na obrázku 5.12 je obecně znázorněno, jak dochází k pohybu výpočetního okna a pak k výpočtu průměrné hodnoty u diskretního signálu.



Obrázek 5.12: Znázornění metody při různých hodnotách posunu okna

Rozptyl ze získaných hodnot průměru je:

$$Var(n) = \frac{1}{k_{per} \cdot n_0 - n} \sum_{j=1}^{k_{per} \cdot n_0 - n} \left( \overline{x_j(n)} - \overline{\overline{x(n)}} \right)^2 \quad (5.24)$$

Kde  $\overline{\overline{x(n)}}$  je:

$$\overline{\overline{x(n)}} = \frac{1}{k_{per} \cdot n_0 - n} \sum_{j=1}^{k_{per} \cdot n_0 - n} \overline{x_j(n)} \quad (5.25)$$

Stojí za povšimnutí, že funkce  $Var(n)$  vrací pouze pro kladná čísla. Poslední krok algoritmu je nalézt minimum této funkce. Nicméně, optimalizace cílové funkce pro celá čísla nepovede k přesnému řešení. Proto je zvolena jako funkce parabola kolem bodu minima. K tomu je třeba vyhodnotit funkci  $Var(n)$  pro rozsah možných  $n$ . Výsledkem se stává množina dvojic:  $\{n_i, Var(n_i)\}$ .

Poté se ze získané množiny vyberou tři dvojice s nejmenší velikostí  $Var(n_i)$  a aproximují se parabolou. Nakonec se vypočítá hodnota vrcholu. Aby se snížila výpočetní náročnost, může být hodnota vrcholu nalezena jako:

$$n_{ver} = \frac{n_3 (\text{Var}^2(n_1) - \text{Var}^2(n_2)) + n_1 (\text{Var}^2(n_2) - \text{Var}^2(n_3)) + n_2 (\text{Var}^2(n_3) - \text{Var}^2(n_1))}{2 (n_3 (\text{Var}(n_1) - \text{Var}(n_2)) + n_1 (\text{Var}(n_2) - \text{Var}(n_3)) + n_2 (\text{Var}(n_3) - \text{Var}(n_1)))} \quad (5.26)$$

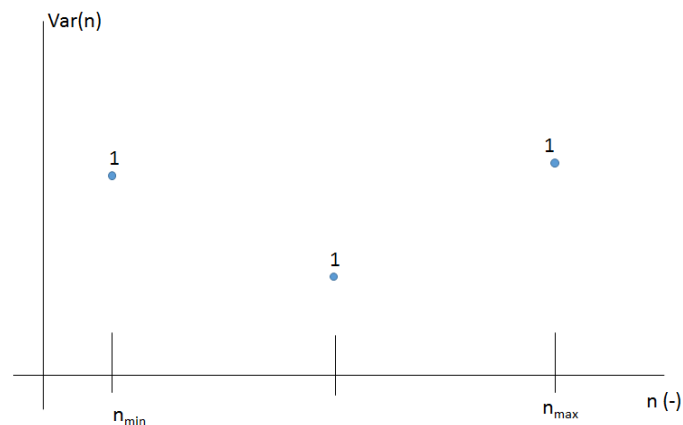
Hodnota  $n_{ver}$  představuje odhadovaný počet vzorků za periodu. Proto pak perioda je  $T = n_{vertex}/f_{sampling}$ .

### 5.2.2.1 Popis výpočetního algoritmu programu

Jelikož k proložení parabolou jsou potřeba tři body, ukázalo se efektivním řešením použít numerickou metodu, kdy se ze třech bodů nalézají nové tři body s cílem najít tři body s nejmenší hodnotou rozptylu. Jelikož z podstaty metody budou tyto body mít po sobě jsoucí indexy, je možno použít následující algoritmus. Numerická iterace končí v okamžiku, kdy aplikace funkce „Krok“ a následně „Zkrot“ vrátí svůj parametr, tedy vstupní tři body jsou totožné s výstupními.

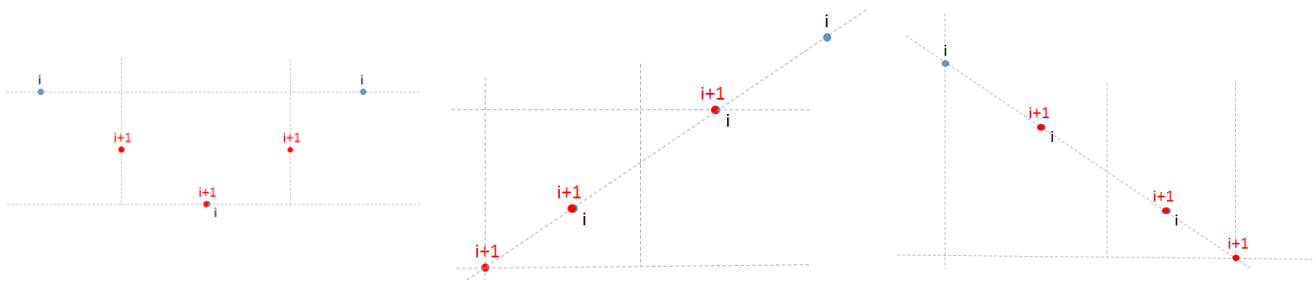
Předpoklad je, že hledaná frekvence se nachází v intervalu ohraničeném minimální a maximální hodnotou,  $f \in (f_{min}, f_{max})$ , což odpovídá délce okna  $n_x \in (n_{min}, n_{max})$ .

Nejprve se v tomto intervalu zvolí tři body, dva v krajích, jeden uprostřed, viz obrázek:



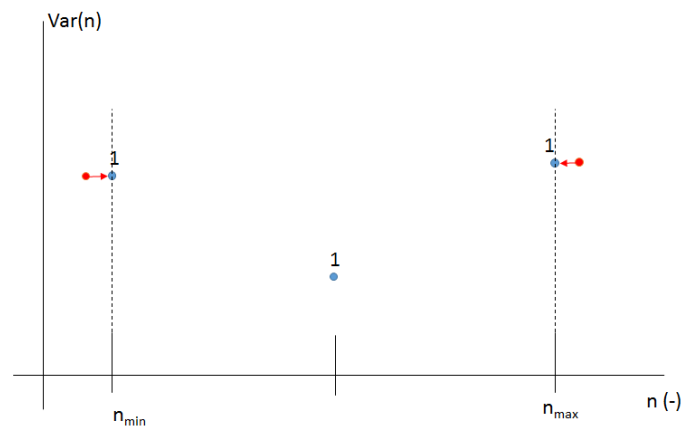
Obrázek 5.13: Numerické hledání frekvence

Poté ve výpočtu následuje funkce „Krok“ k přiblížení se k minimum funkce. V každém dalším kroku je postupováno z poloviny  $i$ -tého intervalu. Pokud je vzrůstající nebo klesající tendence,  $i$ -tý interval se v okolí třetího bodu rozdělí na polovinu a  $i+1$  krok je v následující hodnotě rozdělení. Pro lepší znázornění je situace na obrázku níže:



Obrázek 5.14: Výpočetní kroky

V další části se testuje, zda se dané body nachází v ohraničeném intervalu, a dále pak další krok k přiblížení se minimum funkce frekvence. K tomu slouží funkce „Zkrot“. Pokud daný bod je umístěn mimo minimum nebo maximum intervalu, příslušná funkce zkontroluje pozici a do intervalu vrátí, ověří, zda platí:  $n \leq min \rightarrow min; n \geq max \rightarrow max$ . Pokud se nachází v intervalu, hodnotu zaokrouhlí:  $n \in (min) \rightarrow Zaokrouhli(n)$ .



Obrázek 5.15: Kontrola umístění bodů v intervalu

Numerické metody jsou výpočetně náročné, aby byla dosažena přesnost výsledků, je nutné pro výpočet upravit potřebné množství parametrů a vhodně zvolit numerickou náročnost jednotlivých kroků. Je nutné správně výpočetně nastavit výpočetní model, aby byl co nejméně náchylný na zvolené podmínky testování.

### 5.2.3 Porovnání se standardem IEEE pro synchrofázorové měření

V normě jsou definovány rozličné požadavky na měření fázorů a k PMU [24], [25]. Více o této normě bylo pojednáno v předchozích kapitolách. Výpočet metody byl proveden v software Wolfram Mahtematica, testovací podmínky byly definovány normou, jež byla vytvořena v počítačové simulaci.

Při experimentu bylo zkoumáno měření šířky pásma, (Dynamic compliance) [24], [25]. Tento požadavek je obtížné splnit, test se v podstatě skládá z algoritmu PMU signálu s modulovanou amplitudou a fázovým úhlem. Matematický signál je reprezentován vztahem:

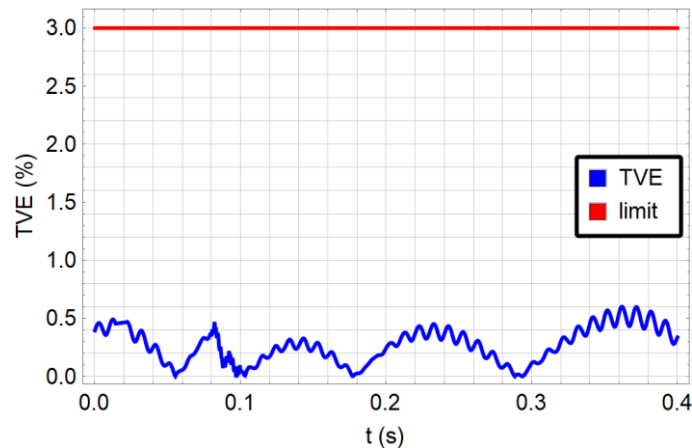
$$s(t) = A (1 + k_a \cos(\omega t)) \cos(\omega_0 t + k_{pa} \cos(\omega t)) \quad (5.27)$$

V tomto případě je  $A$  amplituda,  $k_a$  koeficient amplitudové modulace,  $k_{pa}$  modulační činitel fázového úhlu,  $\omega_0$  je základní frekvence a  $\omega$  je modulační frekvence.

Daná norma definuje následující testovací podmínky, které byly splněny se 100% velikostí signálu a jmenovitou frekvencí. Rovněž  $k_a$  a  $k_{pa}$  jsou rovny 0,1. Je proveden test algoritmu pro různé modulační frekvence a zároveň pro nejhorší možný případ 5 Hz. Měřítka shody je hodnota  $TVE$  (Total vector error), která kvantifikuje rozdíl mezi teoretickou hodnotou a fázorem získaným z měření.

$$TVE(n) = \sqrt{\frac{(\widehat{X}_r(n) - X_r(n))^2 + (\widehat{X}_i(n) - X_i(n))^2}{(X_i(n))^2 + (X_r(n))^2}} \quad (5.28)$$

Kde  $\widehat{X}(n)$  je  $n$ -tý vypočtený fázor,  $X(n)$  je odpovídající hodnota skutečného fázoru s jeho reálnou a imaginární částí,  $X_r$  a  $X_i$ .



Obrázek 5.16: Porovnání výsledků  $TVE$  u simulace

Na obrázku, který znázorňuje vztah  $TVE$  v procentech vůči periodě je zjevné, že navrhovaný přístup k výpočtu dobře splňuje požadavky IEEE. Navíc je jasně vidět, že zůstává v  $TVE(n)$  značná bezpečnostní rezerva před hodnotou limitu, takže navrhovaná metoda dokáže snést ještě větší míru rušení signálu. Modrá vlnitá křivka v podstatě vyobrazuje hodnotu natočení úhlu kývání alternátoru.

## 5.2.4 Aplikace metody u signálů s rušením

Tato podkapitola prezentuje metodu v aplikaci na různé signály s rušením s cílem porovnat přesnost získaných výsledků s výsledky konvenčních metod, dále je uvedeno, jakým způsobem byly simulace realizovány.

K porovnání uváděné metody detekce frekvence s existujícími metodami pro odhad frekvence byly provedeny počítačové simulace. Testované signály byly generovány se známou frekvencí a amplitudami vyšších harmonických.

K navzorkovaným datům byl přidán šum s použitím náhodných čísel s Gaussovým rozdělením a nulovou střední hodnotou. Využití metody detekce frekvence by se týkalo výhradně elektroenergetiky, kde jsou signály jako výstupy měřících transformátorů proudu a napětí. Z tohoto důvodu v harmonickém ustáleném stavu je uvažována nulová střední hodnota. Nutno však podotknout, že stejnosměrná složka nemá žádný vliv na přesnost navrhované metody. Šum představuje napětí vyvolané elektromagnetickým rušením díky blízkým spínacím procesům v soustavě. Gaussovo rozdělení je použito, jelikož u nízkých indukovaných šumových napětí je vyšší pravděpodobnost výskytu než u vysokých hodnot šumu. Vzdálené zdroje rušení jsou početnější ve srovnání s blízkými.

Porovnávané metody odhadu frekvence byly vždy stokrát aplikovány na data se šumem generovaným pro každý čas. Z výsledku potom byla vypočtena relativní a maximální absolutní chyba.

## 5.2.5 Srovnání s konvenčními metodami

K porovnání s navrhovanou metodou byly vybrány:

- Navrhovaná statistická metoda.
- Algoritmus detekující průchody nulou. Princip algoritmu je podrobně popsán v kapitole 4.1.1, data jsou filtrována pomocí klouzavého průměru. Poté jsou nalezeny a seskupeny vzorky s absolutní hodnotou 1 % rozdílu mezi maximální a minimální úrovní signálu. Každá skupina představuje hranu signálu. Z toho důvodu jsou skupiny vzorků aproximovány přímkami a poté jsou vypočítány průsečíky s časovou osou. Tento přístup výpočtu se prakticky nepoužívá pro signály se šumem bez filtrování.
- Metoda odhadu frekvence je vypočítána pomocí diskrétní Fourierovy transformace implementované ve Wolfram Mathematica verze 11.2.



V následujícím textu jsou vyobrazeny výsledky procentuální chyby frekvence v závislosti na koeficientu šumu signálu. Zkoumaný signál je zatížený šumem, který je modelován Gaussovým rozdělením. Ke generování náhodného signálu šumu slouží v simulacích generátor náhodných čísel s normálním rozložením hustoty pravděpodobnosti ve zvoleném intervalu.

Pro jednotlivé testování a porovnávání uvedených metod se měnily parametry jako počet period testovaného signálu, počet vzorků za sekundu, velikost základní frekvence a harmonických, velikost koeficientu generovaného šumu na signálu. Jako příklad použití jsou vybrány dvě ukázky, další typy aplikací v příloze A.

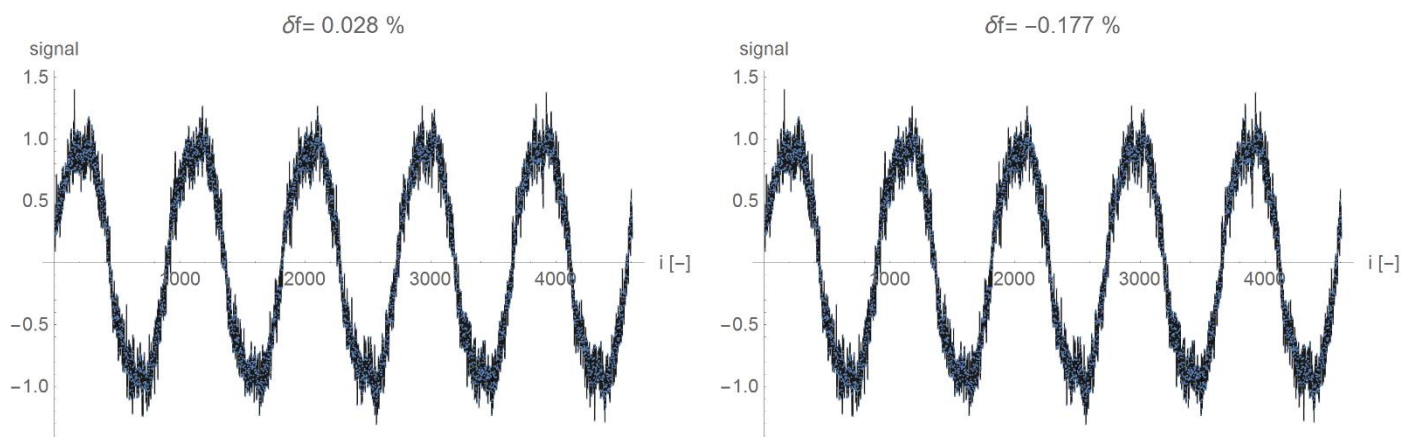
### 5.2.5.1 Aplikace metody a výsledky simulací, příklad I.

Výsledky simulací byly provedeny pro nejhůrší možný případ, který je uveden v normě.

Za účelem testování byly zvoleny následující podmínky:

- Vzorkovací frekvence je 48000 vzorků za sekundu, tedy 960 vzorků za jmenovitou periodu signálu se základní frekvencí 50 Hz.
- Frekvence je 1.0456krát vyšší než nominální, první harmonická s amplitudou 1V (v signálu nebyly zobrazeny žádné jiné harmonické).
- Odchylka Gaussova rozdělení byla zvolena tak, aby byla 0,4 V.
- $k_{\text{Noise}}$  je koeficient generovaného šumu, což znamená, že každá skupina generovaného šumu byla vynásobena exponenciálním rozdělením, které obsahuje 21 hodnot od 0,001 do 1,2 včetně.
- Velikost dat byla 4,8 násobek jmenovité periody.

Zkoumaný signál zatížený šumem vypadá následovně:

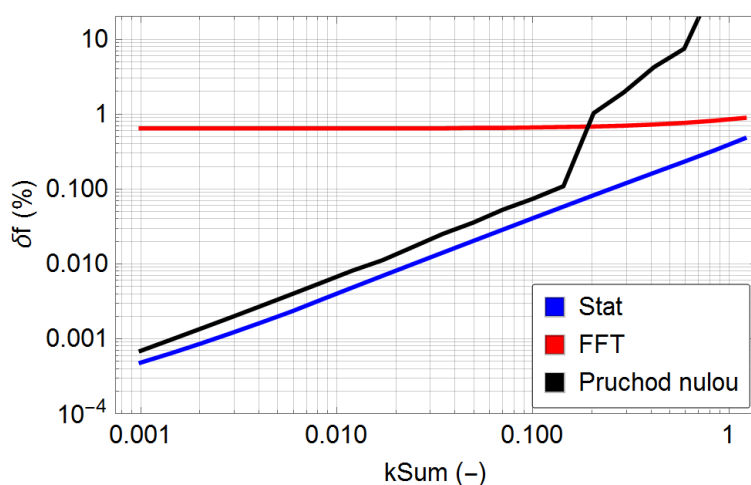


Obrázek 5.17: Simulovaný signál s rušením

Průběhy zobrazené výše znázorňují amplitudu signálu a počet vzorků za testované časové období. Také je uvedena vypočítaná hodnota odchylky od nominální frekvence pro statistickou metodu a pro určení průchodů signálu nulou.

Je důležité zmínit, že velikost dat musí být dostatečně velká pro odhad frekvence pomocí FFT, jinak je tato metoda nepoužitelná. Je zapotřebí více než čtyř hodnocených period signálu, menší počet pro použití FFT netřeba uvažovat, jelikož dává značné chyby.

Porovnání chyby frekvence pro jednotlivé metody je vyobrazeno na obrázku 5.18. Na vodorovné ose je modelovaný koeficient šumu ( $kSum (-)$ ), na svislé ose chyba frekvence v procentech, obojí v logaritmických souřadnicích.



Obrázek 5.18: Porovnání chyby frekvence v závislosti na velikosti rušení signálu pro jednotlivé metody

Z obrázku je zřejmé, že vliv šumu signálu ovlivňuje přesnost odhadované frekvence, rovněž je patrné, jak se celková chyba frekvence liší pro jednotlivé metody. Více je zhodnoceno v dílčím závěru kapitoly (5.2.7).

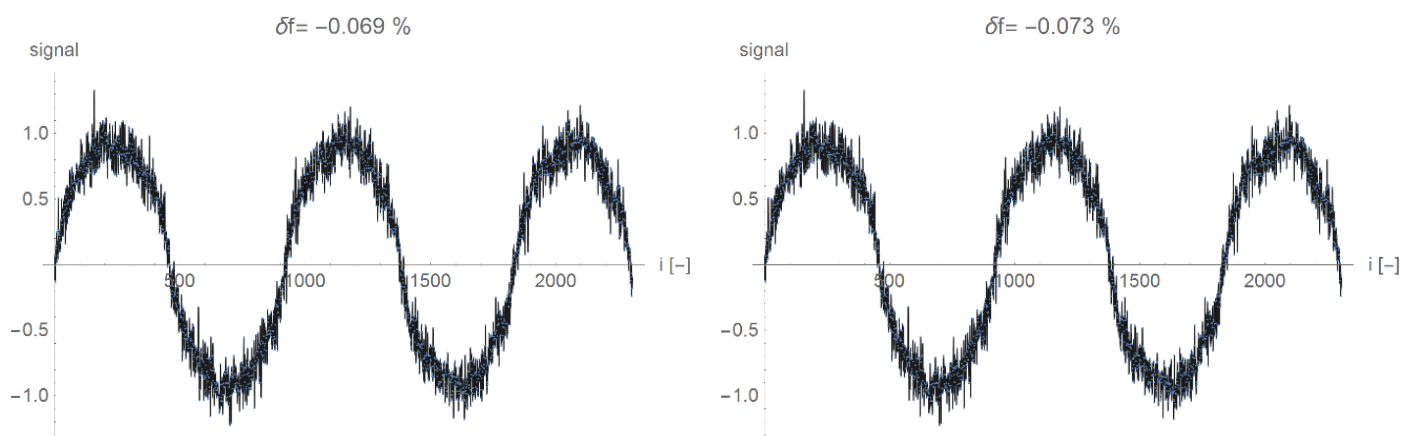
### 5.2.5.2 Aplikace metody a výsledky simulace, příklad II.

Pro další simulace, jež slouží k lepšímu ověření a porovnání přesnosti jednotlivých metod byly zvoleny odlišné vstupní hodnoty parametrů:

- Vzorkovací frekvence je 48000 vzorků za sekundu, tedy 960 vzorků za jmenovitou periodu signálu se základní frekvencí 50 Hz.
- Frekvence je 1,0456krát vyšší než nominální. Signál obsahuje první, třetí, sedmou a jedenáctou harmonickou s amplitudami 1 V, 0,1 V, 0,05 V a 0,01 V.
- Odchylka Gaussova rozdělení byla zvolena tak, aby byla 0,4 V.

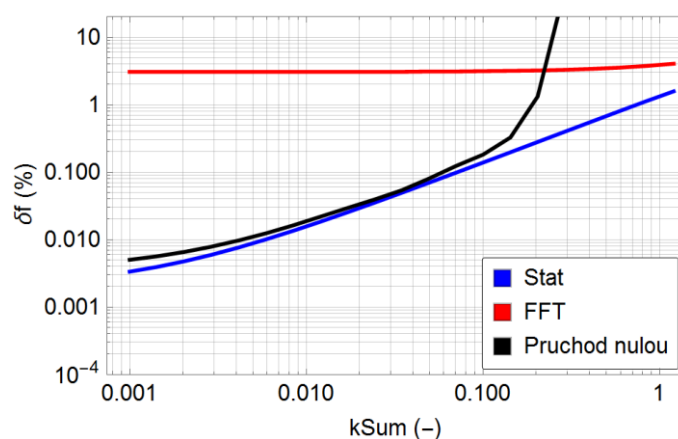
- $k_{\text{Noise}}$  je koeficient generovaného šumu, což znamená, že každá skupina generovaného šumu byla vynásobena exponenciálním rozdělením, které se skládá ze 21 hodnot od 0,001 do 1,2 včetně.
- Velikost dat byla 2,4 násobek jmenovité periody.

Simulace pro různou kombinaci vstupních parametrů a jejich vyhodnocení jsou uvedeny v příloze A. Zkoumaný signál zatížený šumem vypadá následovně:



Obrázek 5.19: Simulovaný signál s rušením

Porovnání chyby frekvence jednotlivých metod je znázorněno níže. Jak již bylo výše uvedeno, FFT vychází pro tento případ vyhodnocení frekvence nejméně vhodná, jelikož se zde počítá s malým počtem period testovaného signálu. Chyba frekvence pro průchody nulou dosahuje přibližně stejných výsledku jako při metodě statistické. Toto platí opět pouze pro signál s malým šumem. Pro signály zatížené šumem je určování frekvence pomocí průchodů nulou rovněž nevhodné.



Obrázek 5.20: Porovnání chyby frekvence v závislosti na velikosti rušení signálu pro jednotlivé metody

Srovnání jednotlivých výpočetních metod znázorňují výše uvedené grafy. Navrhovaná statistická metoda pro estimaci frekvence v elektroenergetice by mohla být dobře použitelná

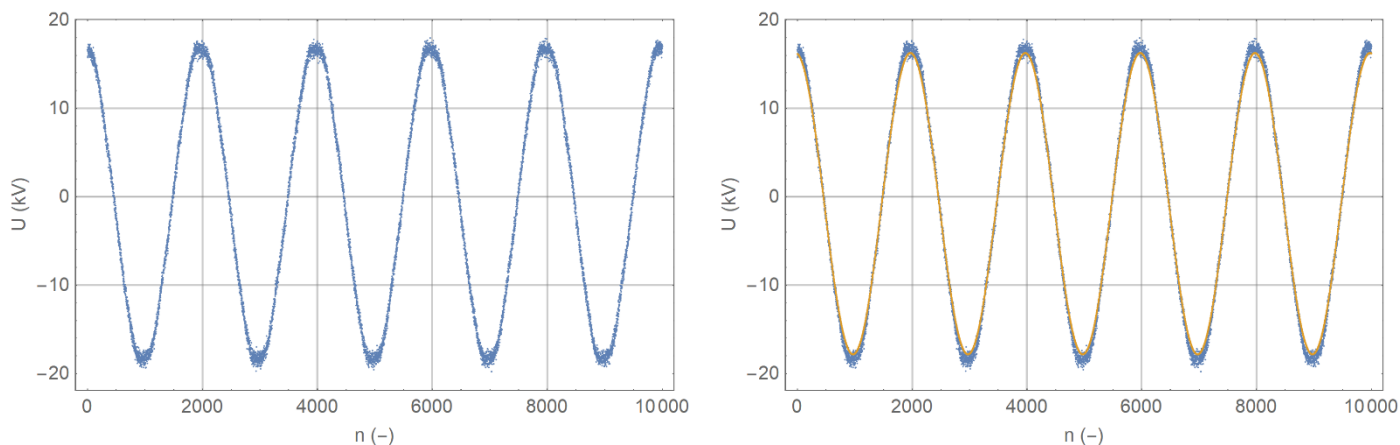
pro systémy monitoringu v elektrizačních soustavách. Pro signály zatížené malým šumem poskytuje velice dobrou přesnost pro zjištění hodnoty frekvence v síti. Oproti zbývajícím srovnávaným metodám, jako je detekce průchodů nulou či FFT, lze ze statistické metody získat nejpřesnější data.

Na rozdíl od ostatních, navrhovaná metoda sama dává informaci o směrodatné odchylce, popř. rozptylu. Rovněž kromě nejpravděpodobnější frekvence vyhodnocuje též normovaný rozptyl (rozptyl dělený kvadrátem efektivní hodnoty) vyhodnocované veličiny. Je-li tato hodnota nulová, je funkce nutně periodická na vyšetřovaném intervalu a má nalezenou frekvenci. Rostoucí hodnota měrného rozptylu znamená "méně periodickou" funkci, což v elektroenergetice znamená, buď časovou změnu frekvence danou např. kýváním alternátoru, nebo vyšší míru rušení ve zpracovávaném signálu. O robustnosti metody napovídají výsledky jejího použití například při rekonstrukcích signálů prováděných na Katedře elektroenergetiky při vyhodnocování ferorezonančních jevů [71]. Metodu lze při nejmenším doporučit jako předmět dalšího výzkumu.

### **5.2.6 Aplikace metody na skutečný průběh zatížený rušením**

Detekce frekvence navrhovanou metodou byla porovnána se skutečnými průběhy napětí z měření na distribučním transformátoru na straně 22 kV. Měření bylo provedeno za účelem vyhodnocení vyšších harmonických v daném vysokonapěťovém signálu, výsledný průběh je tedy zatížen šumem. Měření probíhalo dlouhodobě a vyhodnocení se provádělo v týdenním intervalu. Na průchodky transformátoru byly připojeny kapacitní děliče 22 kV. Tyto děliče jsou určeny pro měření fázových přepětí pro uvedené nebo menší napětí. Na výstupních svorkách děličů byly připojeny vn sondy, které dále snížily napětí pro osciloskopickou kartu. Použitá osciloskopická karta umožňuje vertikální rozlišení 12 bitů při vzorkovací frekvenci 100 MSa/s. Celý měřicí řetězec zajišťuje frekvenční nezávislost do hodnoty 1 MHz.

Z celkového měření byl vybrán vzorek s pěti periodami (obrázek 5.21) pro porovnání jednotlivých metod detekce frekvence.



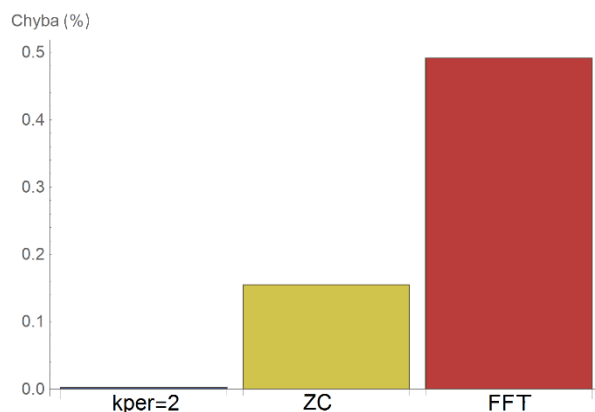
Obrázek 5.21: Původní signál s rušením a proložení filtrovaným signálem

Pro získání "správné" hodnoty frekvence, protože frekvence nebyla přesně známá jako v případě simulovaných časových průběhů, bylo postupováno takto:

- Na data byl aplikován klouzavý průměr.
- Výsledný průběh byl pomocí nelineární regrese proložen sinusovým průběhem a tato hodnota frekvence je považována za "správnou".

Tento postup není při měření synchronizátorů použitelný, neboť postupný průměr představující dolní propust mění fázi signálu a frekvenční závislost. Navíc je výpočet podstatně časově náročnější než u ostatních porovnávaných metod a tudíž nevhodný pro určování frekvence a fáze v reálném čase.

f "správná"	f (kper=2)	f (ZC)	f (FFT)
49,9634 Hz	49,9646 Hz	49,8859 Hz	50,2091 Hz



Obrázek 5.22: Chyba detekce frekvence jednotlivými metodami

V grafu výše je uvedeno srovnání přesnosti frekvence pro navrhovanou metodu s úrovní  $kper = 2$ , pomocí FFT a průchody nulou (ZC). Jak ukazuje obrázek výše, poskytují všechny srovnávané metody odhad frekvence s velikou přesností. Na reálných signálech je přesnost určení frekvence obtížné porovnávat, protože není metoda absolutně přesná, která by poskytla informaci o této hodnotě.

### 5.2.7 Dílčí závěr

V této části práce je prezentována vylepšená forma algoritmu metody k odhadu frekvence pro potřeby elektroenergetiky. Jak ukazují výsledky simulací, lze metodu použít i na signály s poměrně vysokým podílem rušení. Hlavní podstatou této části práce bylo popsat navrhovanou metodu, realizovat simulace a porovnat přesnost získané frekvence.

Konvenční metody (zde srovnávaná FFT a průchody nulou) pro určení frekvence signálu s rušením poskytují výsledky zatížené poměrně značnou chybou. Oproti tomu navrhovaná metoda založená na výpočtu rozptylu v porovnání s konvenčními dává nejpřesnější výsledky. Při dodržení standardu IEEE pro zpracování dat z fázorových měření je patrné, že zkoumaný signál může obsahovat ještě vyšší procento rušení. V takovém případě je pro určení frekvence nejpřesnější navržená metoda, protože je zde nejmenší chyba v závislosti na koeficientu šumu, jak je znázorněno na obrázcích 5.18 a 5.20. Rovněž byl srovnáván odhad frekvence jednotlivými metodami na průběhu z měření distribučního transformátoru.

Podle výsledků je pro určení frekvence signálu nejméně vhodná metoda založená na FFT, navrhovaná metoda poskytuje odhad frekvence s nejmenší chybou. Detekce frekvence pomocí průchodů nulou dává pro signály s malým rušením přibližně stejné výsledky, avšak, jak je patrné, pro signál zatížený větším rušením, je zcela nevhodná.

Metoda využívající rozptyl je pokročilejší než algoritmus založený na výpočtu směrodatné odchylky díky tomu, že při numerickém výpočtu není potřeba počítat odmocninu a proto jde o celkově méně náročný typ výpočtu. V důsledku tohoto je potenciálně snazší takto založený algoritmus implementovat do zařízení, které by na tomto principu mohly vyhodnocovat získaná dat z elektrizační soustavy.

## 5.3 Výpočet činného a jalového výkonu

Jak je popsáno v kapitole výše, z vypočtených fázorů napětí a proudu je možné získat velikost činného a jalového výkonu. Dané informace je důležité znát k řízení výkonových toků a v jakém stavu se elektrizační síť nachází, jestli nenastává výkonová nerovnováha, ztráta stability soustavy, apod. Fakt, že navrhovaná metoda umožňuje odhad nejistoty určení těchto veličin, ji zvýhodňuje oproti porovnávaným konvenčním metodám a činí ji tak dobře použitelnou pro možnou implementaci do systému monitoringu.

Pokud bude vstupní signál obsahovat rušení, bude potřeba rovněž počítat s chybou, která při vyhodnocení signálu může vzniknout. Jedná se o podobný případ, jako při určení frekvence.

Opět jsou vstupní data navzorkovány výše uvedeným způsobem. Následně jsou z těchto dat vypočteny hodnoty fázorů napětí a proudu a nakonec činný a jalový výkon.

Postup výpočtu je proveden v několika krocích. Nejprve jsou zvoleny hodnoty fázorů napětí a proudu. K signálům napětí a proudu jsou přičtena náhodná čísla simulující rušení šumem, který je náhodný s normálním rozložením. Velikost těchto náhodných signálů je zvyšována a pokaždé je provedeno vyhodnocení.

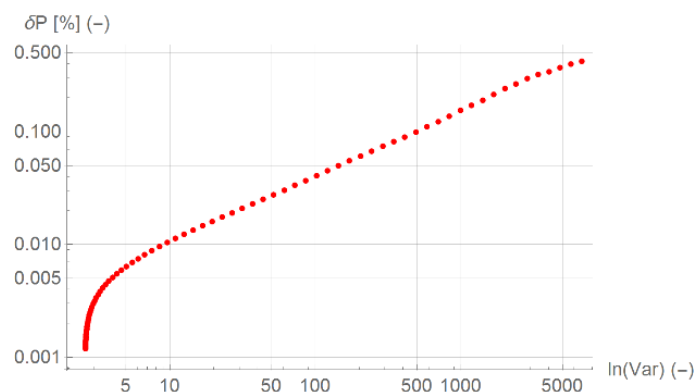
Z těchto signálů s rušením je vypočítána frekvence, fázory proudu a napětí, činný a jalový výkon a rozptyl. Cílem je zjistit závislost chyby činného a jalového výkonu na rozptylu.

### 5.3.1 Aplikace metody a výsledky simulace

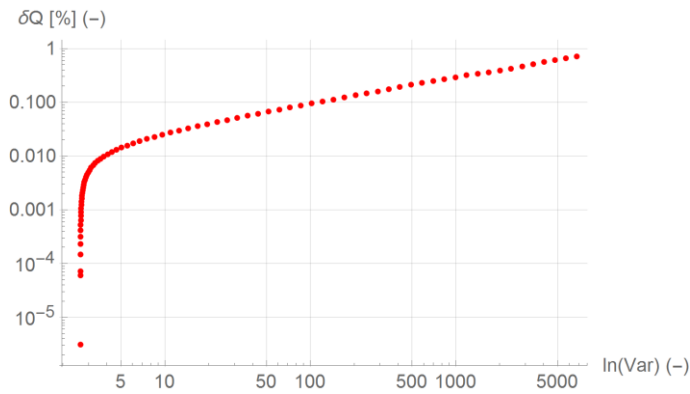
Pro danou simulaci jsou zvoleny parametry:

- vzorkovací frekvence je 48000 vzorků za sekundu, tedy 960 vzorků za jmenovitou periodu signálu se základní frekvencí 50 Hz.
- Frekvence je 1,023krát vyšší než nominální. Signály pouze s první harmonickou.
- Odchylka Gaussova rozdělení byla zvolena tak, aby byla 0,4 V.
- $k_{\text{Noise}}$  je koeficient generovaného šumu, což znamená, že každá skupina generovaného šumu byla vynásobena koeficienty s exponenciálním rozdělením, které se skládá z 21 hodnot od 0,001 do 1,2 včetně.
- $K_{\text{per}}$  zvoleno 1,6.

Výsledky velikosti chyby činného a jalového výkonu ukazují obrázky níže. Vodorovná osa znázorňuje velikost logaritmu rozptylu, svislá vyobrazuje chybu činného případně jalového výkonu, rovněž v logaritmické ose. Pro odlišné vstupní parametry byly provedeny další simulace, jejichž výsledky jsou v příloze B.



Obrázek 5.23: Závislost chyby činného výkonu na rozptylu



Obrázek 5.24: Závislost chyby jalového výkonu na rozptylu

### 5.3.2 Dílčí závěr

Prezentovaná metoda je v této části použita k určení fázorů a následně pak k výpočtu činného a jalového výkonu. Z výsledků provedených simulací plyne důležitý závěr, že velikost rozptylu dává informaci o nepřesnosti určení činného a jalového výkonu. Je zde ovšem důležité zdůraznit, že uvedené běžně používané metody pro určení frekvence založené na použití FFT či průchodů nulou informaci o výkonech neumožňují. Tento závěr poskytuje možné využití a použitelnost algoritmu i pro zjištění těchto hodnot.

Přestože prokázání prezentovaných závislostí pro jiné typy šumů a jiné typy rušení vyžaduje další výzkum, jeví se použití rozptylu, jako indikátorů možných nepřesností jako velmi nadějně.

## 6 Případová studie

Popsaná metoda pro detekci frekvence a fázorů je v této části porovnávána na případové studii, kde se ověřuje přesnost vypočtené a skutečné mechanické frekvence na generátoru. Pro ověření chování metody je vypočtená frekvence porovnána s modely určení frekvence pomocí FFT a průchodů nulou. V případové studii je simulována situace odpojení záložního zdroje a části spotřeby od elektrizační soustavy z důvodu závažné poruchy v systému, např. zkratu, velkého výkonového přetížení, ztráty stability přenosu, apod. Důsledkem toho dojde k přechodu do ostrovního provozu daného zdroje, což se projeví změnou mechanické frekvence elektrického generátoru.

V případové studii je realizován nový pohled na technologii monitoringu a zpracování dat a to tak, že uváděná metoda měření frekvence a vyhodnocení fázorů je použita v distribuční síti vysokého napětí, kde je numericky simulován přechod do ostrovního režimu, přičemž jako zdroj slouží kogenerační jednotka s pístovým motorem. Poněvadž jde o způsob aplikace



v distribuční síti, lze hovořit o možném rozšíření konceptu smart grid využívajícího metody synchronizovaného měření a detekce frekvence aplikovaných obvykle v sítích přenosových.

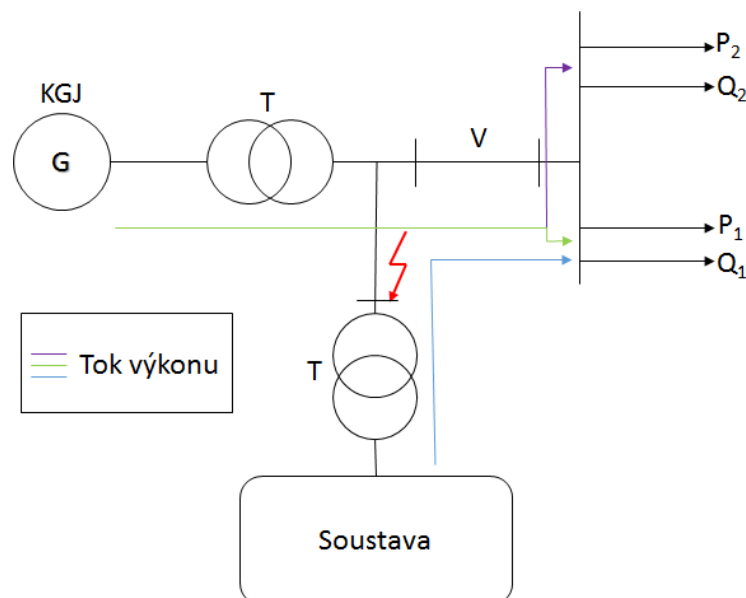
Cílem této kapitoly není prezentace navrhované metody na složitém modelu soustavy, nýbrž demonstrace použití pro odlišné vstupní parametry metody a ověření přesnosti se skutečným průběhem.

### 6.1.1 Popis vstupních parametrů

Koncept případové studie obsahuje následující zvolená vstupní data pro simulaci:

- Kogenerační jednotka se synchronním alternátorem 3,2 MW, ve které jako pohon slouží pístový spalovací motor.
- Distribuční síť vn.
- Třífázové zátěže, odporová  $R_1$  a indukční  $L_1$  o výkonech  $P_1 = 0,8 MW$  a  $Q_1 = 1,68 MVar$ .
- Další třífázové zátěže  $R_2$  a  $L_2$  o výkonech  $P_2 = 0,01 MW$  a  $Q_2 = 0,2 MVar$ .

Topologie soustavy pro výpočet simulace je znázorněna níže. Ve standardním provozním režimu slouží kogenerační jednotka s pístovým spalovacím motorem jako záložní zdroj.



Obrázek 6.1: Simulovaná síť vn

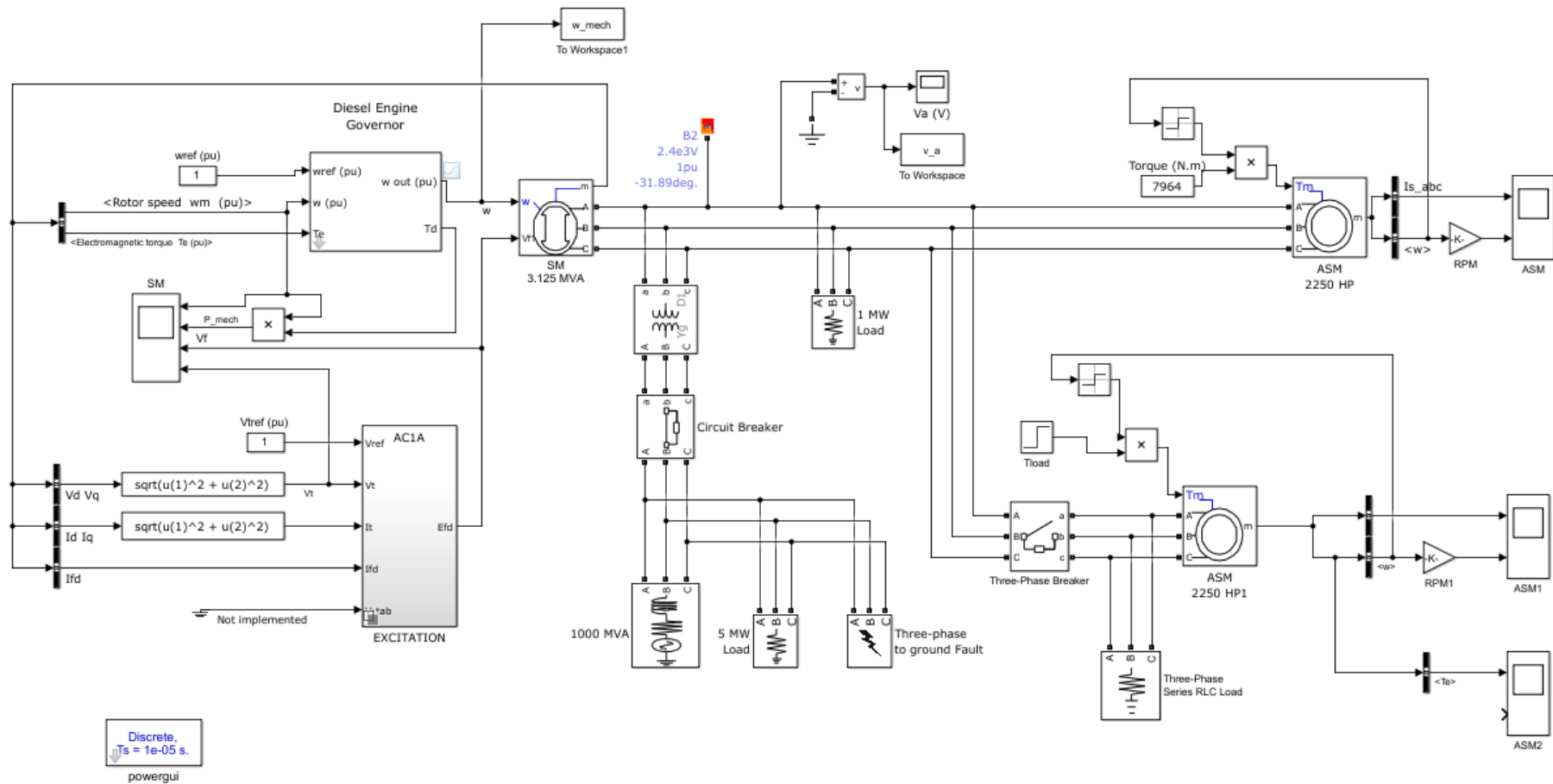
Výše uvedené blokové schéma sítě vyobrazuje simulovanou soustavu s barevným odlišením jednotlivých výkonových toků, které bude sloužit k bližšímu popisu časově následujících dějů pro potřebu další podkapitoly zabývající se postupem výpočtu a simulace .

### **6.1.2 Matematický model a jeho realizace**

Matematický model soustavy pro potřeby této případové studie je realizován ve výpočetním prostředí Matlab Simulink – Simscape Power System, získaná data jsou poté importována do prostředí Wolfram Mathematica, kde následuje jejich zpracování, jako je popsáno v kapitole 5.2.

Robustnost a přesnost použitého algoritmu nebyla zkoumána, ale lze ji považovat za velmi dobrou, neboť solver použitý v Simscape Power System, je otestován mnoha a mnoha uživateli nejen v akademickém prostředí, ale i v průmyslové praxi. Tento solver je zvolen speciálně pro elektroenergetické systémy, ve kterých se uvažují i diskrétní změny hodnot parametrů, apod. Solver provádí testy na přesnost řešení a adaptivně mění parametry tak, aby přesnost byla dostatečná. Uvedený systém je často používán o pro podstatně složitější sítě s více uzly i s podstatně složitější kompozicí. Danou úlohu lze pro čas větší než nula považovat za spojitou a hladkou.

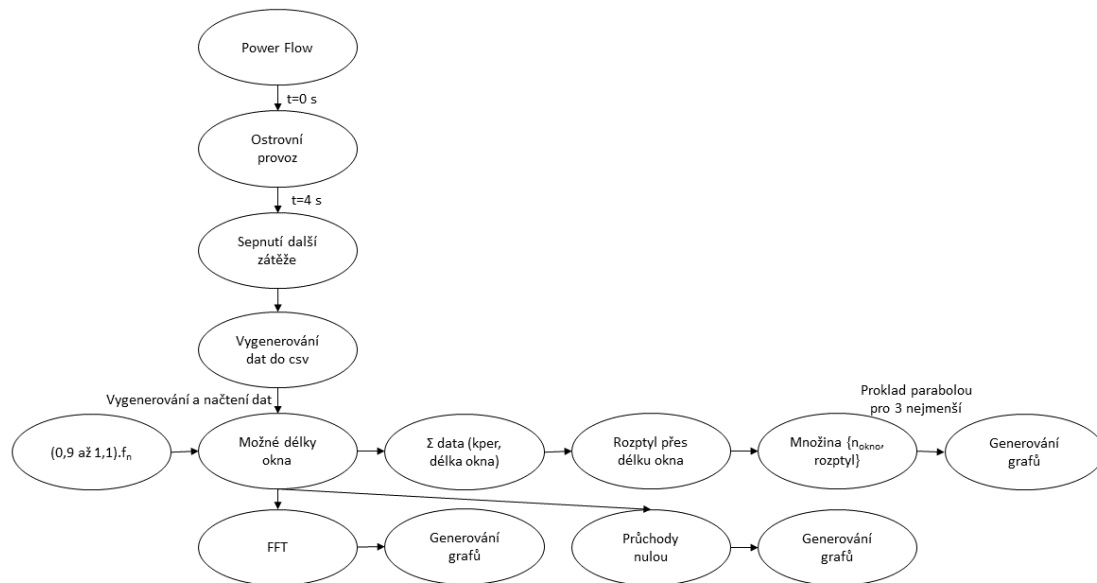
V systému jsou uvažovány následující matematické modely synchronního generátoru uvažující tlumení, asynchronního motoru, atd. vycházející z knihoven Matlab [72].



Obrázek 6.2: Blokové schéma modelu v Simscape Power System

Obrázek výše představuje konkrétní prvky a parametry simulačního modelu v programu a podrobněji popisuje blokové schéma sítě z obrázku 6.1. Je důležité poznamenat, že se jedná o jednoduchý simulační model, na kterém je možné zkoumat a porovnávat data a přesnost estimace frekvence uváděnou metodou a její potenciální použitelnost.

### 6.1.3 Popis postupu výpočtu a simulace



Obrázek 6.3: Procesní diagram estimace frekvence

Procesní diagram (obrázek 6.3) ukazuje postup výpočtu a porovnání jednotlivých kroků v simulaci. K lepší přehlednosti jednotlivých dějů lze rovněž využít obrázek 6.1 s barevným odlišením toku výkonu. Realizovaný výpočet lze shrnout do několika následujících kroků:

- Nejprve se provede výpočet ustáleného chodu sítě, kde jako zdroj pro zátěže  $R_1$  a  $L_1$ , potažmo  $P_1$  a  $Q_1$ , je využívána distribuční soustava. (Tok výkonu je vyobrazen světle modrou barvou.)
- V čase  $t_1 = 0$  s dojde díky mimořádné situaci (např. zkratu) k odpojení od distribuční soustavy, přechodu do ostrovního provozu a zároveň k náběhu kogenerační jednotky napájené pístovým spalovacím motorem. (Tok výkonu znázorňuje zelená barva.)
- Nastane elektromechanický přechodný děj charakterizovaný zakolísáním frekvence.
- Později, již v ostrovním provozu, v čase  $t_2 = 4$  s nastane připojení dalšího odběrného místa, tj. zátěží  $R_1$  a  $L_1$ , resp.  $P_1$  a  $Q_1$ . Tato událost je rovněž charakterizována zakolísáním frekvence.

- Získaná data pro mechanickou frekvenci jsou uložena a nahrána do software Wolfram Mathematica a pokračuje vygenerování délky okna pro  $\pm 10\%$  jmenovitého počtu vzorků za periodu.
- Následuje zpracování dat odhadované frekvence metodou a další postup výpočtu je shodný, jako v kapitole 5.2. Zároveň jsou data zpracována pomocí metody FFT a průchody nulou.

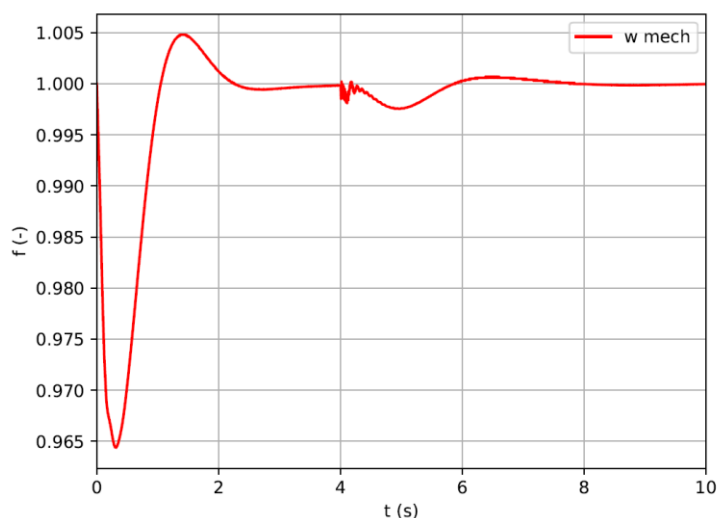
#### **6.1.4 Aplikace navržené metody estimace frekvence**

Při ostrovním provozu frekvenci v síti reguluje mechanický výkon a výstupní napětí je regulováno buzením. Výsledkem je známá hodnota mechanické frekvence na generátoru.

Pro aplikaci navrhované metody na výsledky ze simulace je důležité popsat, jakým způsobem jsou získána data pro analýzu:

- Při odpojení kogenerační jednotky od elektrizační soustavy je snímána mechanická frekvence generátoru, přičemž tato frekvence je považována za skutečnou hodnotu.
- Po odeznění přechodného děje dojde k připojení další zátěže. Sleduje se při tom, jak se tato zátěž projeví na průběhu mechanické frekvence.
- Získaná data z těchto simulací jsou porovnávána a analyzována navrhovanou metodou estimace frekvence pro různé nastavení parametrů.

Pro ověření přesnosti modelu slouží porovnání výpočtové frekvence zjištěné navrženou metodou s teoretickou hodnotou mechanické frekvence, která je považována za skutečnou frekvenci na výstupu z generátoru. Níže je vyobrazen průběh kolísání mechanické frekvence v poměrných jednotkách (vztaženo ke jmenovité hodnotě) v čase.



Obrázek 6.4: Mechanická frekvence generátoru

V grafu je dobře vidět zakolísání frekvence při odpojení od distribuční soustavy a náběh kogenerační jednotky s pístovým motorem. Zároveň je patrné pozdější frekvenční zakolísání během připojení další zátěže.

Na další výstupy simulace lze odkázat na přílohu C, kde je vyobrazen průběh napětí na generátoru, budicího proudu a mechanického výkonu během přechodného děje a následného připojení další zátěže. Pro analýzu výsledků se pozornost upíná výhradně k mechanické frekvenci generátoru.

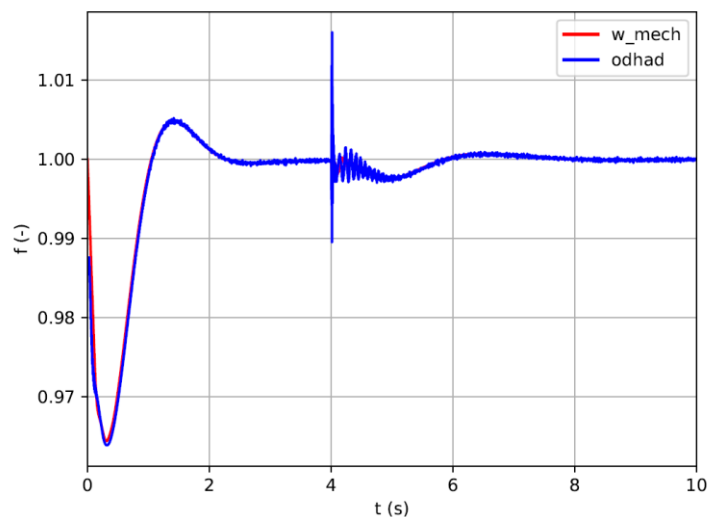
Hodnota odhadu frekvence vypočítaná navrhovanou a ostatními metodami se porovnává s průběhem na obrázku 6.4. Následně je porovnána skutečná a odhadovaná frekvence a vypočtena výsledná odchylka pro několik případů nastavení vstupních parametrů metody.

### 6.1.5 Vyhodnocení a přehled výsledků

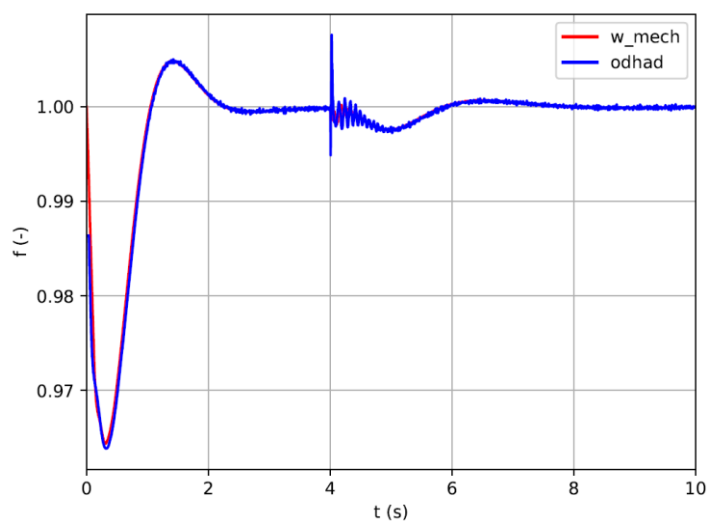
Průběh mechanické frekvence generátoru jasně ukazuje její celkové rozkolísání. Tato část práce se zaměřuje na aplikaci navržené metody pomocí výše popsaného algoritmu a porovnání, s jakou přesností je schopna vyrovnat se skutečnému průběhu. Zároveň je provedeno srovnání přesnosti vůči ostatním výše uvedeným metodám.

Výsledky ze simulací ukazují následující grafy, ve kterých je porovnána hodnota skutečné mechanické frekvence s hodnotou vypočtenou z navržené metody pro různé velikosti konstanty  $k_{per}$ .

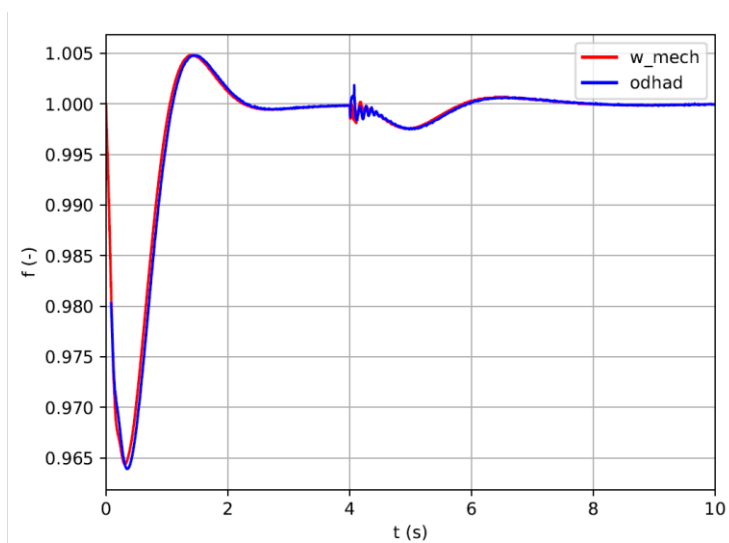
Grafy vyobrazují hodnota kolísání frekvence v poměrných jednotkách v závislosti na čase a dále celková chyba odhadu frekvence.



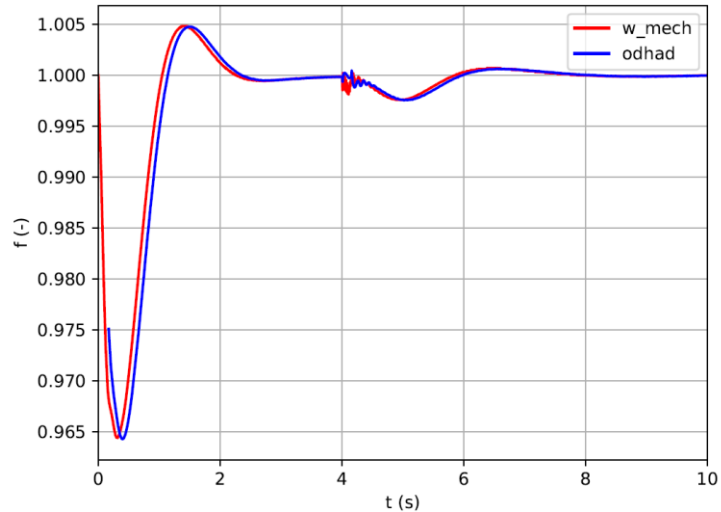
Obrázek 6.5: Porovnání mechanické frekvence se statistickou metodou s  $k_{per} = 1,6$



Obrázek 6.6: Porovnání mechanické frekvence se statistickou metodou s  $k_{per} = 2$



Obrázek 6.7: Porovnání mechanické frekvence se statistickou metodou s  $k_{per} = 5$



Obrázek 6.8: Porovnání mechanické frekvence se statistickou metodou s  $kper = 10$

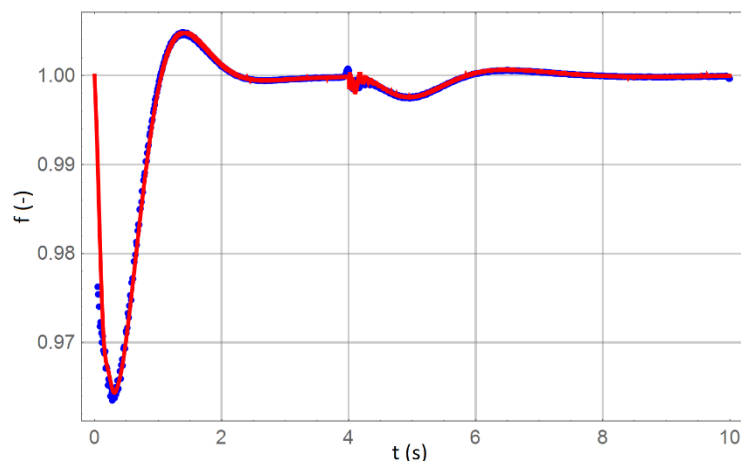
U výše uvedených průběhů je dobře vidět kolísání frekvence při odpojení od elektrizační soustavy a náběhu generátoru kogenerační jednotky napájené pístovým spalovacím motorem. V čase 4 s dojde k připojení zátěže, což charakterizuje rovněž frekvenční zakolísání.

Při užití navržené metody k určení frekvence je patrné, že pro vyšší úroveň  $kper$  je „hladší“ a přesnější průběh vyhodnocované frekvence, tedy hodnota lokálního extrému hodnocené funkce (viz kapitola 5.2.1). Lze si zároveň povšimnout, že pro vyšší  $kper$  je odhadovaný průběh zpožděn za skutečným, což způsobuje numerika algoritmu.

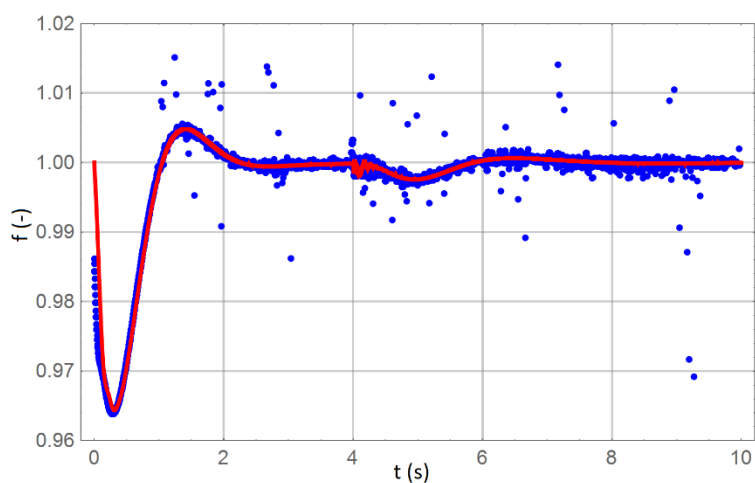
### Určení frekvence dalšími metodami

Aby bylo možné porovnat přesnost určení frekvence navrhované metody, bylo pro účel této případové studie provedeno určení frekvence pomocí FFT a detekcí průchodů nulou. V tomto případě je rovněž srovnávána hodnota mechanické frekvence generátoru s vypočtenou frekvencí získanou z jednotlivých metod.





Obrázek 6.9: Porovnání mechanické frekvence s FFT

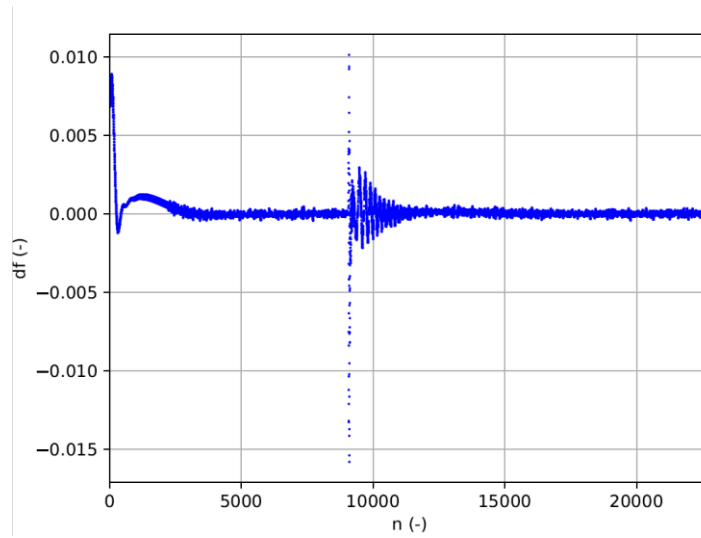


Obrázek 6.10: Porovnání mechanické frekvence s detekcí průchodů nulou

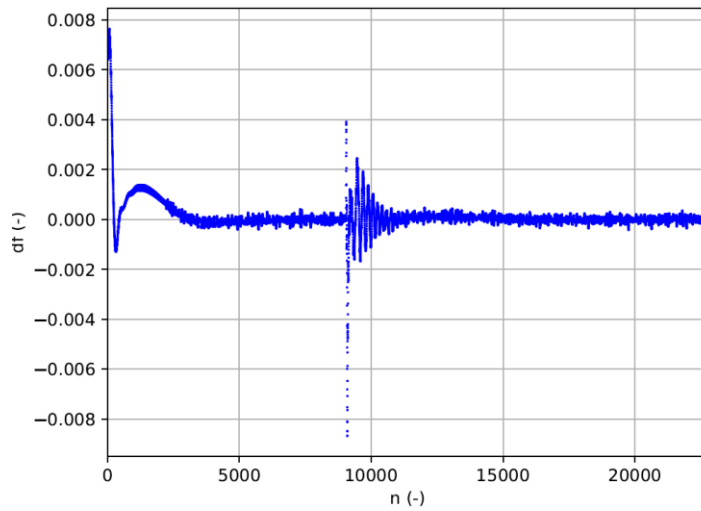
Z výše uvedených grafů je patrné rozkolísání estimace frekvence u obou porovnávaných metod. V případě algoritmu využívajícího FFT by k přesnějšímu určení frekvence bylo potřeba čtyř a více period signálu. Rovněž při srovnání mechanické frekvence s detekcí průchodů nulou nastává rozptýlení hodnot získané frekvence. Metoda průchodů nulou využívá výpočtu jedné periody. Pokud se znatelně mění fáze, tak na jedné periodě se to projeví změnou frekvence. Změna fáze činí průběh z matematického hlediska neperiodickým, avšak změna fáze je důležitá pro vyhodnocení synchronizátorů. Ostatní dvě metody využívají z podstaty více než jednu periodu a jelikož se fáze v čase mění kladným i záporným směrem, použití více period může vliv změny fáze kompenzovat.

### 6.1.5.1 Chyba určení frekvence pomocí jednotlivých metod

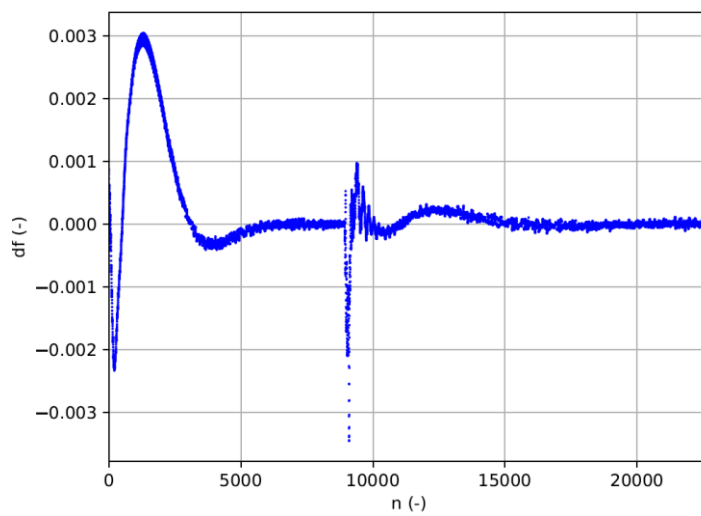
Úroveň  $k_{per}$  ovlivňuje přesnost určení frekvence metodou. Další výsledky ze simulací vyobrazují celkovou chybu estimace frekvence metodou na velikosti  $k_{per}$ .



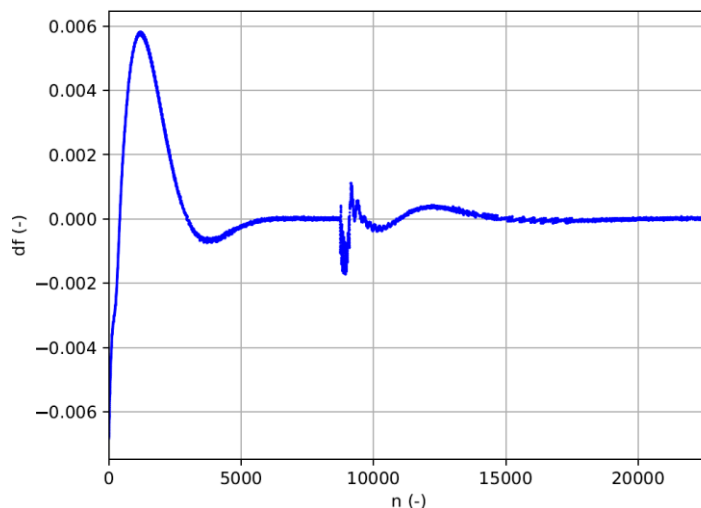
Obrázek 6.11: Chyba frekvence pro  $kper = 1,6$



Obrázek 6.12: Chyba frekvence pro  $kper = 2$



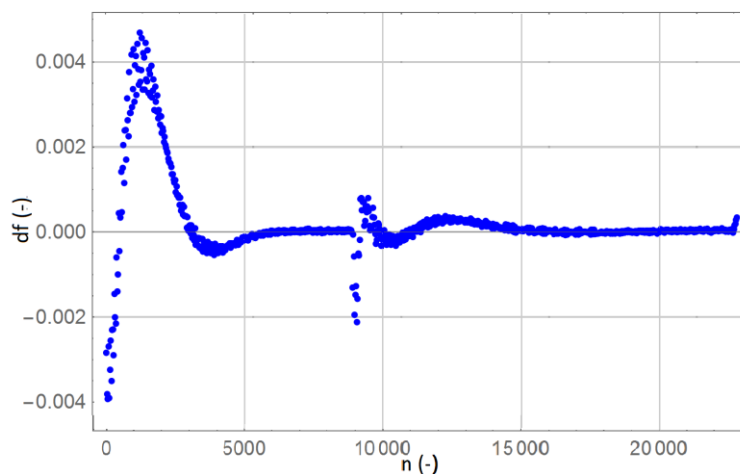
Obrázek 6.13: Chyba frekvence pro  $kper = 5$



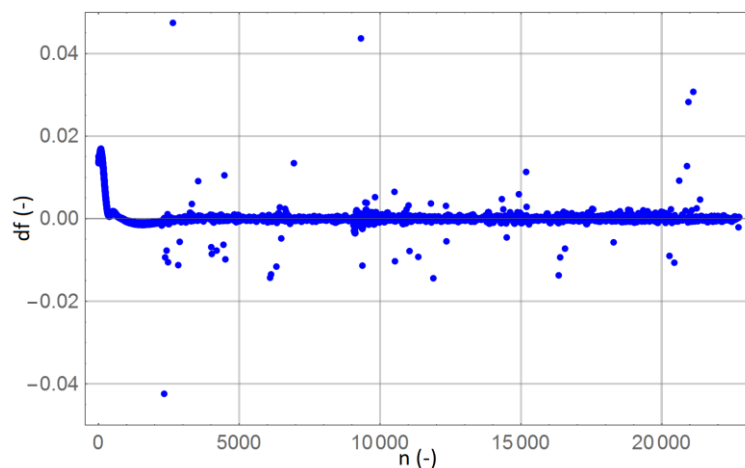
Obrázek 6.14: Chyba frekvence pro  $kper = 10$

Z výsledků lze dobře vyčíst, že pro vyšší velikost hodnoty  $kper$  je rozkolísání chyby frekvence menší, avšak vypočtený průběh frekvence se mírně liší od skutečného. Vzniká tak otázka pro budoucí vývoj a výzkum týkající se vhodně nastavené úrovně  $kper$ .

Pro FFT a průchody nulou vychází rozsah chyby podstatně vyšší, jak již bylo patrné z grafů při porovnání se skutečnou hodnotou mechanické frekvence. Situaci vyobrazují obrázky 6.15 a 6.16



Obrázek 6.15: Chyba frekvence pro FFT



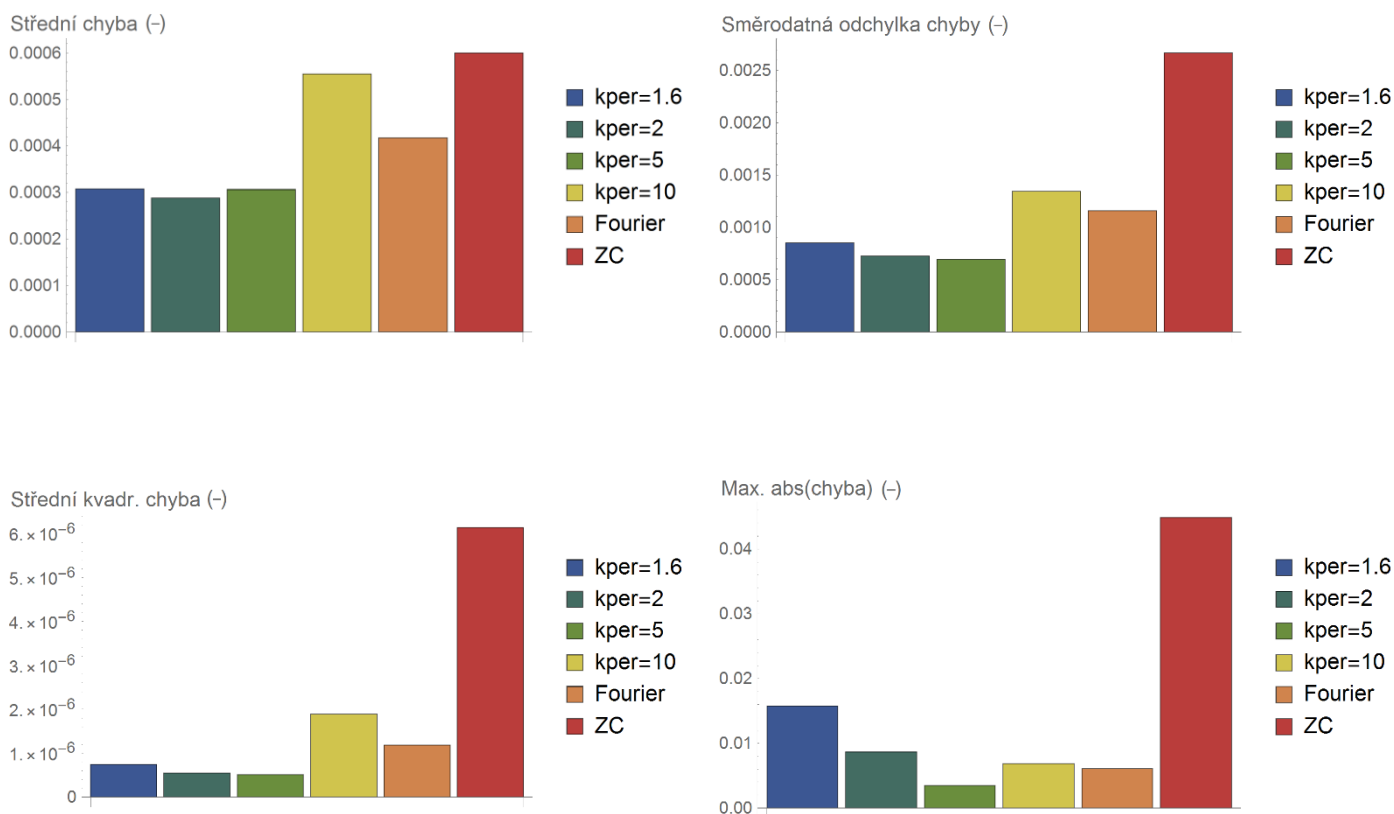
Obrázek 6.16: Chyba frekvence detekcí průchodů nulou

Na grafech výše je uvedena velikost kolísání relativní chyby odhadu frekvence metod FFT a průchody nulou v závislosti na počtu vzorků.

### 6.1.6 Porovnání přesnosti jednotlivých metod

V této části je provedeno shrnutí a celkové srovnání přesnosti určení frekvence jednotlivými metodami.

Jednotlivé grafy uvádí srovnání přesnosti navrhované metody pro různé hodnoty  $k_{per}$  s metodou využívající FFT a s průchody nulou (ZC). V porovnání je vyobrazena střední chyba frekvence, směrodatná odchylka, střední kvadratická chyba a maximální absolutní chyba.



Obrázek 6.17: Porovnání přesnosti jednotlivých metod

Velikost chyb určení frekvence pomocí jednotlivých metod je velmi malá a všechny metody dosahují vysoké přesnosti. Z výše uvedeného srovnání jednotlivých metod této případové studie, kde se porovnávala hodnota skutečné mechanické frekvence generátoru s frekvencí vypočtenou, se pro estimaci frekvence, jako nejpřesnější, hodí navrhovaná metoda s nižší úrovní velikosti  $kper$ .

Jak zvolit vhodnou volbu a nastavení tohoto parametru, který rychlost algoritmu a přesnost určení frekvence ovlivňuje, se hodí jako téma dalšího zkoumání, jak již bylo zmíněno.

### 6.1.7 Dílčí závěr

V případové studii je demonstrováno použití navržené metody na jednom z možných příkladů. V simulaci je zvolena kogenerační jednotka se spalovacím pístovým motorem, která pracuje jako záložní zdroj elektrické energie. Kogenerační jednotka dobře vyhovuje požadavkům konceptu decentralizace výroby elektrické energie a přechodu k sítím vycházejících z konceptu smart grids. Další důvod volby kogenerace spočívá v tom, že průběh mechanické frekvence generátoru je dobře pozorovatelný v případě přechodných jevů.

V této studii je provedena numerická simulace odpojení od soustavy a přechodu do ostrovního provozu distribuční sítě vn a v pozdějším čase připojení další zátěže. Takový scénář je zvolen z důvodu, aby byly dobře pozorovatelné přechodné děje způsobující frekvenční kolísání na generátoru. Výsledkem simulace je skutečná hodnota mechanické frekvence generátoru, která se následně porovnává s odhadovanou frekvencí z navržené metody.

Vyhodnocuje se srovnání frekvence mechanické s odhadovanou a celková chyba určení frekvence pro různé vstupní parametry metody. Pokud bude v použité metodě hodnota *kper* nižší, vypočtený průběh v podstatě kopíruje skutečnou frekvenci generátoru a velmi citlivě reaguje na přechodné děje a frekvenční kolísání. Nevýhodou tvoří větší rozsah chyby. Pokud však hodnota *kper* bude vysoká, dochází k méně přesné reprodukci skutečné frekvence, a tím i větší chybě. Na základě výsledků simulací lze tvrdit, že metoda poskytuje pro daný případ určení frekvence s vysokou přesností. Navrhovaná metoda poskytuje velmi přesné určení frekvence i v porovnání s metodami využívajícími průchody nulou a FFT.

Je důležité podotknout, že studie má sloužit především k ověření vlastností metody v elektrizační soustavě, zde v distribuční síti vn při sledování elektromechanického přechodného děje. Celkově tak metoda může sloužit jako možné rozšíření konceptu smart grids v napěťových hladinách vn.

Rovněž je podstatné zmínit, že uvedený příklad aplikace je jednou z možných variant použití navržené metody sloužící k výpočtu frekvence a fázorů pro elektroenergetiku. Ověření pro odhad odchylky parametrů, jako činného a jalového výkonu a aplikaci metody na různé provozní režimy i v rozsáhlejších elektrizačních soustavách, je předmětem další práce a dalších výzkumných aktivit.

## **7 Zhodnocení stanovených cílů**

Výzkumný problém předkládaný pro disertační práci v podobě uvedení nově navrhované metody estimace frekvence a fázorů v elektroenergetice byl vyřešen v rámci daného postupu.

### **7.1 Dílčí cíl**

- Popisu, definicím a principům konvenčních metod určování frekvence a fázorů v elektrizačních soustavách bylo dosaženo v kapitole 4.

### **7.2 Hlavní cíl**

- Uvedení, principům a vlastnostem metody bylo dosaženo v kapitolách 5.1, 5.2 resp. podkapitolách 5.1.1, 5.2.1.
- Numerických simulací, srovnání s konvenčními metodami, dílčích závěrů bylo dosaženo v kapitole 5.2.5.
- Ověření přesnosti metody určení frekvence na skutečném průběhu napětí zatíženém rušením v distribuční soustavě bylo dosaženo v kapitole 5.2.6.
- Porovnání přesnosti odhadu frekvence navržené metody a ostatních metod v případové studii bylo dosaženo v kapitole 6.

## 8 Závěr

Disertační práce se zabývá novou metodou určení frekvence a fázorů pro potřeby elektroenergetiky. Celý elektroenergetický systém se stává, z důvodu aplikace pokročilých technologií složitější a komplexnější. Udržení základních faktorů bezpečnosti a spolehlivosti se stává náročnějším. Ke správné funkci provozních systémů, řízení elektrizačních soustav a použitých technologií je důležité korektně zpracovat získaná provozní data a také přesně odhadnout hodnotu frekvence a fázorů obvodových veličin. Hlavním cílem práce je porovnat přesnost stanovení frekvence, která byla získána navrhovanou metodou s výsledky z metod konvenčních. Ověření praktické použitelnosti metody bylo provedeno i pro signály zatížené rušením. Z vypracovaných numerických simulací vyplývá, která metoda je nejvhodnější za daných podmínek a poskytuje nejpřesnější odhad určení frekvence.

Úvodní část práce shrnuje legislativní rámec ČR provozu a rozvoje elektrizačních sítí a podpory smart grids. Dále je v práci uveden technický přehled moderních systémů monitoringu, řízení a ochrany rozsáhlých oblastí v soustavě (WAMPaC), které jsou založeny na využití dat synchronních fázorů získaných za pomoci PMU.

Z analyzovaných materiálů vyplývá, že téma monitoringu soustavy s využitím moderních prvků zpracování dat spolu s podporou a rozvojem smart grids je velmi aktuální a díky obrovským státním investicím lze očekávat velké rozšíření těchto systémů a technologií v budoucnosti. To dokládá i značný počet výzkumných aktivit ve světě, na zmíněná témata vzniká obsáhlé množství vědeckých článků a publikací, jejichž některé závěry jsou zmíněny v této práci. V práci je prezentován nový pohled na zpracování dat získaných z měření synchronních fázorů používaného v přenosových soustavách a jeho možné použití pro potřeby distribuční sítě vysokého či velmi vysokého napětí.

Dále jsou v práci popsány vybrané konvenční metody k určení hodnot frekvence a fázorů v elektrizačních soustavách. Jsou uvedeny základní algoritmy výpočtu a princip jejich funkce.

Hlavní jádro práce spočívá v návrhu a uvedení nové metody pro estimaci frekvence a fázorů. Je kladen důraz na popis základního principu funkce metody a výpočetního algoritmu, který využívá statistické ukazatele. V numerických simulacích jsou pro signály zatížené rušením porovnány výsledky určení frekvence vypočtené konvenčními metodami, konkrétně průchodů nulou a FFT, s výsledky získanými navrženou metodou. Z dílčích závěrů lze konstatovat, že navržená metoda poskytuje přesné výsledky s velmi malou chybou a algoritmus



pracuje efektivně i pro malý počet detekovaných period signálu. Protože navržený algoritmus využívá statistických ukazatelů je navíc možné ze stanovených hodnot fázorů napětí a proudu zjistit, jaká je chyba určení činného a jalového výkonu. Tato skutečnost poskytuje významnou výhodu oproti konvenčním metodám, které uvedený výpočet neumožňují. Použitelnost navržené metody byla rovněž ověřena na skutečném periodickém signálu zatíženém rušením v distribuční soustavě vysokého napětí.

Přesnost určení frekvence navrženou metodou byla ověřena v případové studii na části distribuční sítě vysokého napětí, kde při zkratu nastane nejprve odpojení od soustavy a přechod do ostrovního provozu a následně dojde k připojení dalšího odběrného místa. Při takových poruchových událostech je často analyzován průběh kolísání frekvence v důsledku přechodných dějů. Jako záložní zdroj elektrické energie slouží kogenerační jednotka se spalovacím pístovým motorem. V simulaci se porovnává výstupní hodnota mechanické frekvence generátoru s odhadovanou frekvencí stanovenou pomocí navržené metody. Z jednotlivých výsledků simulací vyplývá, že prezentovaná metoda je schopna přesně detekovat frekvenční kolísání. Pro různé nastavení vstupních výpočetních parametrů metody je sledován průběh frekvence a velikost chyby. Vhodnou volbou výpočetního parametru je odhadovaný průběh frekvence v podstatě totožný s průběhem frekvence skutečné s velice malým rozsahem chyby.

Přínosy disertační práce jsou především v teoretické oblasti, tj. návrhu, popisu výpočetního algoritmu navržené metody a jeho srovnání s ostatními metodami, které jsou doporučeny ve standardu IEEE pro zpracování dat z měření fázorů v elektroenergetických systémech. Ze závěrů simulací je možné tvrdit, že metoda je robustní a dobře aplikovatelná pro určení frekvence u signálů s vyšším podílem rušení.

Metoda určování frekvence a fázorů, navržená v této disertační práci, poskytuje velmi přesný odhad frekvence a při vhodném nastavení výpočetního parametru je výsledek schopen prakticky kopírovat skutečný průběh frekvence a citlivě tak reagovat na jakoukoliv změnu v systému, např. připojení dodatečné zátěže. Stále je zde prostor k dalšímu výzkumu a ověření navrhované metody pro různé provozní stavy. Ze zjištěných poznatků je patrné, že potenciální implementace metody v měřicím zařízení se jeví jako perspektivní.

## **Přínosy práce**

Práce poskytuje komplexní legislativně – technický pohled na problematiku rozvoje elektrizačních sítí s cílem zdůraznit podstatu monitoringu, založeném na využití moderních technologií.

Hlavním přínosem práce je navržení nového typu metody estimace frekvence a fázorů pro potřeby elektroenergetiky. Jednotlivé kapitoly pojednávají o principu výpočetních algoritmů metody využívajících statistických dat. K ověření funkčnosti navržené metody bylo provedeno množství numerických simulací a následně pak porovnání s metodami konvenčními. Přínos lze spatřit v oblasti určení přesnosti frekvence pro signály zatížené rušením, kde navržená metoda poskytuje nejpřesnější odhad výsledků oproti srovnávaným. Výhoda spočívá rovněž v možnosti stanovení velikosti chyby hodnot odvozených veličin, jako je činný a jalový výkon.

Navržená metoda je aplikována v případové studii, kde je v simulacích vyhodnocena frekvence u průběhu přechodného děje generátoru kogeneračního zařízení v distribuční síti vysokého napětí. V daném případě dochází při volbě vhodné velikosti vstupního parametru navržené metody k velmi přesnému určení frekvence. Zařízení pracující na tomto výpočetním algoritmu by mohlo přispět k možnému rozšíření konceptu smart grids pro distribuční sítě vn, Jde tedy o pohled na možnou implementaci fázorového měření, které je využíváno v přenosových soustavách, do distribučních sítí vysokého, případně velmi vysokého, napětí.

## **Náměty pro další výzkum**

Navržená metoda estimace frekvence a fázorů poskytuje velmi dobrou přesnost určení frekvence i pro signál s velkou mírou rušení. Další výzkum by mohl ověřit algoritmus metody v jiných typech simulací vycházejících ze standardů IEEE a výsledky porovnat s více metodami, konvenčními i výzkumně publikovanými.

Budoucí výzkum by se mohl zaměřit na chování metody u signálů zatížených různým typem rušení a podrobněji ověřit vliv nepřesnosti určení činného a jalového výkonu. V simulacích rozsáhlejších elektroenergetických soustav vhodně zvolit vstupní parametry metody a přispět tak například k detekci provozu kogeneračních jednotek, resp. ostatních typů založených na OZE v soustavě a zlepšit tak monitoring sítí vn typu smart grid. Je možné se zaměřit na hlubší analýzu metody v rámci vyhodnocení frekvence a fázorů pro různé simulované scénáře provozu smart grids.

Námět k další výzkumné činnosti může mj. spočívat v implementaci metody do měřicího zařízení. V takovém případě bude možné ověřit nastavení vstupních parametrů a funkčnosti algoritmu na reálných systémech a v konkrétních podmínkách.

Metoda samotná a další ověření jejich vlastností mohou být potenciálně uplatněny k dalšímu výzkumu i v ostatních technických oblastech, kde je potřeba zabývat se vyhodnocením frekvence a periodicitou signálu.

## 9 Literatura

- [1] Státní energetická koncepce České (SEK). Ministerstvo průmyslu a obchodu, Praha: prosinec 2004. Dostupné také z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statni-energeticka-politika/2016/12/Statni-energeticka-koncepce-\\_2015\\_.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statni-energeticka-politika/2016/12/Statni-energeticka-koncepce-_2015_.pdf)
- [2] Národní akční plán čisté mobility (NAP CM), Ministerstvo průmyslu a obchodu, Praha: říjen 2015. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/54377/62106/640972/priloha001.pdf>
- [3] Zpráva o plnění nástrojů Státní energetická koncepce České do roku 2017. Ministerstvo průmyslu a obchodu, Praha: 2016. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statni-energeticka-politika/2018/10/Zprava-o-plneni-nastroju-SEK-do-roku-2017.pdf>
- [4] Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG), Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, Praha: únor 2015. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/52353/60358/633373/priloha003.pdf>
- [5] Aktualizace státní energetické koncepce České republiky. Ministerstvo průmyslu a obchodu, Praha: únor 2016 Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/26650/46323/556505/priloha001.pdf>
- [6] Usnesení vlády České republiky. Schválení aktualizované Státní energetické koncepce. Praha: 18. květen 2015.
- [7] Zpráva o průběžném plnění Národního akčního plánu pro chytré sítě (NAP SG). Ministerstvo průmyslu a obchodu, Praha: prosinec 2016. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2018/1/Zprava-NAP-SG.pdf>
- [8] P. Mareček. "Nové trendy v konceptu Smart grid. " Praha, 2016. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce prof. Ing. Josef Tlustý, CSc.
- [9] D. Brett, "Smart grid, Definition" Student Energy, dostupné také z: [https://www.studentenergy.org/topics/smartgrid?fbclid=IwAR0V1hKbS9\\_5mueNL4FVvmzZcyXuCLXTvQqkWqWyEfkNKmlw6v6Me3uXHweU](https://www.studentenergy.org/topics/smartgrid?fbclid=IwAR0V1hKbS9_5mueNL4FVvmzZcyXuCLXTvQqkWqWyEfkNKmlw6v6Me3uXHweU)
- [10] M. A. Elgenedy, A. M. Massoud and S. Ahmed, "Smart grid self-healing: Functions, applications, and developments," 2015 First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE), Doha, 2015, pp. 1-6.
- [11] "Smart grid, Tracking Clean Energy Progress," International Energy Agency, 23. May 2018, dostupné z: <https://www.iea.org/tcep/energyintegration/smartgrids/?fbclid=IwAR16p-SULcpjwfMcynd4PRAe9UFPdiW94OOpUoGcxJCYXKddzdL0FsGpzsA>
- [12] I. Mohamed, "Technology Trends that are Transforming Smart Grid Strategy," 12 - 14 May 2015, African Utility Week, ESI Africa, Cape Town, South Africa, dostupné z: <https://www.esi-africa.com/wp-content/uploads/2015/05/Imraan->

Mohamed.pdf?fbclid=IwAR2IH-8UPYQ9Drkj1asOx-  
Fe26Ch3bdJkI3w9V4IC8nIGYgxOKdPZzdjvmQ

- [13] M. Xiaoyu, "Smart Grid," Washington University in St. Louis, Computer Science and Engineering, 4/05/2010, dostupné z: <https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-10/ftp/grid/index.html?fbclid=IwAR0--Hyoibm05o5BWNyzmEWOKg5H94WhQmuhwnvxenei6xDA1cW1MWosSmA#1>
- [14] P. Mastný et al., "Obnovitelné zdroje elektrické energie," Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [15] A. Luque, S. Hegedus, "Handbook of photovoltaic science and engineering," 2nd ed. Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley, 2011. ISBN 9780470721698.
- [16] G. N. Tiwari, A. Tiwari, Shyam, "Handbook of solar energy: theory, analysis and applications," Singapore: Springer, [2016]. Energy systems in electrical engineering. ISBN 9789811008054.
- [17] E. Dvorský, P. Hejtmánková, "Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie," Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7.
- [18] D. Flin, "Cogeneration: a user's guide", London: Institution of Engineering and Technology, 2010. IET renewable energy series, 11. ISBN 978-0-86341-738-2.
- [19] J. Votava, J. Kyncl and L. Straka, "Optimization of local cogeneration stations," 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Brno, 2018, pp. 1-6.
- [20] J. Tlustý et al., "Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí, " Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [21] "Obří "blackout" zahalil v roce 2003 část USA a Kanady do tmy [online]. " 13. srpen 2018 [cit. 2019-01-09]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/obri-blackout-zahalil-v-roce-2003-cast-usa-a-kanady-do-tmy/>
- [22] A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems," in IEEE Computer Applications in Power, vol. 6, no. 2, pp. 10-15, April 1993.
- [23] J. De La Ree, V. Centeno, J. S. Thorp and A. G. Phadke, "Synchronized Phasor Measurement Applications in Power Systems," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, no. 1, pp. 20-27, June 2010.
- [24] "IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems," IEEE Standard C37.118.1-2011, Dec. 2011.
- [25] "IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems," IEEE Standard C37.118.2-2011, Dec. 2011.
- [26] Z. Müller, "Intelligent transmission and distribution systems, " Praha, 2014. Habilitation thesis. České vysoké učení technické v Praze.

- [27] D. A. Haughton and G. T. Heydt, "A Linear State Estimation Formulation for Smart Distribution Systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1187-1195, May 2013.
- [28] S. Sarri, L. Zanni, M. Popovic, J. Le Boudec and M. Paolone, "Performance Assessment of Linear State Estimators Using Synchrophasor Measurements," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 3, pp. 535-548, March 2016.
- [29] J. Liu, J. Tang, F. Ponci, A. Monti, C. Muscas and P. A. Pegoraro, "Trade-Offs in PMU Deployment for State Estimation in Active Distribution Grids," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 915-924, June 2012.
- [30] J. Liu, F. Ponci, A. Monti, C. Muscas, P. A. Pegoraro and S. Sulis, "Optimal Meter Placement for Robust Measurement Systems in Active Distribution Grids," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 5, pp. 1096-1105, May 2014.
- [31] Z. Y. Dong, P. Zhang, "Emerging techniques in power system analysis," London: Springer, c2010. ISBN 978-3-642-04281-2.
- [32] S. A. Nezam Sarmadi, A. S. Dobakhshari, S. Azizi and A. M. Ranjbar, "A Sectionalizing Method in Power System Restoration Based on WAMS," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 190-197, March 2011.
- [33] J. F. Hauer et al., "Use of the WECC WAMS in Wide-Area Probing Tests for Validation of System Performance and Modeling," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 250-257, Feb. 2009.
- [34] J. Kim et al., "Study of the Effectiveness of a Korean Smart Transmission Grid Based on Synchro-Phasor Data of K-WAMS," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 411-418, March 2013.
- [35] W. Juanjuan, F. Chuang and Z. Yao, "Design of WAMS-Based Multiple HVDC Damping Control System," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 2, pp. 363-374, June 2011.
- [36] S. Wang, W. Gao, J. Wang and J. Lin, "Synchronized Sampling Technology-Based Compensation for Network Effects in WAMS Communication," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 837-845, June 2012.
- [37] S. Das and T. Singh Sidhu, "Application of Compressive Sampling in Synchrophasor Data Communication in WAMS," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 1, pp. 450-460, Feb. 2014.
- [38] F. Haghghatdar Fesharaki, R. Hooshmand and A. Khodabakhshian, "Simultaneous Optimal Design of Measurement and Communication Infrastructures in Hierarchical Structured WAMS," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 312-319, Jan. 2014.

- [39] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, A. Safdarian, A. Davoudi and M. Shahidehpour, "Synchrophasor Measurement Technology in Power Systems: Panorama and State-of-the-Art," in *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1607-1628, 2014.
- [40] M. Beg Mohammadi, R. Hooshmand and F. Haghghatdar Fesharaki, "A New Approach for Optimal Placement of PMUs and Their Required Communication Infrastructure in Order to Minimize the Cost of the WAMS," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 84-93, Jan. 2016.
- [41] W. Sattinger and G. Giannuzzi, "Monitoring Continental Europe: An Overview of WAM Systems Used in Italy and Switzerland," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 13, no. 5, pp. 41-48, Sept.-Oct. 2015.
- [42] B. Appasani and D. K. Mohanta, "Co-Optimal Placement of PMUs and Their Communication Infrastructure for Minimization of Propagation Delay in the WAMS," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 5, pp. 2120-2132, May 2018.
- [43] R. Dubey, M. Popov and J. d. J. C. Muro, "Cost Effective Wide Area Measurement Systems for Smart Power Network," in *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 85-93, Sept. 2018.
- [44] Y. Ota, T. Hashiguchi, H. Ukai, M. Sonoda, Y. Miwa and A. Takeuchi, "Monitoring of Interconnected Power System Parameters using PMU based WAMS," 2007 IEEE Lausanne Power Tech, Lausanne, 2007, pp. 1718-1722.
- [45] J. S. Bhonsle and A. S. Junghare, "An optimal PMU-PDC placement technique in wide area measurement system," 2015 International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM), Chennai, 2015, pp. 401-405.
- [46] B. Wang and J. Lu, "A method for online analyzing excitation systems performance based on PMU measurements," 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, 2011, pp. 1538-1542.
- [47] D. Macii, D. Fontanelli and D. Petri, "Performance of Phasor Measurement Units for power quality event detection in urban distribution grids," 2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), Trento, 2016, pp. 1-7.
- [48] L. J. Collazo and E. O. Carrillo, "Comparison of Windowed Fourier Transform and dynamic phasors for Power Quality Analysis," 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Seattle, WA, 2009, pp. 1-5.
- [49] A. Jain, A. Bhardwaj, S. Kumar and S. Bhullar, "Implementation Techniques for Frequency Phasor Estimation in Phasor Measurement Units (PMUs)," 2018 3rd International Conference On Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU), Bhimtal, 2018, pp. 1-6.

- [50] Mao Anjia, Yu Jiayi and Guo Zhizhong, "PMU placement and data processing in WAMS that complements SCADA," IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, San Francisco, CA, 2005, pp. 780-783 Vol. 1.
- [51] Z. Jin, H. Zhang and C. Li, "WAMS light and its deployment in China," 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha, 2015, pp. 1373-1376.
- [52] A. K. Pradhan, A. Routray and A. Basak, "Power system frequency estimation using least mean square technique," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 3, pp. 1812-1816, July 2005.
- [53] H. M. Khalid and J. C. - Peng, "A Bayesian Algorithm to Enhance the Resilience of WAMS Applications Against Cyber Attacks," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 4, pp. 2026-2037, July 2016.
- [54] U. Adhikari, T. Morris and S. Pan, "WAMS Cyber-Physical Test Bed for Power System, Cybersecurity Study, and Data Mining," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 6, pp. 2744-2753, Nov. 2017.
- [55] X. Huang, J. Liu, Y. Liu, L. Xu, J. Yang and Y. Ni, "A GA based optimized PMU-location-decision algorithm considering WAMS reliability," 2014 International Conference on Power System Technology, Chengdu, 2014, pp. 433-439.
- [56] F. Frolov, "Určování frekvence a fázorů v elektroenergetice," Praha. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/MAA/Ur%C4%8Dov%C3%A1n%C3%AD%20frekvence%20a%20f%C3%A1zor%C5%AF%20v%20elektroenergetice.pdf>
- [57] F. Vejražka, "Signály a soustavy," Vyd. 4. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-00450-3.
- [58] J. Brokešová, "Teoretické základy spektrální analýzy [online].," 1-275 [cit. 2019-01-08]. Praha, 2008. Dostupné z: <http://geo.mff.cuni.cz/studium/Brokesova-FourierovaSpektralniAnalyza.pdf?fbclid=IwAR1zref3BWz-W3EO4P88qsCVdmb6ZQTpX0orlstzthEmjjrapYmzvi0HPPA>
- [59] M. Vetterli, P. Marziliano and T. Blu, "Sampling signals with finite rate of innovation," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 50, no. 6, pp. 1417-1428, June 2002.
- [60] J. Berent, P. L. Dragotti and T. Blu, "Sampling Piecewise Sinusoidal Signals With Finite Rate of Innovation Methods," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 58, no. 2, pp. 613-625, Feb. 2010.
- [61] P. Shukla and P. L. Dragotti, "Sampling schemes for 2-D signals with finite rate of innovation using kernels that reproduce polynomials," IEEE International Conference on Image Processing 2005, Genova, 2005, pp. II-454.



- [62] Z. Wang and J. Zhu, "Sampling of signals with finite rate of innovation in parameter space," 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Ningbo, 2015, pp. 1-5.
- [63] X. Wei and P. L. Dragotti, "Universal sampling of signals with finite rate of innovation," 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Florence, 2014, pp. 1803-1807.
- [64] M. Navara, A. Němeček, "Numerické metody. " Vydavatelství ČVUT, Praha, skriptum, 2003. ISBN 80-01-02689-2.
- [65] P. M. Ramos, A. Cruz Serra, "Comparison of frequency estimation algorithms for power quality assessment, " Measurement 42.9 (2009): 1312-1317.
- [66] T. Weissbach and E. Welfonder, "High frequency deviations within the European Power System: Origins and proposals for improvement," 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Seattle, WA, 2009, pp. 1-6.
- [67] V. Hlaváč, M. Sedláček, "Zpracování signálů a obrazů". Vydavatelství ČVUT, Praha, skriptum, 2009.
- [68] V. Hlaváč, "Lineární integrální transformace - Fourierova transformace, " České vysoké učení technické v Praze, katedra kybernetiky, Centrum strojového vnímání. Dostupné také z:  
<http://cmp.felk.cvut.cz/~hlavac/Public/TeachingLectures/p2LinIntTxFourier.pdf>
- [69] S. Liu, T. Guo, J. Li and J. Wu, "Adaptive DFT algorithm for measuring synchrophasors based on shifting window symmetrical," 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha, 2015, pp. 722-726.
- [70] J. Kyncl, A. Hariram and M. Novotny, "On measurement of synchronous phasors in electrical grids," 2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2013), Beijing, 2013, pp. 2972-2975.
- [71] R. Procházka, J. Kyncl, L. Straka, L. Musálek, A. Hariram, "Simulation and analysis of ferroresonance in power circuits with a nanocrystalline magnetic materials," In: EMSA 2014. Vienna: Vienna University of Technology, 2014. pp. 249. ISBN 978-3-85465 021-8.
- [72] Model the dynamics of three-phase round-rotor or salient-pole synchronous machine. [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com) [online]. [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/synchronousmachine.html>

# 10 Seznam publikací

## 10.1 Publikace vztahující se k tématu disertační práce

### Publikace v impaktovaných časopisech

- [P1] L. Straka, L. Vetoshkin, J. Kyncl, J. Votava, Z. Müller, J. Rimbala, "A Novel Approach to Frequency Estimation for Phasor Measurement Systems," Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. ISSN 2196-5420. *Podíl autora: 17 %.* Podáno (status: underreview).

### Publikace v recenzovaných časopisech

- [P2] L. Straka, "Možnosti využití monitoringu synchronních fázorů," Energetika. 2019, ISSN 0375-8842. *Přijato k tisku.*
- [P3] I. Cimbolínek, J. Tůma, L. Straka, "Vliv obnovitelných zdrojů elektřiny na řízení elektrizační soustavy," Elektro. 2015, 25(3), 90-93. ISSN 1210-0889. *Podíl autora: 33 %.*

### Patenty

Nejsou žádné patenty vztahované k práci.

### Publikace excerpované ISI

- [P4] J. Votava, J. Kyncl and L. Straka, "Energy consumption measurements based on numerical integration," 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Brno, 2018, pp. 1-4. *Podíl autora: 33 %.*
- [P5] J. Votava, J. Kyncl and L. Straka, "Optimization of local cogeneration stations," 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Brno, 2018, pp. 1-6. *Podíl autora: 33 %.*
- [P6] G. Fandi, Z. Muller, L. Straka and J. Svec, "FACTS devices influence on power losses in transmission systems," Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Brno, 2014, pp. 29-33. *Podíl autora: 25 %.*

### Publikace ostatní

- [P7] J. Kyncl, L. Straka, A. Hariram, "Měření frekvence a fázorů v elektrizační soustavě," In: Proceedings of ELEN 2014. Praha: ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky, 2014. ISBN 978-80-01-05654-7. *Podíl autora: 33 %.*
- [P8] L. Straka, "Moderní lokalizace poruch v sítích vvn," In: Technológia Europea 2013. Hradec Králové: Akademické sdružení MAGNANIMITAS, 2013. ISBN 978-80 87952-01-6. *Podíl autora: 100 %.*
- [P9] L. Musálek, L. Straka, M. Bálský, L. Musil, "Use of a solar concentrator to produce electrical energy and heat," In: ELEN 2012. Praha: vydavatelství ČVUT v Praze, 2012. pp. 1-5. ISBN 978-80-01-05096-5. *Podíl autora: 25 %.*

## 10.2 Ostatní publikace

### Publikace v impaktovaných časopisech

Nejsou žádné ostatní publikace v impaktovaných časopisech.

### **Publikace v recenzovaných časopisech**

Nejsou žádné ostatní publikace v recenzovaných časopisech.

### **Patenty**

Nejsou žádné ostatní patenty.

### **Publikace excerpované ISI**

- [P10] L. Musálek, Z. Novák, L. Žák and L. Straka, "Model and optimization of induction heating for annealing rotationally symmetrical bodies," 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Prague, 2016, pp. 1-4. *Podíl autora: 25 %.*
- [P11] L. Straka and G. Fandi, "Distance protection based on Artificial Neural Networks," Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Brno, 2014, pp. 91-94. *Podíl autora: 50 %.*
- [P12] R. Procházka, J. Kyncl, L. Straka, L. Musálek, A. Hariram, "Simulation and analysis of ferroresonance in power circuits with a nanocrystalline magnetic materials," In: EMSA 2014. Vienna: Vienna University of Technology, 2014. pp. 249. ISBN 978-3-85465 021-8. *Podíl autora: 20 %.*
- [P13] L. Musálek, J. Doubek, J. Kyncl, Z. Novák, L. Straka, "Static and Dynamic Characteristics of PPMT Electromagnet," In: XXXVI MIĘDZYNARODOWA KONFERENCJA Z PODSTAW ELEKTROTECHNIKI I TEORII OBWODÓW. Ustron: Instytut Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, 2013. pp. 75-76. ISBN 978-83-85940-35-7. *Podíl autora: 20 %.*

### **Publikace ostatní**

- [P14] T. Terrich, R. Procházka, J. Hlaváček, Z. Pelánová, L. Straka, "Construction design of the high-voltage optical sensors," In: 5. mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2014. ISBN 978-80-87952-07-8. *Podíl autora: 20 %.*

## **10.3 Ohlasy**

Nejsou žádné ohlasy.

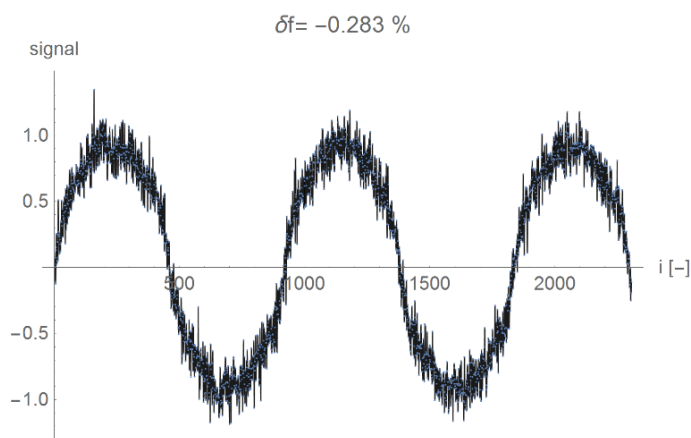
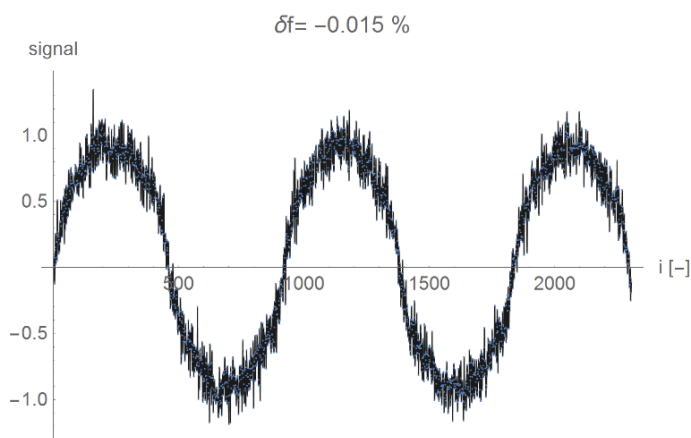
# 11 Přílohy

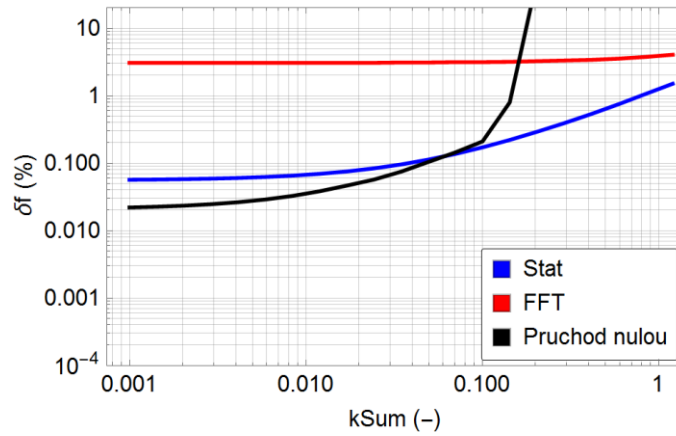
## Příloha A

V této části jsou uvedeny výsledky ze simulací při porovnání navrhované metody využívající statistických dat s metodami konvenčními pro odlišné vstupní parametry.

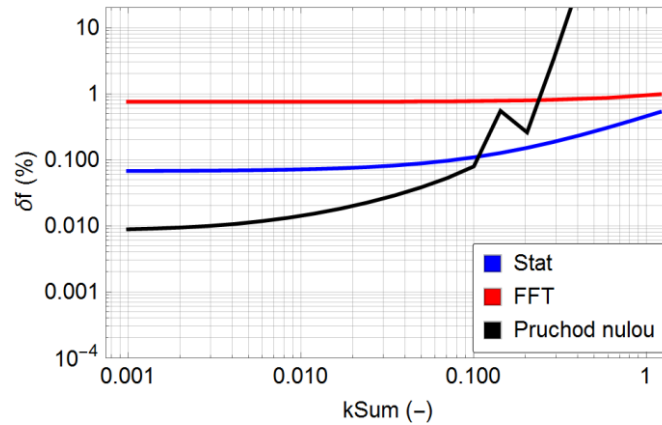
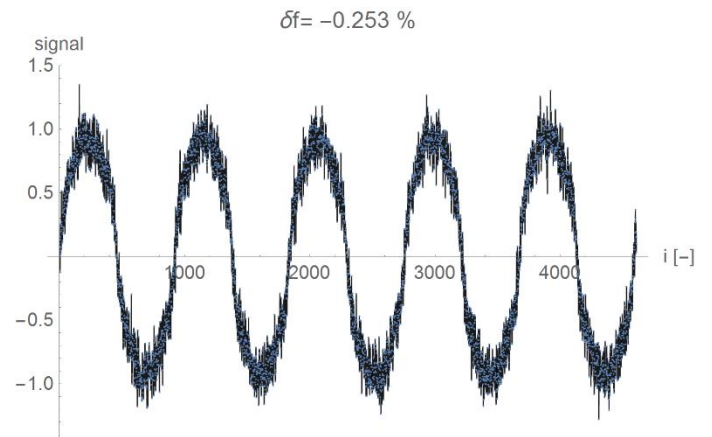
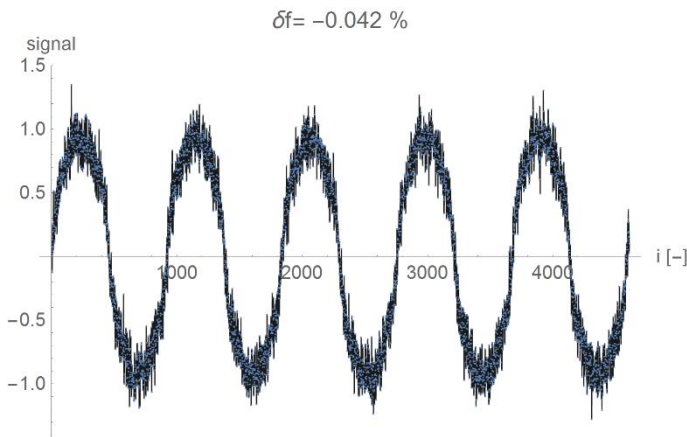
- Vzorkovací frekvence je 48000 vzorků za sekundu, tedy 960 vzorků za jmenovitou periodu signálu se základní frekvencí 50 Hz. Standardní odchylka Gaussova rozdělení byla zvolena tak, aby byla 0,4 V.  $kNoise$  je koeficient generovaného šumu, což znamená, že každá skupina generovaného šumu byla vynásobena exponenciálním rozdělením, které se skládá ze 21 hodnot od 0,001 do 1,2 včetně.
- {"kPerSampl,{ampl,i,fi}", {2.4, {{1, 1, 0}, {0.1, 3, 0}, {0.05, 5, 0}, {0.025, 7, 0}, {0.0125, 7, 0}, {0.01, 11, 0}}}}, kde  $kPerSampl$  uvádí násobek frekvence vyšší než nominální,  $\{ampl, i, fi\}$  jsou hodnoty amplitudy, harmonické a jejího fázového posunu. Tedy výsledek simulace je pro 2,4 násobek jm. frekvence, 1., 3., 5., 7. a 11. harmonickou bez fázového posunu.

První odrážka představuje shodné hodnoty všech vstupních parametrů, v poslední se odlišují.

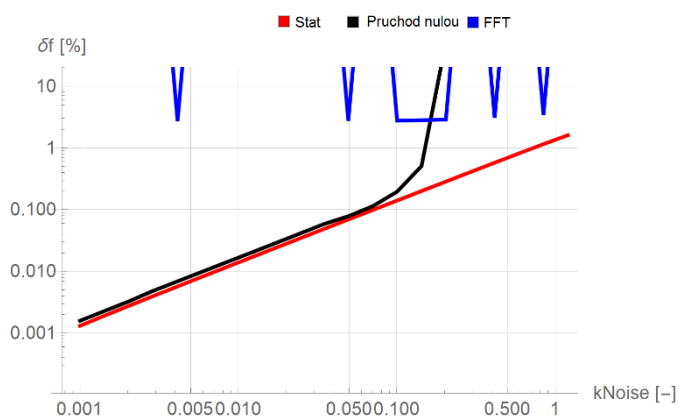
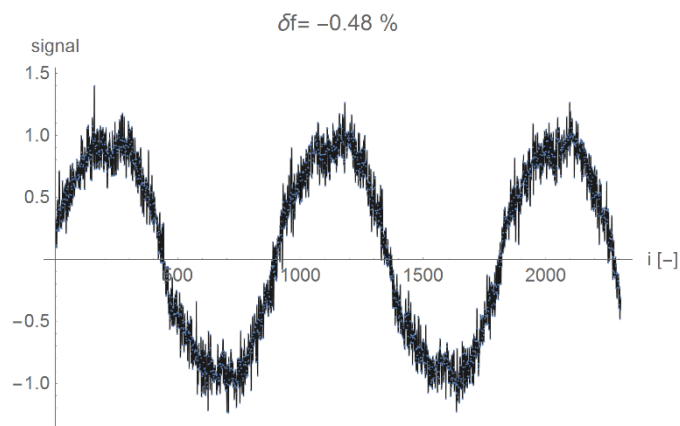
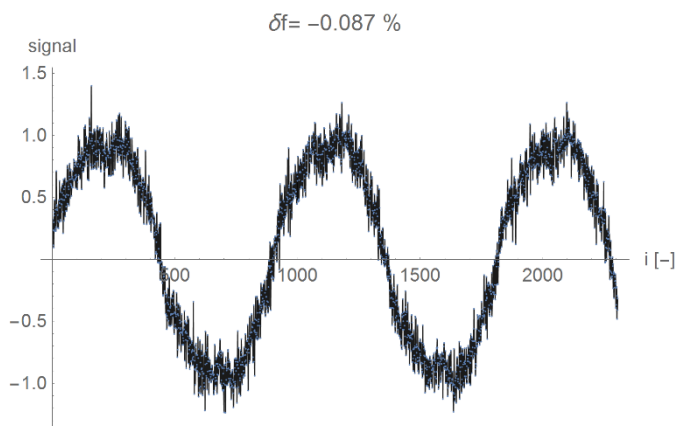




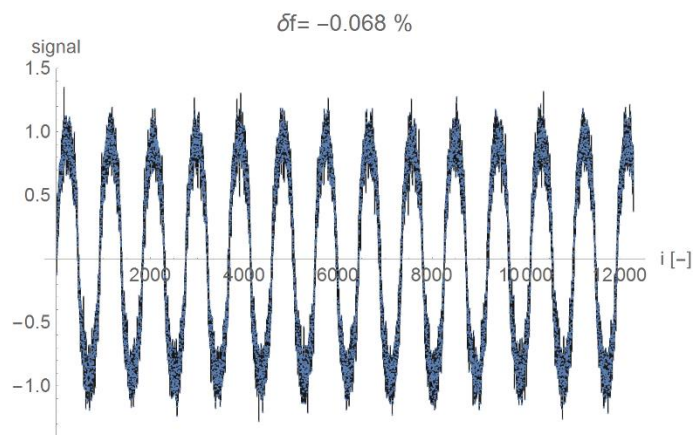
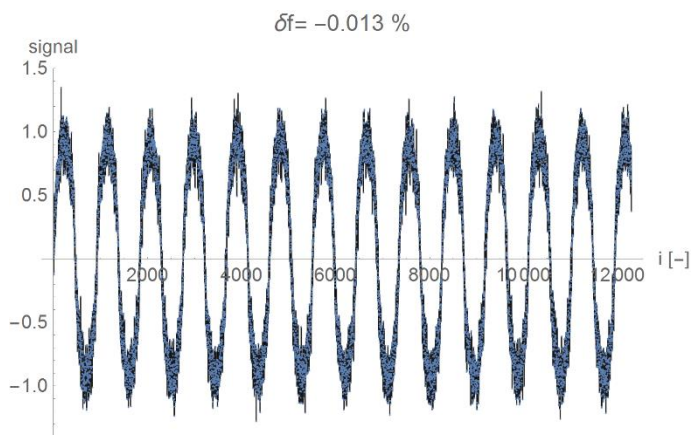
- Další výstupy ze simulace pro 4,8 násobek jmenovité periody, 1., 3., 5. harmonickou s velikostí amplitudy 1 V, 0,1 V, 0,05 V bez fázového posunu.

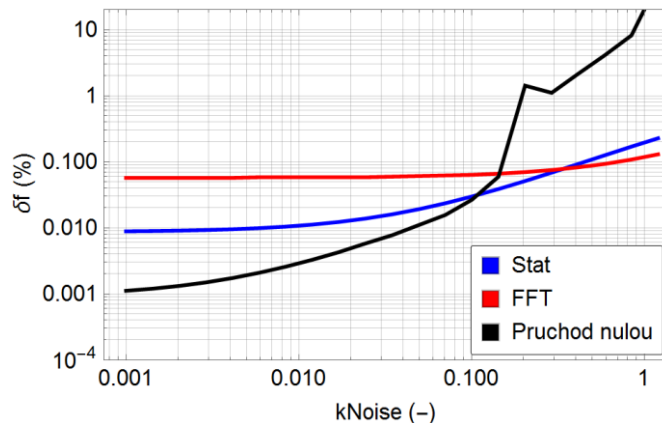


- Další výstupy ze simulace pro 2,4 násobek jmenovité periody, 1., 3., 5., 7. a 11. harmonickou s fázovým posunem 1,1.

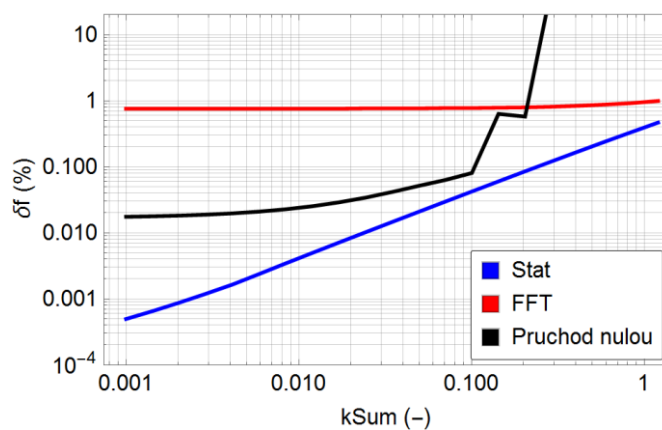
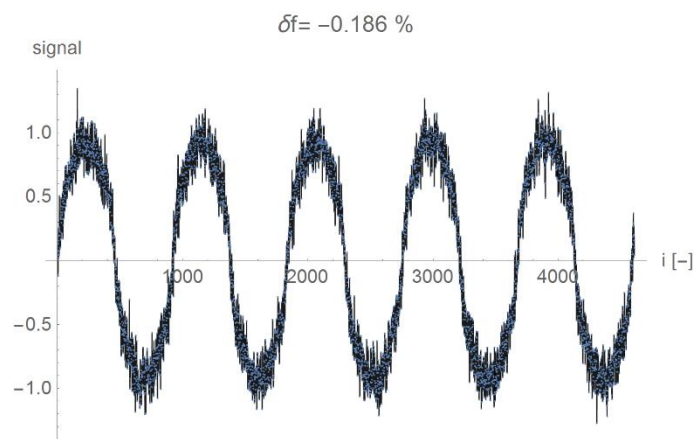
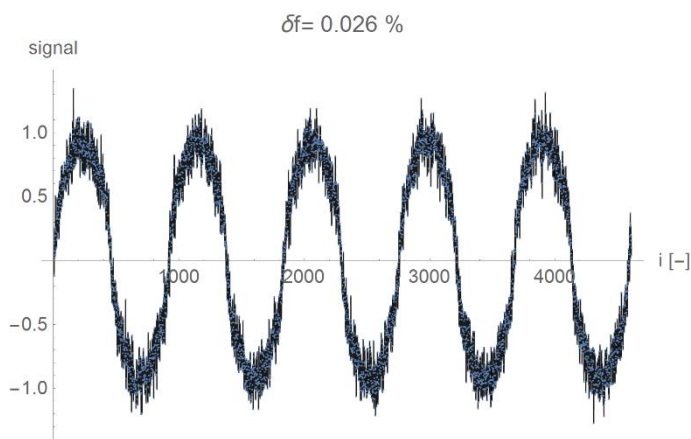


- Další výstupy ze simulace pro 12,8 násobek jmenovité periody, 1., 3., 5., 7. a 11. harmonickou s fázovým posunem 1,1.

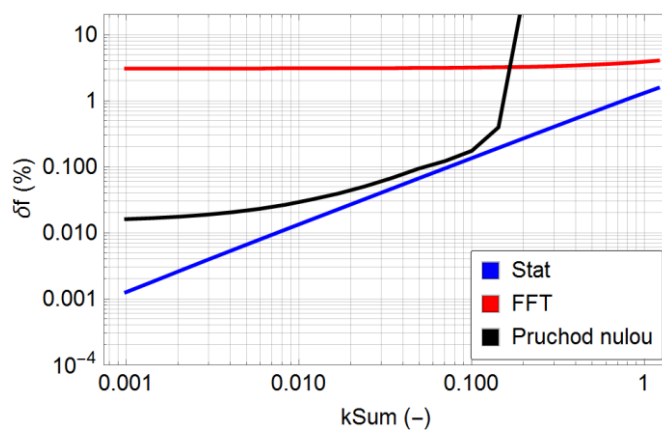
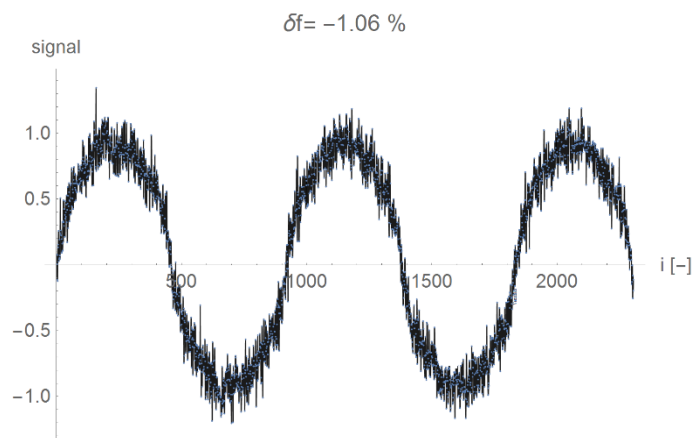
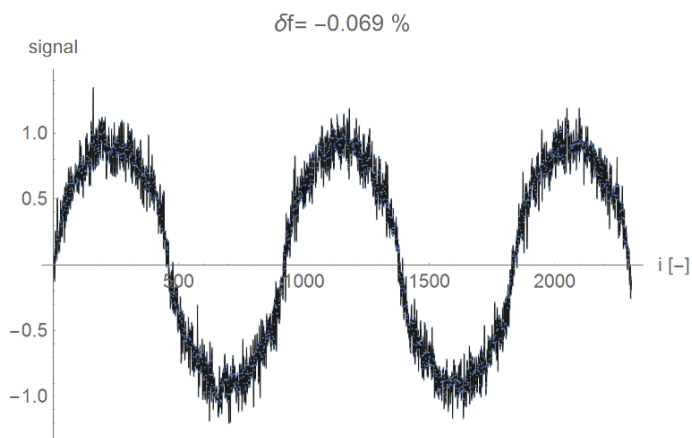




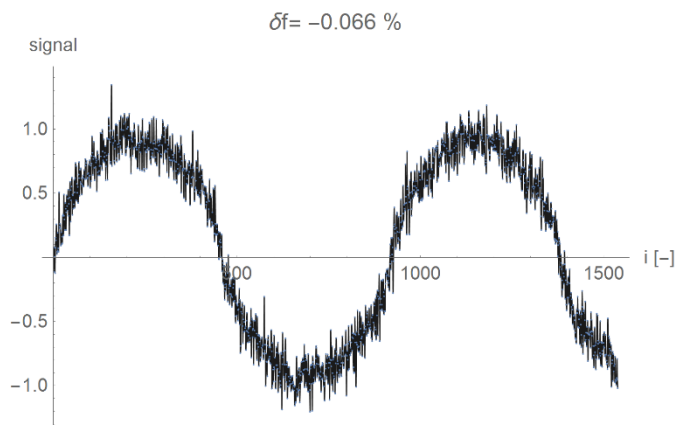
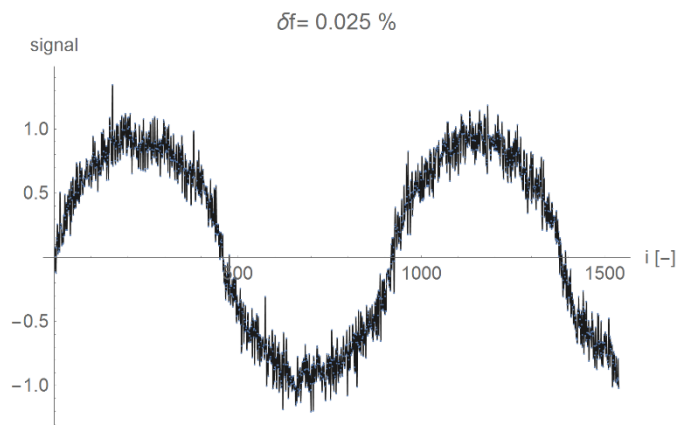
- Další výstupy ze simulace pro 4,8 násobek jmenovité periody, 1., 3., 5., 7. a 11. harmonickou s fázovým posunem 1,1.



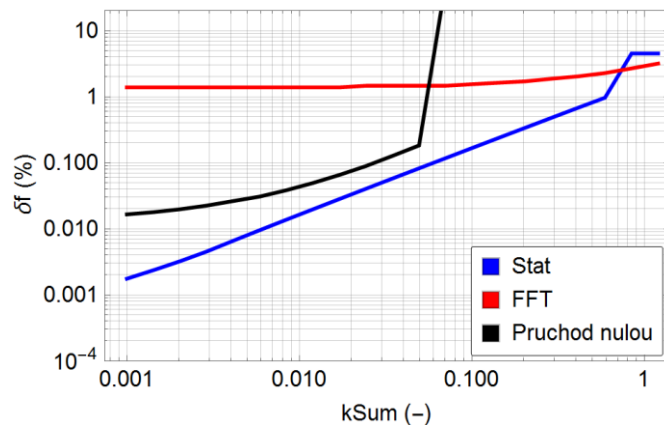
- Další výstupy ze simulace pro 2,4 násobek jmenovité periody, 1., 3., 5., 7. a 11. harmonickou s fázovým posunem 1,1.



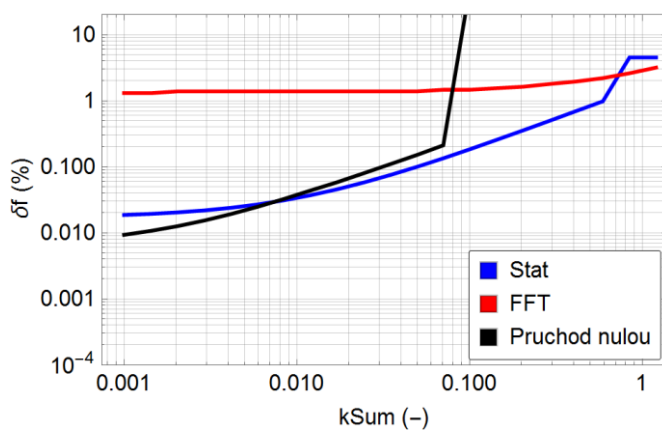
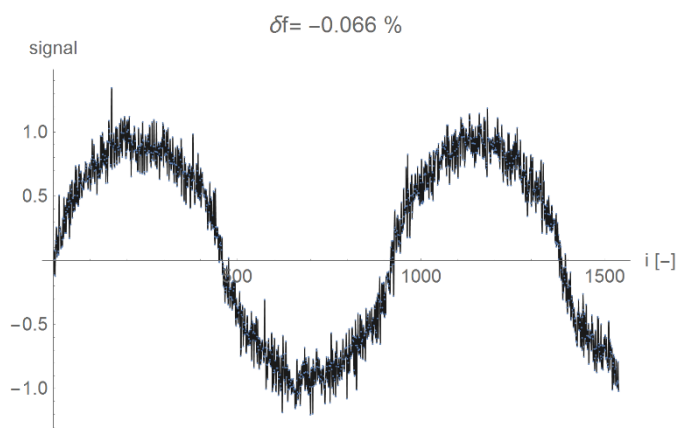
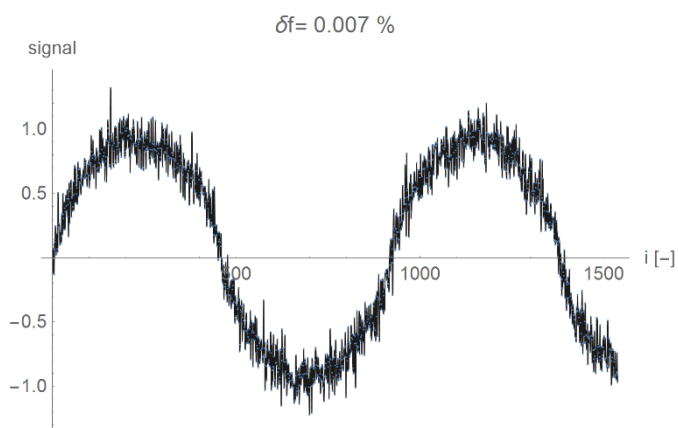
- Další výstupy ze simulace pro 1.6 násobek jmenovité periody, 1., 3., 5., 7. a 11. harmonickou s fázovým posunem 1,1.







- Další výstupy ze simulace pro 1,6 násobek jmenovité periody, 1., 3., 5., 7. 9. a 11. harmonickou s fázovým posunem 0,0123.

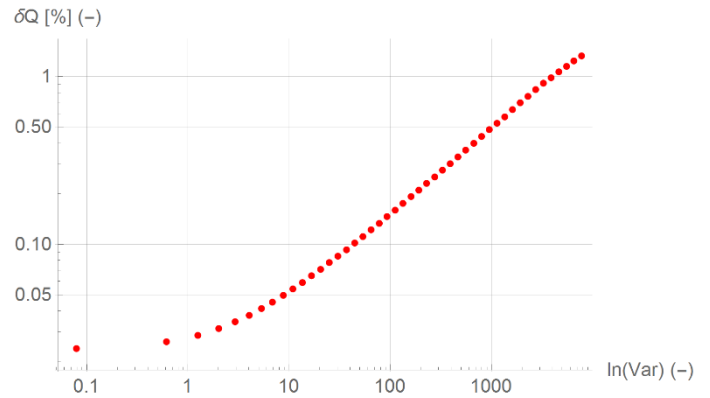
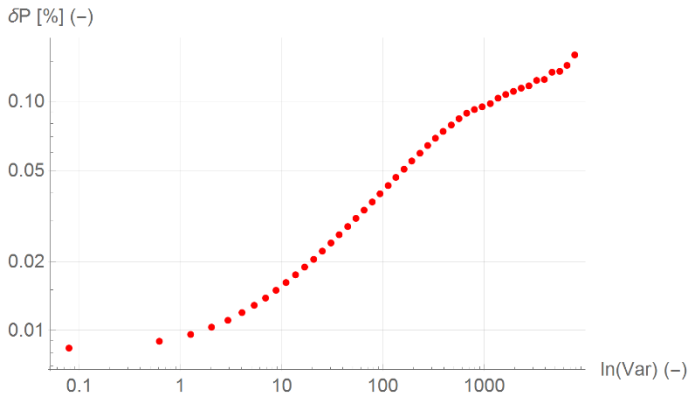


## Příloha B

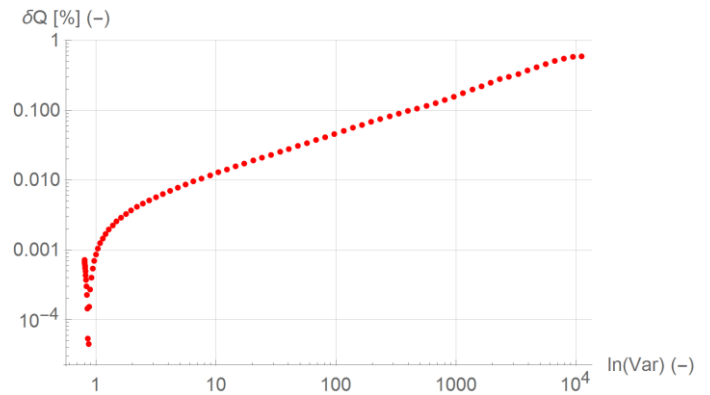
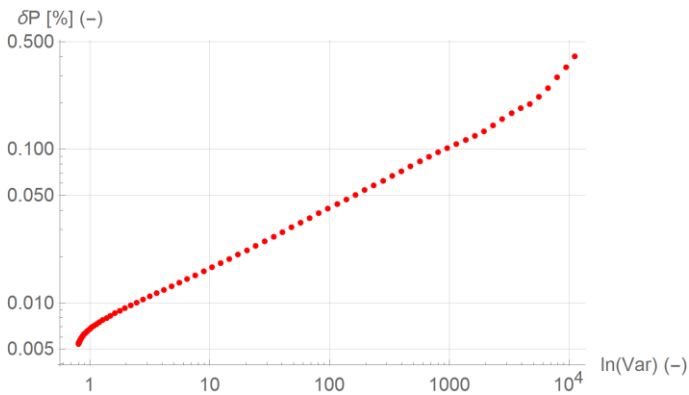
V této části přílohy jsou výsledky simulací pro různá nastavení vstupních parametrů sloužící k určení odchylky činného a jalového výkonu.

Pro danou simulaci jsou zvoleny parametry:

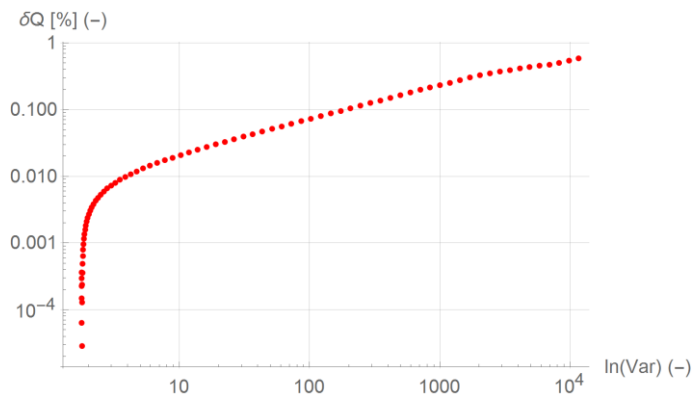
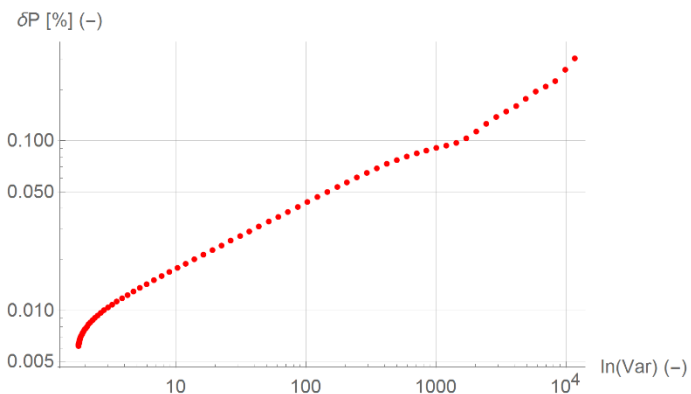
- vzorkovací frekvence je 48000 vzorků za sekundu, tedy 960 vzorků za jmenovitou periodu signálu se základní frekvencí 50 Hz. Frekvence je 1,035krát vyšší než nominální. Signály pouze s první harmonickou. Odchylka Gaussova rozdělení byla zvolena tak, aby byla 0,4 V. kNoise je koeficient generovaného šumu, což znamená, že každá skupina generovaného šumu byla vynásobena koeficienty s exponenciálním rozdělením, které se skládá ze 21 hodnot od 0,001 do 1,2 včetně. Kper zvoleno 1,6.



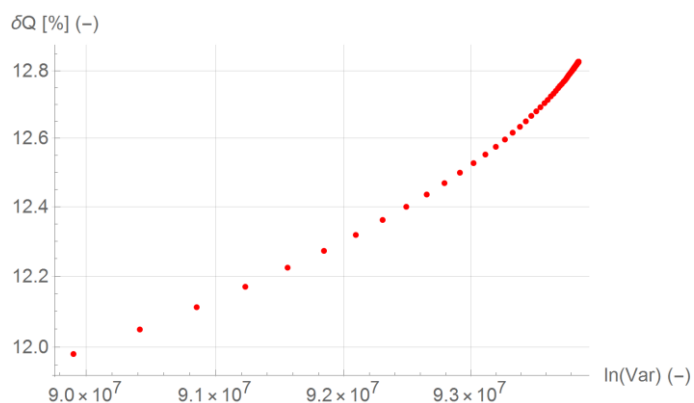
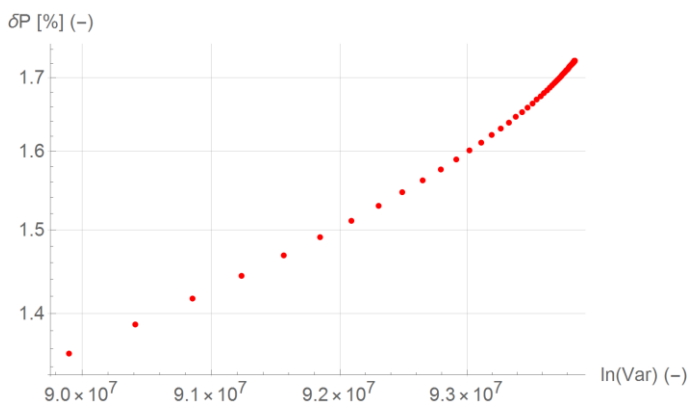
- Frekvence 1,08krát vyšší.



- Frekvence 1,1krát vyšší.



- Frekvence 1,2krát vyšší.



## Příloha C

Zde jsou uvedeny další výstupy ze simulací provedených v případové studii. U budící, mech. výkon a  $U$  generátoru. Dále pak FFT v závislosti na počtu vzorků odhadované mechanické frekvence.

