FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

# OPONENTSKÝ POSUDEK

disertační písemné práce Ing. Jiřího Nováčka

**„Numericky stabilní estimace stavu elektrických sítí s využitím fázorových měření"**

Předložená disertační práce Ing. Jiřího Nováčka, studenta doktorského studijního programu na Katedře kybernetiky Fakulty aplikovaných věd ZČU v Plzni, navazuje úzce na jeho práci k státní doktorské zkoušce „Estimace stavu elektrických sítí s využitím fázorových měření" a zabývá se opět problematikou estimace stavu, tedy odhadu stavu elektrizační soustavy (dále ES) tak, jak uvádí její název.

Disertační práce má kompozici rozdělenou do následujících částí:

- Formulace úlohy estimace stavu elektrizační soustavy
- Stávající stav řešené problematiky popsaný v zahraniční i tuzemské literatuře
- Modelování ES
- Estimace stavu ES
- Využití fázorových měření při estimaci
- WAMS - Moderní monitorovací systém využívající synchrofázory
- Nová metoda určení váhové matice měření
- Robustní estimace stavu
- Ověření a testování navržených metod, algoritmů a softwarových prototypů

Obsahově jednotlivé kapitoly odpovídají uvedenému členění s tím, že autor tradičním způsobem systematicky přechází od teoretického rozboru a přehledu současného stavu v dané problematice postupně ke konkrétnímu vlastnímu přístupu, konečné aplikaci a získaným novým výsledkům a poznatkům. Zpracované zdrojové podklady jsou četné a rozmanité, tedy prokazují schopnost autora se rychle zorientovat ve více různých vědních disciplinách.
Autor využívá pro sestavení prakticky použitelného algoritmu, který byl hlavním cílem disertační práce, nejen kombinace stávajících metod a prostředků, ale rovněž výhodně využil aktuální novou technologii přesnějších měření, navíc s obsahově hodnotnějším vektorovým charakterem veličin spolu s navýšením relevance a zpracovatelnosti výsledků díky garantované soudobosti. To otevírá zcela nové možnosti v řešení úlohy a autor toho efektivně využívá v souladu a s podporou technologií současných. Disertační práce je díky tomu jednoznačně aktuální jak využitím nových technologií, tak i potřebností jejích cílů, protože kvalita a spolehlivost dodávky elektrické energie jsou stále v centru zájmu o inovace. Výsledkem je tedy nástroj, který může nebývalým způsobem ovlivnit kvalitu dispečerského řízení ES, neboť zmapování objektivního a přesného stavu ES je základem pro další operativní i dlouhodobé analýzy a rozhodování.
Klíčovým momentem při hodnocení odborného významu práce nejsou jen dva v závěru zdůrazněné konkrétní metodologické přínosy, ale především jasně vytyčená konkrétní cesta možného využití dílčích poznatků oboru kybernetika v relativně konservativním oboru elektroenergetika s podtržením vzájemné oboustranné oborové prospěšnosti pro další rozvoj.

**Západočeská univerzita v Plzni**
Katedra elektroenergetiky a ekologie
**IČ:** 49777513
**DIČ:** CZ 49777513
**Telefon/fax:** (+420) 37763 4343
**E-mail:** nohac@kee.zcu.cz

Vytyčené cíle práce byly dosaženy s tím, že došlo nejen ke zmapování možností řešení, ale především k jejich inovativnímu rozvinutí oproti dosud používaným přístupům realizace estimace stavu ES. Výsledné metody byly odvozeny a ověřeny na netriviálních praktických aplikacích. Předložené odladěné postupy umožňují provedení estimace i za podmínek často v minulosti nepřijatelných, nebo s nevyhovující dobou konvergence numerického řešení.
Kompozice vlastního písemného zpracování disertační práce má příkladně přehlednou strukturu a čtenář je postupně a logicky uveden do problematiky, do vlastního konkrétního přístupu autora a konečně pak do výsledků získaných z praktické aplikace. Formální a jazyková stránka práce jsou rovněž na vysoké úrovni, všechny kapitoly, ilustrace, vztahy a grafy jsou provedeny jednotným způsobem, který je do značné míry určen použitím kvalitních a koncepčně vyzrálých nástrojů (mimo jiné LATEX a InkScape). V práci lze nalézt pouze drobné chyby, které mají charakter převážně překlepů, přehlédnutí a drobných nejasností, tedy nenarušují zásadním způsobem celkovou srozumitelnost textu. Uvedu pouze některé z nich:

1. Byly zaměněny svod a susceptance v seznamu použitých zkratek a symbolů.
2. Přestože to není jednoznačně chybné tvrzení, může být pro čtenáře zavádějící, že jako předpoklad ustáleného harmonického stavu je uvažována pouze konstantní úhlová rychlost a nejsou zmíněny amplitudy a fáze vektorových veličin.
3. Jednotky PMU jsou autorem často uváděné jako samozřejmě s integrovaným GPS, což nemusí být vždy pravda.
4. Předpoklady zdůvodnění výhodnosti používání co nejvyššího přenosového napětí nejsou zcela správné.

Autor dokládá poměrně širokou škálu své publikační činnosti, která zahrnuje nejen výzkumné zprávy a příspěvky na tuzemských seminářích, ale i mezinárodní konference v oboru elektroenergetika.

Předkládám autorovi následující dotazy:

1. Jakým způsobem byl proveden přechod od nelineárních k lineárním funkcím $h(x)$ mezi vztahy 2.22 a 2.25?
2. Jaké jsou hodnoty koeficientu $K_V$ v době přerušení zobrazení grafu uvedeného na straně 77?
3. Jakým způsobem je rozloženo 32 měření WAMS v osmi lokacích uvedených na straně 89?

Závěr:
Doktorand Ing. Jiří Nováček, student doktorského studijního programu na Katedře kybernetiky, Fakulty aplikovaných věd, ZČU v Plzni, předloženou disertační prací prokázal odpovídající teoretické znalosti, schopnost uplatnit vědecké metody práce, samostatně tvůrčím způsobem vědecky pracovat a získané výsledky dávat do kontextu s praxí. Svou prací přinesl nové poznatky do sledované technické problematiky, zvláště pak pro synergii oborů elektroenergetiky a kybernetiky.
Hodnocená disertační práce a přiložený soupis publikační činnosti splňují podle mého názoru veškeré nutné podmínky a doporučuji tedy práci ve smyslu požadavků zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách k obhajobě.

V Plzni 28. 11. 2014

Noháč

.....
doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

**Západočeská univerzita v Plzni**
Katedra elektroenergetiky a ekologie
**IČ:** 49777513
**DIČ:** CZ 49777513
**Telefon/fax:** (+420) 37763 4343
**E-mail:** nohac@kee.zcu.cz

# Oponentský posudek doktorské disertační práce

| | |
|---|---|
| Autor: | **Ing. Jiří Nováček** |
| Školící pracoviště: | **Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd** |
| Téma: | **Numericky stabilní estimace stavu elektrických sítí s využitím fázorových měření** |
| Oponent: | **RNDr. Bohumil Sadecký, CSc.**<br>**ČEPS, a.s.** |

**Zhodnocení významu práce pro obor:**

Práce má mezioborový charakter a přináší nové poznatky týkající se využití synchronních měření fázorů napětí a proudu pro estimaci provozního stavu elektrizační soustavy.

Přínosem práce pro vědní obor „Kybernetika" je vývoj a ověření numericky stabilního estimačního algoritmu elektrických sítí včetně detekce a identifikace chyb v měřených veličinách soustavy a nová metodika určování váhových koeficientů ve smíšeném souboru měření.

Práce má rovněž velký význam pro praktické využití v oboru elektroenergetiky, kde je spolehlivá, dostatečně přesná a numericky stabilní estimace stavu klíčovým požadavkem v řídicím systému dispečinku a nezbytnou podmínkou fungování navazujících výpočetních nástrojů. Využití synchronních měření fázorů jako dalších vstupů pro estimaci je aktuálním problémem, jehož řešení nebylo dosud v praxi plně realizováno. I zde přináší práce nové poznatky zejména pro optimální nastavení váhových koeficientů klasických a fázorových měření.

**Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle:**

Zvolený metodický postup odpovídá požadavkům na vědeckou práci. Autor postupuje od obecné formulace estimační úlohy v kapitole 2 k její specifikaci v podmínkách řízení provozu elektrizační soustavy, uvádí detaily použitých modelů a algoritmy řešení. Součástí práce je rozsáhlá rešerše z literárních pramenů v kapitole 3. Jádrem práce je pak prezentace vlastního řešení robustní estimace na konkrétních sítích s uvedením dosažených výsledků a přínosů.

Hlavními cíli práce bylo vysvětlení principů využití synchronních měření fázorů napětí a proudu v estimaci, nalezení optimálního způsobu určení váhové matice měření a vývoj postupů k odstranění numerické nestability iterační metody řešení vzniklé soustavy nelineárních rovnic. Stanovených cílů bylo v předložené práci dosaženo.

V kapitolách 4 a 5 jsou popsány použité modely prvků elektrizační soustavy a klasické metody statické a dynamické estimace provozního stavu elektrizační soustavy (metoda vážených nejmenších čtverců, rozšířený Kalmanův filtr).

V kapitolách 6 a 7 se autor věnoval možným způsobům využití fázorových měření jako dalších vstupů do estimace vedle SCADA měření a popsal funkce systému WAM (Wide Area Monitoring), který jeho pracoviště vyřešilo v rámci projektu MPO. Pouze bych upřesnil tvrzení ze str. 61, měření SCADA jsou obvykle změnová, nikoliv cyklická s pevnou periodou, což ovšem nic nemění na jejich nesoudobosti. Dále jsou zde diskutovány výhody, které přinášejí systémy WAM pro řízení provozu elektrizačních soustav a uvedeny praktické problémy jejich nasazení v estimaci. Řešením dvou skupin těchto problémů se pak autor zabývá v kapitolách 8 a 9.

Algoritmus hybridní estimace spojuje na vstupu množinu klasických nesynchronních SCADA měření s množinou synchronně měřených fázorů napětí a proudu. Pro správnou funkci estimace je nutno vhodně nastavit váhové koeficienty měření. Jejich chybné nastavení by znehodnotilo výsledky estimace. Autor navrhl a v praxi ověřil novou metodu stanovení vah měření spočívající v použití koeficientů důvěryhodnosti a koeficientů korekce vah.

Druhým řešeným problémem je robustnost estimátoru, tj. dosažení spolehlivé konvergence i v obtížných případech, kdy klasická Newtonova iterační metoda nekonverguje. Zde autor podrobně popsal a v praxi ověřil dvě zpřesňující metody (Levenberg – Marquardt, Backtracking) a doporučil způsob jejich využití v praxi.

V kapitole 10 jsou prezentovány výsledky autorem navržených metod na konkrétních soustavách (dvě distribuční a jedna přenosová) a provedeno porovnání výsledků se zhodnocením jednotlivých metod robustní estimace. Autor zde prokázal výhodnost zpřesňujících metod oproti klasické Newtonově metodě.

Západočeská univerzita v Plzni
Doručeno: 21.11.2014
ZCU 034929/2014
listy: 4 přílohy:
druh:

**Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce:**

Práce obsahuje dvě skupiny původních konkrétních přínosů, a sice ověřenou metodu nastavení váhových koeficientů měření pro účely statické estimace stavu elektrizační soustavy s využitím měření synchronních fázorů a ověřenou metodu numericky stabilní estimace.

Výsledky práce je možné aplikovat v praxi při zdokonalování estimačních programů na dispečincích elektrizačních soustav a při realizaci systémů WAM. Velmi pozitivně hodnotím skutečnost, že byly ověřeny na konkrétních provozních stavech rozsáhlé soustavy (900 uzlů) a byla zde prokázána jejich efektivita. Cenným výsledkem je rovněž použití měření proudů na vstupu estimace, což v komerčních programech nebývá běžné.

**Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce:**

Práce má 99 stran textu včetně obrázků, grafů a seznamu literatury. Je rozdělena na 11 kapitol a systematicky postupuje od analýzy problému až k aplikacím vyvinutých metod v praxi. Práce je sestavena přehledně s velmi dobrou formální úpravou a jazykovou úrovní, text je přiměřeně graficky dokumentován. Drobné překlepy a nedostatky v označení (použití stejného symbolu $\Theta$ pro rozdíl fázových úhlů a pro parametry modelu systému) nijak nesnižují srozumitelnost práce.

**Vyjádření k publikacím předkladatele disertační práce:**

V přehledu publikací autor uvádí 14 vlastních prací, z toho 8 výzkumných zpráv, 4 příspěvky na konferencích (2 tuzemské, 2 zahraniční). Úroveň publikační činnosti dostatečně prokazuje kvalitu vědecké práce autora i praktických aplikací poznatků získaných výzkumem.

**Dotazy na autora práce:**

1. V kapitole 4 je mezi modely popsán model dvouvinuťového transformátoru. Jakým způsobem by autor pro účely estimace modeloval trojvinuťový transformátor?
2. V estimaci se používá jednofázový model, zatímco synchronní fázory se měří v jednotlivých fázích odděleně. Které fázorové hodnoty použil autor na vstupu hybridní estimace?
3. Jak se definuje a testuje pozorovatelnost pro účely estimace?
4. Jsou měření z fázorových měřicích jednotek (PMU) přesnější než SCADA měření, když jsou PMU připojeny na stejný měřicí transformátor?

**Závěrečné hodnocení:**

Podle mého soudu práce splnila stanovené cíle, obsahuje řadu nových poznatků a je přínosem pro vědní obor „Kybernetika" i pro praxi. Doktorand prokázal osvojení vědeckých metod práce, schopnost samostatné tvůrčí vědecké práce v dané oblasti a schopnost aplikovat výsledky v praxi. Disertační práce splňuje obecně uznávané požadavky na úroveň doktorských disertačních prací. Z výše uvedených důvodů doktorskou disertační práci

**d o p o r u č u j i  k  o b h a j o b ě.**

RNDr. Bohumil Sadecký, CSc.
ČEPS, a.s.
Elektrárenská 774/2
101 52 Praha 10

V Praze, 19. 11. 2014