

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

**Katedra jaderných reaktorů**  
**Studijní program: Jaderné inženýrství**  
**Specializace: Jaderné reaktory**

# **Moderní metody rekonstrukce výkonu jaderných reaktorů typu VVER**

## **Modern methods for power reconstruction of VVER nuclear reactors**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: Bc. Robin Krempaský  
Vedoucí práce: RNDr. Michal Kvasnička  
Rok: 2022





## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student:	<b>Bc. Robin Krempaský</b>
Studijní program:	Jaderné inženýrství
Specializace:	Jaderné reaktory
Název práce česky:	<b>Moderní metody rekonstrukce výkonu jaderných reaktorů typu VVER</b>
Název práce anglicky:	Modern methods for power reconstruction of VVER nuclear reactors

### Pokyny pro vypracování:

1. Popište metodiky rekonstrukce výkonu jaderných reaktorů VVER se zahrnutím neurčitostí signálů samonapájecích detektorů neutronů (SPND) a termočlánků (TČ) do procesu rekonstrukce výkonu s důrazem na aproximační metodu radiálních bázových funkcí (RBF). Současně popište uvedené neurčitosti signálů SPND a TČ v souvislosti s jejich základními a specifickými vlastnostmi.
2. V návaznosti na výzkumný úkol využijte program ANDREA jako nástroj pro simulaci výkonových distribucí reaktorů VVER-440. Následně navrhnete, implementujete a vyhodnotíte parametrické studie vlivu vybraných parametrů a neurčitostí na proces resp. kvalitu rekonstrukce výkonu založené na signálech SPND (3D-2D) resp. TČ (2D).
3. Proveďte kvantitativní srovnání výkonových rekonstrukcí založených na SPND a TČ pomocí vybraných popisných kvantitativních parametrů - metrik (asymetrie resp. náklon výkonu, střední kvadratická odchylka rekonstrukcí, 2D korelace, atd.).
4. Popište možnost fúze separátních rekonstrukcí výkonu založených na SPND a TČ signálech společně s odhadem celkové neurčitosti výkonové rekonstrukce pomocí skládání separátních distribucí pravděpodobnosti.

### Doporučená literatura:

- [1] MAKAI, M. a J. VÉGH. *Reactor core monitoring*. New York: Springer, 2017. ISBN: 978-3-319-54575-2.
- [2] de MARCHI, S. *Lectures on Radial Basis Functions*. Padova: University of Padova, 2018.
- [3] HOGG, R. V. et al. *Introduction to mathematical statistics*. 6th ed, Upper Saddle River: Pearson Education International, 2004. ISBN 978-0130085078.
- [4] VOČKA, R a F. HAVLŮJ. *Interní dokumentace a výukové materiály výpočetního kódu ANDREA*. Řež: ÚJV Řež, 2020-2021.
- [5] VOČKA, R. *Návrh postupu stanovení neurčitostí rozložení výkonu v AZ pro systém SCORPIO-VVER*. ÚJV-ORF-2013-020. Řež: ÚJV Řež, 2013.
- [6] ŽÁK, M. et al. *Neurčitost rekonstrukce výkonu*. ÚJV-ORF-2017-064. Řež: ÚJV Řež, 2017.

Jméno a pracoviště vedoucího práce: **RNDr. Michal Kvasnička**  
ÚJV Řež, a.s.

Jméno a pracoviště konzultanta: **Ing. Radim Vočka, Ph.D.**  
ÚJV Řež, a.s.

Datum zadání diplomové práce: 18. 10. 2021

Datum odevzdání diplomové práce: 2. 5. 2022

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

V Praze dne 18. 10. 2021

doc. Ing. Tomáš Trojek, Ph.D.



Garant studijního programu

Ing. Jan Rataj, Ph.D.



Vedoucí katedry



prof. Ing. Igor Jex, DrSc.



Děkan

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 29. 4. 2022

.....  
Bc. Robin Krempaský



## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád vyjádřil poděkování vedoucímu diplomové práce RNDr. Michalu Kvasničkovi, a to sice za její odborné vedení a ochotu při konzultacích. Stejně poděkování bych tímto chtěl vyjádřit i Ing. Radimu Vočkovi, Ph.D. a Ing. Milanu Grenovi.

Bc. Robin Krempaský





**Název práce:** Moderní metody rekonstrukce výkonu  
jaderných reaktorů typu VVER

**Autor:** Bc. Robin Krempaský

**Studijní program:** Jaderné inženýrství  
**Druh práce:** Diplomová práce

**Vedoucí práce:** RNDr. Michal Kvasnička  
ORF ÚJV Řež, a. s.

**Konzultant:** Ing. Radim Vočka, Ph.D.  
ORF ÚJV Řež, a. s.

**Abstrakt:** Předkládaná práce se věnuje rekonstrukci výkonu aktivní zóny jaderných reaktorů VVER – metodě pro on-line stanovení rozložení výkonu aktivní zóny jaderného reaktoru s využitím dat ze simulátoru aktivní zóny a vnitroreaktorové instrumentace. Významným prvkem navrhované metody rekonstrukce výkonu je on-line vyhodnocování neurčitosti měření vnitroreaktorové instrumentace a následné zahrnutí stanovených neurčitostí do aproximace metodou radiálních básových funkcí (RBF), která slouží ke stanovení výsledného rekonstruovaného rozložení výkonu. Pro zajištění věrohodnosti rekonstruovaného rozložení výkonu je zaveden proces optimalizace parametrů aproximační metody RBF. Pomocí tohoto procesu a definovaných metrik jsou určeny takové hodnoty parametrů metody, pro které je zajištěna eliminace chyb vstupních dat a věrohodnost rekonstruovaného rozložení výkonu. Proces optimalizace je přitom proveden pro tři různé typy rekonstrukce výkonu využívající různá data vnitroreaktorové instrumentace. Uvedené tři typy rekonstrukce výkonu jsou dále porovnány pomocí alternativních metrik.

**Klíčová slova:** monitorování aktivní zóny, rekonstrukce výkonu, aproximace

**Title:** Modern methods for power reconstruction  
of VVER nuclear reactors

**Author:** Bc. Robin Krempaský

**Abstract:** The thesis deals with core power distribution reconstruction for VVER reactors – a method for on-line core power distribution determination using data from core simulator and in-core instrumentation. The outstanding feature of proposed method is on-line in-core instrumentation measurement uncertainty evaluation with subsequent incorporation of the determined uncertainties into approximation by the radial basis function (RBF) method. The RBF method is then used to determine the resulting reconstructed core power distribution. To ensure trustworthiness of the reconstructed core power distribution, an optimization process of RBF method parameters is introduced. Using this process and defined metrics, values of optimal method parameters are determined. For these optimal parameters, elimination of input data errors and reconstructed power distribution trustworthiness is ensured. The optimization process is performed for three different types of core power distribution reconstruction using different in-core measurement data. The three types of core power distribution reconstruction are further compared using alternative metrics.

**Key words:** reactor core monitoring, core power distribution reconstruction, approximation



# Obsah

Seznam zkratek	12
Seznam veličin	13
Seznam obrázků	16
Seznam tabulek	16
Úvod	19
<b>1 Rekonstrukce výkonu a její parametry</b>	<b>21</b>
1.1 Souřadnicové systémy	21
1.2 Zavedení rekonstrukce výkonu	23
1.2.1 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC	23
1.2.2 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND	25
1.2.3 Kombinovaná rekonstrukce výkonu na základě měření TC a SPND	27
1.3 Parametry metody RBF a jejich optimalizace	29
1.3.1 Vliv parametrů metody RBF na rekonstruované rozložení výkonu	29
1.3.2 Metodika optimalizace parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu pomocí simulovaných vstupních dat	33
1.3.3 Metriky pro optimalizaci parametrů metody RBF	34
1.3.4 Plán optimalizace parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu	41
<b>2 Analýza a generování vstupních dat</b>	<b>43</b>
2.1 Diagnostika signálů	43
2.1.1 Diagnostika signálů TC	43
2.1.2 Diagnostika signálu SPND	50
2.2 Generování výkonových distribucí	54
2.3 Modely měření vnitroreaktorové instrumentace	56
2.3.1 Modely měření TC	56
2.3.2 Modely měření SPND	57
<b>3 Optimalizace parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu</b>	<b>61</b>
3.1 Framework pro parametrické studie a optimalizaci parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu	61
3.2 Optimalizace parametrů metody RBF pro 2D rekonstrukci výkonu na základě měření TC	64
3.2.1 Určení optimálních hodnot parametru $\alpha$ , $C$ a typu funkce	64
3.3 Optimalizace parametrů metody RBF pro 3D rekonstrukci výkonu na základě měření SPND	66
3.3.1 Charakter chybové funkce parametru $\alpha$ a $C$	66

3.3.2	Určení optimálních hodnot parametru $\alpha$ , $C$ a typu funkce . . . . .	66
3.4	Optimalizace parametrů metody RBF pro kombinovanou rekonstrukci výkonu	67
3.4.1	Optimalizace parametrů metody RBF pro 3D interpolační rekonstrukci výkonu na základě měření SPND . . . . .	68
3.4.2	Optimalizace parametrů metody RBF pro 2D rekonstrukci výkonu na základě rozšířené 2D mapy měření TC a SPND . . . . .	70
3.5	Shrnutí výsledků optimalizace parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu . . . . .	71
<b>4</b>	<b>Porovnání jednotlivých typů rekonstrukce výkonu</b>	<b>73</b>
4.1	Porovnání typů rekonstrukce výkonu na základě výsledků optimalizace z kapitoly 3 . . . . .	73
4.2	Porovnání typů rekonstrukce výkonu pomocí alternativních metrik . . . . .	74
4.2.1	Zavedení alternativních metrik . . . . .	74
4.2.2	Vyhodnocení pomocí alternativních metrik . . . . .	76
	<b>Závěr</b>	<b>85</b>
	<b>Literatura</b>	<b>87</b>
<b>A</b>	<b>Alternativní metoda rekonstrukce výkonu pomocí skládání hustot pravděpodobnosti</b>	<b>89</b>

# Seznam zkratek

AZ	aktivní zóna
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany
ETE	Jaderná elektrárna Temelín
HRK	havarijní, regulační a kompenzační kazety
PS	palivový soubor
RBF	radiální bázová funkce
TC	termočlánek
SPND	samonapájecí detektor neutronů

# Seznam veličin

$(i, j)$	indexy pozic PS v AZ
$(i, j, z)$	indexy pozic nódů v AZ
$(x_{\text{cm}}, y_{\text{cm}})$	pozice středů PS v AZ (cm)
$(x_{\text{cm}}, y_{\text{cm}}, z_{\text{cm}})$	pozice středů nódů v AZ (cm)
$A$	množina hodnot parametru $\alpha$
$A(i, j)$	rozložení asymetrie rekonstruovaného rozložení výkonu (–)
$\bar{A}$	střední hodnota asymetrie rekonstruovaného rozložení výkonu (–)
$a_{\text{low}}$	spodní šířka apertury signálu
$a_{\text{up}}$	horní šířka apertury signálu
$a_t$	apertura signálu
$b_1, b_2, b_3, b_4$	koefficienty polynomiální části interpolačního faktoru
$c$	korelační koeficient (–)
$C$	konstanta specifikující tvar radiální bázové funkce
$C_{\text{min}}$	optimální hodnota konstanty $C$
$C_{\text{min}}^{\text{tot}}$	celková optimální hodnota konstanty $C$
$c_k$	koeficient lineární kombinace radiálních bázových funkcí
$f_{\text{mean}}(i, j)$	složená hustota pravděpodobnosti výkonu pro PS v pozici $(i, j)$
$f_{P_M}(i, j)$	hustota pravděpodobnosti pro měřený výkon PS v pozici $(i, j)$
$f_{P_C}(i, j)$	hustota pravděpodobnosti pro vypočtený výkon PS v pozici $(i, j)$
$I(i, j)$	normovací konstanta složené hustoty pravděpodobnosti výkonu pro PS v pozici $(i, j)$
$I_2$	uspořádaný soubor indexů $i$ všech 2D radiálních pozic PS
$I_{2,\text{tc}}$	uspořádaný soubor indexů $i$ pozic PS, ve kterých je měřen výkon pomocí TC
$I_{2,\text{spd}}$	uspořádaný soubor indexů $i$ pozic PS, ve kterých je měřen výkon pomocí SPND
$I_3$	uspořádaný soubor indexů $i$ všech nódů v AZ
$I_{3,\text{spd}}$	uspořádaný soubor indexů $i$ nódů v AZ, ve kterých se nachází středy měřících SPND
$J_2$	uspořádaný soubor indexů $j$ všech 2D radiálních pozic PS
$J_{2,\text{tc}}$	uspořádaný soubor indexů $j$ pozic PS, ve kterých je měřen výkon pomocí TC
$J_{2,\text{spd}}$	uspořádaný soubor indexů $j$ pozic PS, ve kterých je měřen výkon pomocí SPND

$J_3$	uspořádaný soubor indexů $j$ všech nódů v AZ
$J_{3,\text{spd}}$	uspořádaný soubor indexů $j$ nódů v AZ, ve kterých se nachází středy měřících SPND
$N_{\text{FA}}$	počet PS v AZ
$N_{\text{node}}$	počet nódů v AZ
$N_{\text{tc}}$	počet měřících TC v AZ
$N_t$	počet analyzovaných časových kroků
MAD	mediánová absolutní odchylka
$N_{\text{spd}}$	počet měřících SPND v AZ
$P_{\text{mean}}(i, j)$	2D rozložení nejpravděpodobnějších hodnot výkonu (W)
$P_{\text{M,ex}}(i, j)$	rozšířené 2D měřené rozložení výkonu (W)
$P_{\text{M,spd}}(i, j, z)$	3D rozložení výkonu měřené SPND (W)
$\bar{P}_{\text{M,spd}}$	průměrná hodnota výkonu měřeného SPND (W)
$P_{\text{C}}(i, j)$	2D vypočtené rozložení výkonu (W)
$P_{\text{C}}(i, j, z)$	3D vypočtené rozložení výkonu (W)
$P_{\text{M,tc}}(i, j)$	2D rozložení výkonu měřené TC (W)
$\bar{P}_{\text{M,tc}}$	průměrná hodnota výkonu měřeného TC (W)
$P_{\text{real}}(i, j)$	2D skutečné rozložení výkonu (W)
$P_{\text{real}}(i, j, z)$	3D skutečné rozložení výkonu (W)
$\bar{P}_{\text{real}}$	průměrná hodnota skutečného rozložení výkonu (W)
$P_{\text{rec}}(i, j)$	2D rekonstruované rozložení výkonu (W)
$P_{\text{rec}}(i, j, z)$	3D rekonstruované rozložení výkonu (W)
$\bar{P}_{\text{rec}}$	průměrná hodnota rekonstruovaného rozložení výkonu (W)
$\bar{P}_{\text{rec,sym}}(i, j)$	průměrný rekonstruovaný výkon přes pozice šestinově symetrické k pozici $(i, j)$
$P_{\text{rec,approx}}(i, j, z)$	3D aproximované rozložení výkonu (W)
$P_{\text{rec,comb}}(i, j)$	2D kombinované rekonstruované rozložení výkonu (W)
$P_{\text{rec,comb}}(i, j, z)$	3D kombinované rekonstruované rozložení výkonu (W)
$P_{\text{rec,interp}}(i, j)$	2D interpolované rozložení výkonu (W)
$P_{\text{rec,interp}}(i, j, z)$	3D interpolované rozložení výkonu (W)
$r$	euklidovská vzdálenost v AZ (cm)
$s_{\text{fast},t}$	rychlý filtr signálu
$\bar{s}_{\text{fast},t}$	rychlý filtr signálu odečtený o svou časovou střední hodnotu
$\hat{s}_{\text{R},t}$	reprezentativní signál
$s_{\text{slow},t}$	pomalý filtr signálu
$s_t$	surový signál
$\bar{s}_t$	globální výkonový trend signálu
$\hat{s}_t$	lokální výkonový trend signálu
$\tilde{s}_t$	surový signál bez vyloučených odlehlých hodnot
$S(i, j)$	škálovací funkce
$T_{\text{form}}$	tvar tolerančního faktoru
$T_{\text{tc}}(i, j)$	toleranční faktor pro rekonstrukci výkonu na základě měření TC
$T_{\text{spd}}(i, j, z)$	toleranční faktor pro rekonstrukci výkonu na základě měření SPND

$w(i, j)$	rozložení relativních odchylek výkonu (–)
$w_{mC}(i, j)$	rozložení relativních odchylek mezi nejpravděpodobnějším a vypočteným výkonem (–)
$W(x_{cm}, y_{cm})$	interpolační faktor pro 2D rekonstrukci výkonu
$W(x_{cm}, y_{cm}, z_{cm})$	interpolační faktor pro 3D rekonstrukci výkonu
$Z_3$	uspořádaný soubor indexů $z$ všech nódů v AZ
$Z_3(i, j)$	uspořádaný soubor indexů $z$ všech nódů v PS v pozici $(i, j)$
$Z_{3,spd}$	uspořádaný soubor indexů $z$ nódů v AZ, ve kterých se nachází středy měřících SPND
$Z_{3,spd}(i, j)$	uspořádaný soubor indexů $z$ nódů, ve kterých je dostupné měření SPND pro soubor v pozici $(i, j)$
$\alpha$	škálovací parametr neurčitosti měření
$\alpha_{min}$	optimální hodnota parametru $\alpha$
$\alpha_{min}^{tot}$	celková optimální hodnota parametru $\alpha$
$\Gamma$	množina hodnot parametru $C$
$\delta_{type}(i, j)$	relativní chyba rozložení výkonu pro $type \in \{C, M, rec\}$ (–)
$\Delta P_C(i, j)$	absolutní chyba vypočteného rozložení výkonu (–)
$\Delta T_{error}(i, j)$	chyba měřeného ohřevu ( $^{\circ}C$ )
$\Delta T_M(i, j)$	měřený ohřev ( $^{\circ}C$ )
$\Delta T_{real}(i, j)$	skutečný ohřev ( $^{\circ}C$ )
$\bar{\delta}_C$	průměrná velikost chyby vypočteného rozložení výkonu (–)
$\bar{\delta}_M$	průměrná velikost chyby měřeného rozložení výkonu (–)
$\bar{\delta}_{rec}$	průměrná velikost chyby rekonstruovaného rozložení výkonu (–)
$\bar{\delta}_{rec,min}$	minimální průměrná velikost chyby rekonstruovaného rozložení výkonu (–)
$\bar{\delta}_{rec,min}^{tot}$	celková minimální průměrná velikost chyby rekonstruovaného rozložení výkonu (–)
$\sigma_{spd,dyn}(i, j, z)$	dynamická neurčitost měření SPND
$\sigma_{spd,tot}(i, j, z)$	celková neurčitost měření SPND
$\bar{\sigma}_{spd,tot}$	průměrná celková neurčitost měření SPND pro celou AZ
$\sigma_{tc,dyn}(i, j)$	dynamická neurčitost měření TC
$\sigma_{tc,stat}$	statická neurčitost měření TC
$\sigma_{tc,tot}(i, j)$	celková neurčitost měření TC
$\bar{\sigma}_{tc,tot}$	průměrná celková neurčitost měření TC pro celou AZ
$\phi$	radiální bázová funkce
$\varphi$	azimutální úhel ( $^{\circ}$ )
$\theta$	elevační úhel ( $^{\circ}$ )



# Seznam obrázků

1	Blokový diagram hlavních modulů systému SCORPIO-VVER . . . . .	20
1.1	Znázornění systému souřadnic AZ využívajícího indexy $(i, j)$ . . . . .	21
1.2	Schéma kombinované rekonstrukce výkonu . . . . .	30
1.3	Ukázka vlivu parametru $\alpha$ na shlazení interpolačního faktoru . . . . .	32
1.4	Ukázka vlivu parametru $\alpha$ na rozdíl mezi rekonstruovaným a vypočteným, resp. rekonstruovaným a měřeným rozložením výkonu pro měřené pozice . . . . .	33
1.5	Znázornění vlivu hodnoty konstanty $C$ na interpolační faktor pro případ gaussovské funkce . . . . .	33
1.6	Schéma provádění rekonstrukce výkonu pomocí simulovaných vstupních dat pro optimalizaci parametrů rekonstrukce výkonu . . . . .	35
1.7	Ukázka pokazetového rozložení chyb rekonstruovaného rozložení výkonu . . . . .	36
1.8	Ukázka nodálního rozložení chyb rekonstruovaného rozložení výkonu . . . . .	37
1.9	Ukázka chybové funkce parametru $\alpha$ společně s vynesenu průměrnou velikostí chyby vypočteného rozložení výkonu $\bar{\delta}_C$ a rozložení výkonu měřeného TC $\bar{\delta}_M$ . . . . .	38
1.10	Ukázka chybové funkce parametru $\alpha$ a $C$ pro 2D rekonstrukci výkonu na základě měření TC . . . . .	39
2.1	Ukázka signálu TC obsahujícího skoky . . . . .	45
2.2	Ukázka signálu TC obsahujícího odlehlé hodnoty . . . . .	45
2.3	Ukázka signálu TC obsahujícího kvantitační chybu analogově digitálního převodníku . . . . .	45
2.4	Znázornění signálu TC společně s jeho rychlým filtrem a pomalým filtrem . . . . .	46
2.5	Znázornění apertury signálu TC se surovým signálem a lokálním výkonovým trendem . . . . .	48
2.6	Znázornění reprezentativního signálu TC s jeho aperturou, surovým signálem a lokálním výkonovým trendem . . . . .	48
2.7	Schéma diagnostiky signálu TC . . . . .	49
2.8	Ukázka signálu SPND . . . . .	50

2.9	Ukázka signálu SPND obsahujícího rychlé periodické oscilace signálu . . . . .	50
2.10	Znázornění lokálního výkonového trendu – pomalého filtru pro surový signál SPND . . . . .	52
2.11	Schéma diagnostiky signálu SPND . . . . .	53
2.12	Histogram pokazetových absolutních chyb vypočteného rozložení výkonu pro výkonové distribuce určené pro analýzy v této práci . . . . .	55
2.13	Schéma generování modelu měření TC . . . . .	59
2.14	Histogram hodnot celkové neurčitosti měření TC $\sigma_{tc,tot}$ a histogram chyb měřených ohřevů $\Delta T_{error}$ pro soubor 75 modelů měření TC použitých pro analýzy v této práci . . . . .	59
2.15	Schéma generování modelu měření SPND . . . . .	60
2.16	Histogram hodnot celkové neurčitosti měření SPND $\sigma_{spd,tot}$ a histogram relativních chyb měřeného proudu $i_{error,rel}$ pro soubor 75 modelů měření SPND použitých pro analýzy v této práci . . . . .	60
3.1	Schéma toku dat frameworku pro optimalizaci parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu . . . . .	63
3.2	Celková chybová funkce parametru $\alpha$ pro lineární funkci a toleranční faktor dělený výkonem . . . . .	65
3.3	Celková chybová funkce parametrů $\alpha$ a $C$ pro funkci inverzní multikvadrika a toleranční faktor dělený výkonem . . . . .	65
3.4	Ukázka chybové funkce parametru $\alpha$ – 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND pro lineární funkci pro rozsah hodnot $\alpha$ zachycující globální trend závislosti a pro rozsah hodnot $\alpha$ zachycující oblast minima této závislosti . . . . .	67
3.5	Celková chybová funkce konstanty $C$ pro 3D interpolační rekonstrukci výkonu – funkce multikvadrika, inverzní multikvadrika a gaussovská . . . . .	69
4.1	Znázornění náklonu relativních chyb rekonstruovaného rozložení výkonu společně s relativními chybami rekonstruovaného rozložení výkonu . . . . .	76
4.2	Mapa chyb optimální rekonstrukce pro 2D rekonstrukci výkonu na základě měření TC . . . . .	78
4.3	Mapa chyb optimální rekonstrukce pro 3D rekonstrukci výkonu na základě měření SPND . . . . .	79
4.4	Mapa chyb optimální rekonstrukce pro kombinovanou rekonstrukci výkonu . . . . .	80
4.5	Histogramy korelace rekonstruovaného a skutečného rozložení výkonu – optimalizovaná rekonstrukce výkonu na základě měření TC, optimalizovaná rekonstrukce výkonu na základě měření SPND, optimalizovaná kombinovaná rekonstrukce výkonu . . . . .	81

4.6	Histogramy náklonu výkonu – dvoudimenzionální histogramy pro azimut a náklon – optimalizovaná rekonstrukce výkonu na základě měření TC, optimalizovaná rekonstrukce výkonu na základě měření SPND, optimalizovaná kombinovaná rekonstrukce výkonu . . . . .	82
4.7	Histogramy střední hodnoty asymetrie rekonstruovaného rozložení výkonu – optimalizovaná rekonstrukce výkonu na základě měření TC, optimalizovaná rekonstrukce výkonu na základě měření SPND, optimalizovaná kombinovaná rekonstrukce výkonu . . . . .	83
A.1	Znázornění skládání hustot pravděpodobnosti pro stanovení nejpravděpodobnější hodnoty výkonu . . . . .	91
A.2	Celková chybová funkce parametru $\alpha$ pro 2D rekonstrukci výkonu na základě měření TC pro lineární funkci pro rekonstrukci výkonu metodou RBF a rekonstrukci výkonu pomocí skládání hustot pravděpodobnosti . . . . .	91
A.3	Mapa chyb optimální rekonstrukce pro 2D rekonstrukci výkonu na základě měření TC pomocí skládání hustot pravděpodobnosti . . . . .	92

# Seznam tabulek

1.1	Typy radiálních bázových funkcí uvažované pro aproximaci metodou RBF pro rekonstrukci výkonu v kombinaci se znaménky tolerančního faktoru pro soustavu metody RBF, které umožňují numerickou stabilitu aproximace . . .	27
1.2	Tvary tolerančního faktoru určené k optimalizaci rekonstrukce výkonu na základě měření TC . . . . .	31
1.3	Tvary tolerančního faktoru určené k optimalizaci rekonstrukce výkonu na základě měření SPND . . . . .	31
2.1	Hodnoty perturbací vstupních dat výpočtu kódem ANDREA pro simulaci vypočteného rozložení výkonu . . . . .	55
2.2	Zadané pravděpodobnosti charakteru TC v závislosti na radiální řadě PS od periferie v AZ . . . . .	56
2.3	Zadané rozsahy parametrů pro generování modelů měření TC . . . . .	57
2.4	Hustota pravděpodobnosti hodnot dynamické neurčitosti měření SPND $\sigma_{\text{spd,dyn}}$	58
3.1	Nalezené optimální hodnoty parametrů $\alpha$ a $C$ společně s celkovými minimálními průměrnými velikostmi chyby rekonstruovaného rozložení výkonu pro jednotlivé typy funkcí a tvary tolerančního faktoru – 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC, hodnoceno pokazetově . . . . .	64
3.2	Nalezené optimální hodnoty parametrů $\alpha$ a $C$ společně s celkovými minimálními průměrnými velikostmi chyby rekonstruovaného rozložení výkonu pro jednotlivé typy funkcí a tvary tolerančního faktoru – 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND, hodnoceno nodálně . . . . .	68
3.3	Výsledky výpočtů pro nalezení optimální hodnoty konstanty $C$ pro 3D interpolační rekonstrukci výkonu . . . . .	69
3.4	Hodnoty celkové chyby rekonstruovaného rozložení výkonu pro určení optimálního typu funkce pro 3D interpolační rekonstrukci výkonu . . . . .	70
3.5	Nalezené optimální hodnoty parametrů $\alpha$ a $C$ společně s celkovými minimálními průměrnými velikostmi chyby rekonstruovaného rozložení výkonu pro jednotlivé typy funkcí a tvary tolerančního faktoru – kombinovaná rekonstrukce výkonu s vyhodnocením na nodální úrovni . . . . .	71
3.6	Optimální parametry metody RBF pro jednotlivé typy rekonstrukce výkonu stanovené v kap. 3 . . . . .	72

4.1	Porovnání celkových minimálních průměrných velikostí chyby rekonstruovaného rozložení výkonu $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$ pro různé typy rekonstrukce výkonu a optimální parametry podle tab. 3.6 na pokazetové úrovni . . . . .	74
4.2	Percentily metrik pro jednotlivé typy optimalizované rekonstrukce výkonu – elevační úhel $\theta$ , korelační koeficient $c$ a střední hodnota asymetrie $\bar{A}$ . . .	76



# Úvod

Pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu jaderného reaktoru hraje významnou roli úloha monitorování, která spočívá především ve vyhodnocování parametrů primárního okruhu a v kontrole provozních a bezpečnostních limitů aktivní zóny (AZ) [1].

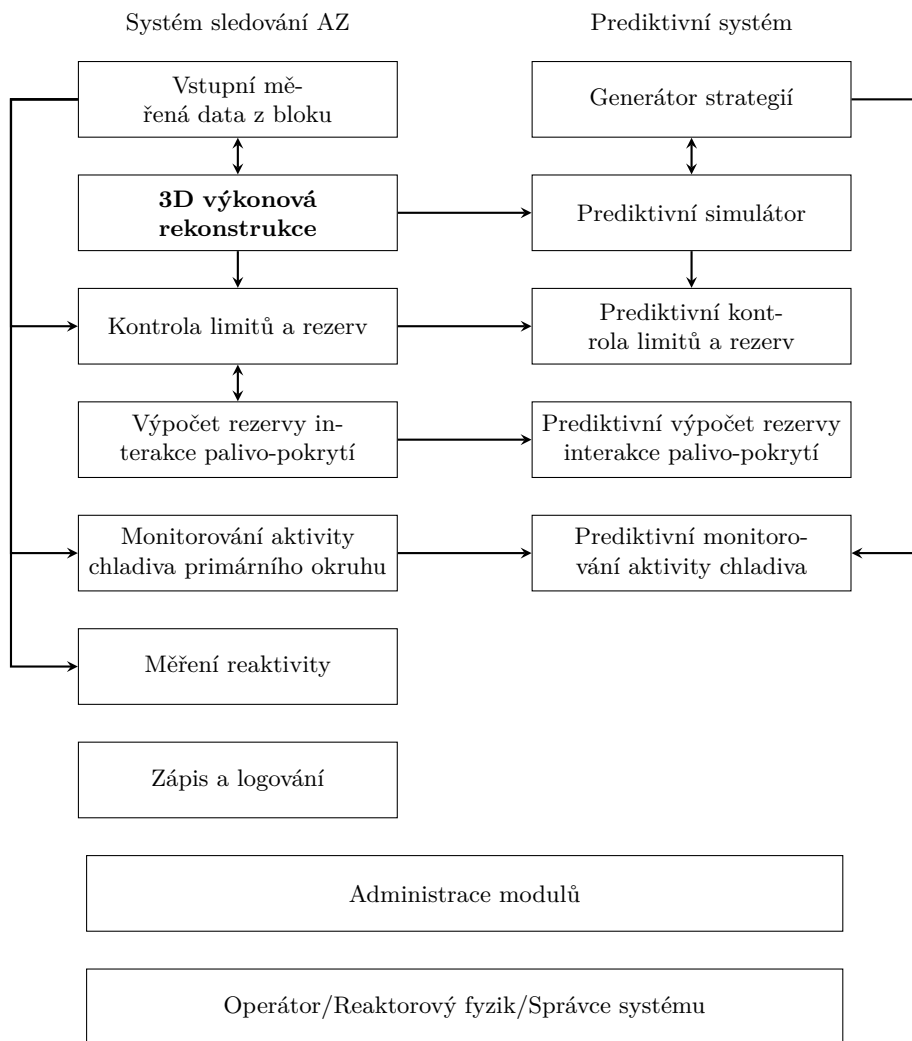
Pro kontrolu Limitů a podmínek pro provoz AZ je přitom základním vstupním údajem rozložení výkonu v AZ, které lze stanovit dvěma základními metodami – výpočtem pomocí simulátoru aktivní zóny nebo vnitroreaktorovým měřením. Pod pojmem *simulátor aktivní zóny* je uvažován výpočetní program založený na teoretickém řešení transportu neutronů v AZ pomocí diferenčního nebo nodálního přístupu, který je integrován v monitorovacím systému AZ (jako příklad lze uvést program MOBY-DICK využívaný v Jaderné elektrárně Dukovany (EDU) nebo program ANC-H v případě Jaderné elektrárny Temelín (ETE)). Druhý ze základních způsobů stanovení rozložení výkonu AZ – vnitroreaktorové měření – je v případě reaktorů VVER zajištěno termočládky (TC) nebo samonapájecími detektory neutronů (SPND nebo také SPD).

I přes značnou míru jakosti vnitroreaktorové instrumentace a simulátorů AZ jsou oba přístupy ovlivněny jistou mírou neurčitosti a rozložení výkonu stanovené těmito přístupy se může lišit. Zároveň platí, že simulátory AZ umožňují stanovení rozložení výkonu v celém prostoru AZ, kdežto vnitroreaktorová instrumentace pokrývá jen omezený prostor.

Řešení uvedených nedostatků základních přístupů stanovení rozložení výkonu představuje proces *rekonstrukce rozložení výkonu aktivní zóny jaderného reaktoru* (nazývaný i jako *rekonstrukce výkonu*) – tedy matematický proces sloužící ke stanovení rozložení výkonu AZ na základě dat ze simulátoru AZ a vnitroreaktorové instrumentace.

Rozložení výkonu aktivní zóny stanovené rekonstrukcí výkonu představuje vstupní údaj pro výše zmíněnou kontrolu provozních a bezpečnostních limitů aktivní zóny. To pro případ monitorovacího systému SCORPIO-VVER zachycuje diagram hlavních modulů tohoto systému na obr. 1. Uvedený princip je přitom shodný pro všechny typy lehkovodných reaktorů, které disponují příslušnou vnitroreaktorovou instrumentací. Z této role rekonstrukce výkonu vyplývá nutnost věnovat nastavení tohoto procesu zvýšenou pozornost.

I přes zřejmou důležitost rekonstrukce výkonu se této problematice věnuje nemnoho publikací. Hledání optimální metody aproximace pro rekonstrukci výkonu se věnují například články [2] a [3]. Kromě těchto článků se rekonstrukci výkonu věnuje práce [4], ve které je ukázáno využití aproximace dat na nerovnoměrně rozložené množině bodů metodou radiálních bazových funkcí (RBF) a je věnována pozornost stabilitě a věrohodnosti uvedené metody. Volbě optimálních parametrů metody RBF se věnuje práce [5], která je zaměřena na 2D rekonstrukci radiálního rozložení výkonu AZ EDU na základě měření TC.



Obrázek 1: Blokový diagram hlavních modulů systému SCORPIO-VVER [1]

Metoda rekonstrukce výkonu popsaná v [4] a [5] se vyznačuje tím, že umožňuje využívat online analýzu neurčitosti měření vnitroreaktorové instrumentace. Právě korektní zohlednění neurčitostí vstupních dat – výkonu vypočteného simulátorem AZ a měření vnitroreaktorové instrumentace – do rekonstrukce výkonu by mělo vést k eliminaci nepřesnosti těchto vstupních dat a tím ke stanovení věrohodného rekonstruovaného rozložení výkonu.

Cílem této práce je na základě již provedené optimalizace 2D rekonstrukce výkonu v [5] provést reimplementaci tohoto přístupu i pro případ 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND a kombinované rekonstrukce výkonu, která má využívat data z TC i SPND zároveň. Cílem je rovněž rozšířit tento proces optimalizace zavedením nových metrik a porovnat tak vhodnost těchto tří typů rekonstrukce výkonu.

Optimalizace a analýza rekonstrukce výkonu metodou RBF, která je cílem této práce, bude v budoucnu klíčovým podkladem pro následnou implementaci této metody do monitorovacího systému SCORPIO-VVER v EDU, kterou ve spolupráci s Odborem reaktorové fyziky EDU zajišťuje Oddělení reaktorové fyziky a podpory palivového cyklu ÚJV Řež, a. s.



# Kapitola 1

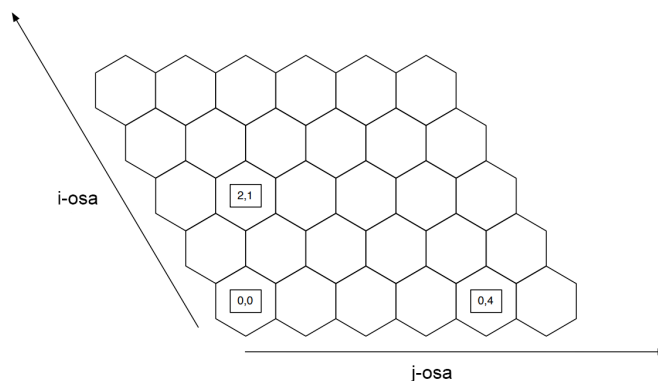
## Rekonstrukce výkonu a její parametry

Cílem této kapitoly je definovat tři v současné době uvažované typy rekonstrukce výkonu a ukázat nutnost optimalizace parametrů aproximační metody RBF, která je součástí procesu rekonstrukce výkonu. Na základě popisu vlivu parametrů metody RBF na rekonstrukci výkonu si tato kapitola dále klade za cíl stanovit plán optimalizace těchto parametrů pomocí definovaných postupů a metrik.

Splnění těchto cílů vyžaduje zavedení robustní notace pro popis pozic palivových souborů (PS) a nódů v AZ a transformace mezi použitými souřadnicovými systémy, které jsou předmětem následující kapitoly.

### 1.1 Souřadnicové systémy

Pro popis pozic PS v AZ bude primárně využit systém souřadnic využívající indexy  $(i, j)$  popsany v [6] a znázorněný na obr. 1.1. Tento systém souřadnic je reprezentován vodorovnou osou  $j$ , zkosenou osou  $i$  a dále osou  $z$  kolmou na rovinu definovanou osami  $i$  a  $j$ . Pozici každého PS tak lze určit dvojicí indexů  $(i, j)$  a pozici každého nódu trojicí indexů  $(i, j, z)$ .



Obrázek 1.1: Znázornění systému souřadnic AZ využívajícího indexy  $(i, j)$  [6]

Pokazetové, resp. nodální rozložení výkonu  $P$  pak lze považovat za funkci právě těchto indexů, tj.

$$P = P(i, j), \quad \text{resp.} \quad P = P(i, j, z). \quad (1.1)$$

Pro popis 2D radiálních pozic je zaveden uspořádaný soubor všech indexů  $i$

$$I_2 = (i_k)_{k=1}^{N_{\text{FA}}} = (i_1, \dots, i_{N_{\text{FA}}}), \quad (1.2)$$

kde  $N_{\text{FA}}$  je počet palivových souborů v AZ a dále uspořádaný soubor všech indexů  $j$

$$J_2 = (j_k)_{k=1}^{N_{\text{FA}}} = (j_1, \dots, j_{N_{\text{FA}}}), \quad (1.3)$$

kde pro tyto indexy platí, že charakterizují právě všechny pozice  $(i, j)$  PS v AZ.

V případě 3D nodálních pozic v AZ jsou tyto uspořádané soubory dány počtem nódů v AZ  $N_{\text{node}}$ :

$$I_3 = (i_1, \dots, i_{N_{\text{node}}}), \quad J_3 = (j_1, \dots, j_{N_{\text{node}}}), \quad Z_3 = (z_1, \dots, z_{N_{\text{node}}}). \quad (1.4)$$

Dále jsou uvažovány:

- uspořádané soubory  $I_{2,\text{tc}}, J_{2,\text{tc}}$  takové, že pozice  $(i, j)$ , kde  $i \in I_{2,\text{tc}}, j \in J_{2,\text{tc}}$  popisují všechny pozice PS, ve kterých je dostupné měření TC,
- uspořádané soubory  $I_{3,\text{spd}}, J_{3,\text{spd}}, Z_{3,\text{spd}}$  takové, že pozice  $(i, j, z)$ , kde  $i \in I_{3,\text{spd}}, j \in J_{3,\text{spd}}, z \in Z_{3,\text{spd}}$  jsou pozicemi nódů, ve kterých se nachází středy SPND, ve kterých je dostupné měření SPND,
- uspořádaný soubor  $Z_3(i, j)$  axiálních indexů  $z$  všech nódů v palivovém souboru na pozici  $(i, j)$ ,
- uspořádané soubory  $I_{2,\text{spd}}, J_{2,\text{spd}}$  takové, že pozice  $(i, j)$ , kde  $i \in I_{2,\text{spd}}, j \in J_{2,\text{spd}}$  jsou pozicemi PS, ve kterých je dostupné měření SPND,
- uspořádaný soubor  $Z_{3,\text{spd}}(i, j)$  axiálních indexů  $z$  nódů, ve kterých je dostupné měření SPND pro PS v pozici  $(i, j)$ .

Jak bude ukázáno dále, v rámci rekonstrukce výkonu je pro provedení aproximace nutné provést transformaci ze systému značeného indexy  $(i, j, z)$  do kartézského systému souřadnic udávaných v centimetrech  $(x_{\text{cm}}, y_{\text{cm}}, z_{\text{cm}})$  <sup>(1)</sup>.

Pro transformaci  $(i, j) \rightarrow (x_{\text{cm}}, y_{\text{cm}})$  podle [5] platí:

$$\begin{aligned} x_{\text{cm}} &= (j - 1) \cdot p - (i - 1) \cdot 0,5 \cdot p + 4,5 \cdot p \\ y_{\text{cm}} &= (i - 1) \cdot p \cdot \cos(30^\circ) + 0,5 \cdot d, \end{aligned} \quad (1.5)$$

kde  $p$  značí rozteč PS a  $d$  průměr kružnice jemu opsané. Pro tyto hodnoty z geometrie AZ vyplývá vztah  $d = p/\cos(30^\circ)$ .<sup>(2)</sup>

Transformaci axiální souřadnice  $z \rightarrow z_{\text{cm}}$  lze provést na základě údajů o axiální nodalizaci AZ, která je dána nastavením výpočtu simulátoru AZ.

Transformace je prováděna tak, že pozice v kartézské souřadné soustavě udávané v centimetrech se vztahují ke středům PS, resp. ke středům nódů. Středům PS, resp. nódů jsou rovněž přisuzovány pozice, ve kterých jsou známy hodnoty  $z$  měření vnitroreaktorové instrumentace.

<sup>(1)</sup>Platí, že užití jednotky vzdálenosti (v tomto případě centimetry) má obecně silný vliv na stanovování optimálních parametrů metody RBF (viz dále kap. 1.3.2), jelikož se použitá jednotka promítá do hodnot prvků matice metody RBF (viz dále kap. 1.2).

<sup>(2)</sup>Na základě [6] je pro EDU uvažována rozteč v horkém stavu  $p = 14,76123$  cm.

## 1.2 Zavedení rekonstrukce výkonu

Rekonstrukci výkonu lze definovat jako matematický proces založený na datech z vnitroreaktorové instrumentace a simulátoru AZ sloužící ke stanovení výsledného (rekonstruovaného) rozložení výkonu. [4]

Na základě obecné definice formulované v [4] jsou dále specifikovány tři možné typy rekonstrukce výkonu. Uvedené typy rekonstrukce se liší metodou využití měření vnitroreaktorové instrumentace. Obecně platí, že pro stanovení rekonstruovaného rozložení výkonu je řešena úloha aproximace dat na nerovnoměrně rozložené množině bodů, a to sice metodou radiálních bázeových funkcí (pro obecný popis metody RBF viz například [7] a [8]). Vhodnost této metody popisuje práce [4], kde je ukázáno, že do této metody lze přímo zahrnout stanovené neurčitosti měření vnitroreaktorové instrumentace a tím řídit, zda výsledné rekonstruované rozložení výkonu odpovídá spíše rozložení výkonu vypočtenému simulátorem AZ, nebo rozložení výkonu měřenému vnitroreaktorovou instrumentací. Význačnou vlastností této metody je univerzální aplikovatelnost pro 2D i 3D rekonstrukci výkonu reaktorů typu VVER i lehkovodních reaktorů západní koncepce, které disponují požadovanou instrumentací.

Uvedené řízení charakteru rekonstrukce výkonu pomocí tzv. *tolerančního faktoru* je přitom založeno na zprávě [9]. Obecný popis shlázení aproximace pomocí tolerančního faktoru popisuje například článek [10]. Pro rekonstrukci výkonu tento přístup rozvíjí práce [4] a [5].

### 1.2.1 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC

V souladu s [5] a [4] je 2D radiální rekonstrukce rozložení výkonu na základě měření TC definována v následujících čtyřech krocích.

1. Je dáno:
  - $P_C(i, j)$  pro  $i \in I_2$  a  $j \in J_2$  – vypočtené rozložení výkonu stanovené simulátorem AZ pro všechny PS v AZ,
  - $P_{M,tc}(i, j)$  pro  $i \in I_{2,tc}$  a  $j \in J_{2,tc}$  – rozložení výkonu stanovené měřením TC pro pozice měřené TC.
2. Pro měřené pozice  $(i, j)$ , kde  $i \in I_{2,tc}$  a  $j \in J_{2,tc}$  jsou stanoveny *relativní odchylky výkonu* podle vztahu

$$w(i, j) = \frac{P_{M,tc}(i, j) - P_C(i, j)}{P_{M,tc}(i, j)}. \quad (1.6)$$

3. Je řešena soustava rovnic

$$\begin{pmatrix} \phi_{1,1} \pm T_{tc,1} & \cdots & \phi_{1,N_{tc}} & 1 & x_{cm,1} & y_{cm,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{N_{tc},1} & \cdots & \phi_{N_{tc},N_{tc}} \pm T_{tc,N_{tc}} & 1 & x_{cm,N_{tc}} & y_{cm,N_{tc}} \\ 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_{cm,1} & \cdots & x_{cm,N_{tc}} & 0 & 0 & 0 \\ y_{cm,1} & \cdots & y_{cm,N_{tc}} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_{N_{tc}} \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_{N_{tc}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1.7)$$

kde obecně

$$\phi_{k,l} = \phi((i_k, j_k), (i_l, j_l)) \stackrel{(1.5)}{=} \phi(\|(x_{cm,k}, y_{cm,k}) - (x_{cm,l}, y_{cm,l})\|) = \phi(r_{kl}) \quad (1.8)$$

značí radiální bázovou funkci, tj. funkci vzdálenosti  $r_{kl}$  středů dvou PS v pozicích  $(i_k, j_k)$  a  $(i_l, j_l)$  v uvažované geometrii AZ a kde  $\|\cdot\|$  značí euklidovskou normu. Konkrétní předpisy různých typů radiálních bázových funkcí zvolených pro analýzu v této práci jsou uvedeny v tab. 1.1. V uvedené tabulce je pro každý typ funkce uvedeno vhodné znaménko tolerančního faktoru  $T_{tc,l}$  při jeho zahrnutí do matice soustavy metody RBF (1.7). Tato volba vhodného znaménka je podle [4] nutná pro umožnění numerické stability metody.

Dále v soustavě (1.7)

$$T_{tc} = (T_{tc}(i_1, j_1), \dots, T_{tc}(i_{N_{tc}}, j_{N_{tc}})) = (T_{tc,1}, \dots, T_{tc,N_{tc}}) \quad (1.9)$$

je toleranční faktor, který umožňuje zohlednění neurčitosti měření vnitroreaktorové instrumentace do rekonstrukce výkonu. Pro rekonstrukci výkonu na základě měření TC pro AZ EDU určuje práce [5] jako optimální tvar tolerančního faktoru

$$T_{tc}(i, j) = \alpha \cdot \frac{\bar{P}_{M,tc}}{P_{M,tc}(i, j)} \cdot \sqrt{\sigma_{tc,dyn}^2(i, j) + \sigma_{tc,stat}^2}, \quad (1.10)$$

kde  $\alpha$  je škálovací parametr,  $\bar{P}_{M,tc}$  je průměrný měřený výkon PS v AZ,  $P_{M,tc}(i, j)$  je výkon měřený TC pro PS v pozici  $(i, j)$ ,  $\sigma_{tc,dyn}(i, j)$  je tzv. *dynamická neurčitost* měření v pozici  $(i, j)$  a  $\sigma_{tc,stat}$  je tzv. *statická neurčitost* měření TC. Hodnoty těchto neurčitostí jsou nejprve stanoveny podle postupu v kap. 2.1 v jednotkách stupňů Celsia, načež jsou přeskálováním pomocí měřeného ohřevu  $\Delta T_M(i, j)$  a měřeného výkonu PS  $P_{M,tc}(i, j)$  převedeny do jednotek watt.<sup>(3)</sup>

Řešením soustavy (1.7) je vektor koeficientů  $(c_1, \dots, c_{N_{tc}}, b_1, b_2, b_3)$  určující výsledný tvar interpolačního faktoru  $W(x_{cm}, y_{cm})$ . Interpolační faktor je spojitá funkce definovaná pro celý uvažovaný prostor AZ, která je dána vztahem

$$W(x_{cm}, y_{cm}) = b_1 + b_2 x_{cm} + b_3 y_{cm} + \sum_{k=1}^{N_{tc}} c_k \phi(\|(x_{cm}, y_{cm}) - (x_{cm,k}, y_{cm,k})\|). \quad (1.11)$$

4. Na základě vypočteného rozložení výkonu  $P_C(i, j)$  a hodnot interpolačního faktoru ve středech PS  $W(i, j)$  je stanoveno *rekonstruované rozložení výkonu*  $P_{rec}(i, j)$ :

$$P_{rec}(i, j) = \frac{P_C(i, j)}{1 - W(i, j)} \quad (1.12)$$

pro všechny pozice v AZ, tj. pro  $i \in I_2$  a  $j \in J_2$ . Vliv interpolačního faktoru  $W(i, j)$  a parametrů aproximace metodou RBF na rekonstruované rozložení výkonu  $P_{rec}(i, j)$  je ukázán dále v kap. 1.3.1.

## 1.2.2 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND

Princip 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND je shodný s principem 2D rekonstrukce popsáním v kap. 1.2.1. Rozdíl spočívá ve skutečnosti, že je celý problém formulován v 3D prostoru. Vstupní vypočtené rozložení výkonu je přitom uvažováno na nodální úrovni a měřené rozložení výkonu je přiřazeno bodu v 3D prostoru AZ<sup>(4)</sup>. Stejně jako v kap. 1.2.1 je dále celý proces na základě [5] a [4] definován ve čtyřech krocích.

<sup>(3)</sup>Využití jednotek watt představuje odlišný přístup oproti práci [5]. Tento postup je nutný z důvodu sjednocení jednotek neurčitostí v rámci kombinované rekonstrukce výkonu (viz dále 4. krok v kap. 1.2.3)

<sup>(4)</sup>Uvedený postup rekonstrukce výkonu je obecnou definicí. V závislosti na charakteru dostupných vstupních dat v rámci monitorovacího systému AZ může být v některých případech výhodné rekonstrukci provádět na základě relativních odchylek (viz vztah (1.13)) měřeného proudu a nikoliv samotného výkonu.

1. Je předpokládána znalost:

- $P_C(i, j, z)$  pro  $i \in I_3, j \in J_3, z \in Z_3$  – tj. vypočteného rozložení výkonu stanoveného simulátorem AZ pro všechny nody v AZ,
- $P_{M,spd}(i, j, z)$  pro  $i \in I_{3,spd}, j \in J_{3,spd}, z \in Z_{3,spd}$  – měřeného rozložení výkonu stanovené podle měření SPND pro nody s měřícími SPND<sup>(5)</sup>,

2. Pro instrumentované pozice  $i \in I_{3,spd}, j \in J_{3,spd}, z \in Z_{3,spd}$  jsou stanoveny relativní odchylky výkonu:

$$w(i, j, z) = \frac{P_{M,spd}(i, j, z) - P_C(i, j, z)}{P_{M,spd}(i, j, z)}. \quad (1.13)$$

3. Je řešena soustava rovnic

$$\begin{pmatrix} \phi_{1,1} \pm T_{spd,1} & \dots & \phi_{1,N_{spd}} & 1 & x_{cm,1} & y_{cm,1} & z_{cm,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{N_{spd},1} & \dots & \phi_{N_{spd},N_{spd}} \pm T_{spd,N_{spd}} & 1 & x_{cm,N_{spd}} & y_{cm,N_{spd}} & z_{cm,N_{spd}} \\ 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{cm,1} & \dots & x_{cm,N_{spd}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_{cm,1} & \dots & y_{cm,N_{spd}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ z_{cm,1} & \dots & z_{cm,N_{spd}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_{N_{spd}} \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_{N_{spd}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1.14)$$

kde pro hodnoty radiální bázové funkce  $\phi$  v analogii se vztahem (1.8) platí

$$\phi_{k,l} = \phi((i_k, j_k, z_k), (i_l, j_l, z_l)) = \phi(\|(x_{cm,k}, y_{cm,k}, z_{cm,k}) - (x_{cm,l}, y_{cm,l}, z_{cm,l})\|) = \phi(r_{kl}). \quad (1.15)$$

Na rozdíl od kap. 1.2.1 není pro 3D rekonstrukci výkonu na základě měření SPND znám optimální tvar tolerančního faktoru – jeho nalezení je jedním z cílů této práce. Je předpokládáno, že podobně jako v případě TC bude toleranční faktor funkcí parametru  $\alpha$  a dynamické neurčitosti měření  $\sigma_{spd,dyn}(i, j, z)$ :

$$T_{spd}(i, j, z) = f(\alpha, \sigma_{spd,dyn}(i, j, z)), \quad (1.16)$$

nicméně na rozdíl od neurčitosti měření TC nejsou známy hodnoty statické neurčitosti (viz dále kap. 2.1.2). Hodnoty neurčitostí jsou stanoveny podle postupu uvedeného dále v kap. 2.1 v jednotkách  $\mu A$ , načež jsou pomocí měřeného proudu a měřeného výkonu nody převedeny do jednotek watt.<sup>(3)</sup>

Řešením soustavy (1.14) je vektor koeficientů  $(c_1, \dots, c_{N_{spd}}, b_1, b_2, b_3, b_4)$  specifikující interpolační faktor  $W(x_{cm}, y_{cm}, z_{cm})$ :

$$W(x_{cm}, y_{cm}, z_{cm}) = b_1 + b_2 x_{cm} + b_3 y_{cm} + b_4 z_{cm} + \sum_{k=1}^{N_{spd}} c_k \phi(\|(x_{cm}, y_{cm}, z_{cm}) - (x_{cm,k}, y_{cm,k}, z_{cm,k})\|) \quad (1.17)$$

4. Pomocí vypočteného rozložení výkonu  $P_C(i, j, z)$  a interpolačního faktoru  $W(i, j, z)$  je pro všechny nody stanoveno výsledné rekonstruované rozložení výkonu  $P_{rec}(i, j, z)$ :

$$P_{rec}(i, j, z) = \frac{P_C(i, j, z)}{1 - W(i, j, z)}. \quad (1.18)$$

<sup>(5)</sup>Jako s měřícími SPND jsou uvažovány ty nody, ve kterých se nachází středy měřících SPND.

Tabulka 1.1: Typy radiálních bázových funkcí uvažované pro aproximaci metodou RBF pro rekonstrukci výkonu [8] [11] v kombinaci se znaménky tolerančního faktoru pro soustavu (1.7) a (1.14), které umožňují numerickou stabilitu aproximace [4]

Název funkce	Předpis funkce	Vhodné znaménko
lineární	$\phi(r) = r$	–
kubická	$\phi(r) = r^3$	+
gaussovská	$\phi(r) = e^{-\frac{r^2}{2C^2}}$	+
multikvadrika	$\phi(r) = \sqrt{1 + \frac{r^2}{C^2}}$	–
inverzní multikvadrika	$\phi(r) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{C^2}}}$	+
tenkostěnný spline	$\phi(r) = r^2 \ln(r + 1)$	+

### 1.2.3 Kombinovaná rekonstrukce výkonu na základě měření TC a SPND

Zavedení kombinované rekonstrukce výkonu je motivováno charakterem vnitroreaktorové instrumentace na EDU, kde je dostupné měření TC i SPND s následujícími vlastnostmi:

- TC s relativně vysokou hustotou (210 pozic z 349 PS) pokrývají prostor AZ, nicméně umožňují pouze 2D rekonstrukci výkonu a disponují relativně vysokou neurčitostí měření a komplikovanou interpretací hodnoty výkonu na základě měřené teploty (viz dále kap. 2.1.1),
- SPND jsou umístěny pouze v 36 z 349 PS v AZ, avšak díky tomu, že jich je v centrální trubce umístěno 7 po výšce PS, tak umožňují monitorování rozložení výkonu i v axiálním směru.

Na základě uvedených charakteristik vnitroreaktorové instrumentace [12] navrhuje metodu *kombinované rekonstrukce výkonu*. Tato metoda spočívá ve využití dat z měření TC i SPND a je definována v následujících krocích, které jsou dále schematicky znázorněny na obr. 1.2.

1. Výstupem z výpočtu simulátoru AZ je 3D vypočtené rozložení výkonu  $P_C(i, j, z)$  pro  $i \in I_3$ ,  $j \in J_3$ ,  $z \in Z_3$  i 2D vypočtené rozložení výkonu  $P_C(i, j)$  pro  $i \in I_2$ ,  $j \in J_2$ . Platí, že 2D vypočtené rozložení výkonu je rovno součtu 3D vypočteného rozložení přes nody PS v radiální pozici  $(i, j)$ :

$$P_C(i, j) = \sum_{z \in Z_3(i, j)} P_C(i, j, z). \quad (1.19)$$

Další vstupní údaje představuje 2D rozložení výkonu měřené TC  $P_{M,tc}(i, j)$  pro  $i \in I_{2,tc}$ ,  $j \in J_{2,tc}$  a 3D rozložení výkonu měřené SPND  $P_{M,spd}(i, j, z)$  pro  $i \in I_{3,spd}$ ,  $j \in J_{3,spd}$ ,  $z \in Z_{3,spd}$ .

2. Je provedena 3D rekonstrukce výkonu v souladu s kap. 1.2.2 pro nulový toleranční faktor (resp.  $\alpha = 0$ ) – tím je minimalizován vliv vypočteného rozložení výkonu a výsledek této rekonstrukce se tak blíží měřenému rozložení výkonu<sup>(6)</sup>. Výstupem

<sup>(6)</sup>Uvedený vliv parametru  $\alpha$  na charakter rekonstruovaného rozložení výkonu je popsán v kap. 1.3.1

je interpolované 3D rozložení výkonu pro všechny nody v AZ značené jako

$$P_{\text{rec,interp}}(i, j, z).$$

3. Interpolované 3D rozložení výkonu je sečteno po výšce AZ a tím je redukováno na *interpolované 2D rozložení výkonu*, které má význam převedení měření SPND do 2D a pro které platí

$$P_{\text{rec,interp}}(i, j) = \sum_{z \in Z_3(i, j)} P_{\text{rec,interp}}(i, j, z). \quad (1.20)$$

4. 2D rozložení výkonu měřené TC (známé pro pozice  $(i, j)$  takové, že  $i \in I_{2,\text{tc}}$  a  $j \in J_{2,\text{tc}}$ ) je pro pozice PS instrumentovaných SPND (tj. pozice  $(i, j)$  takové, že  $i \in I_{2,\text{spd}}$  a  $j \in J_{2,\text{spd}}$ ) rozšířeno o interpolované 2D rozložení výkonu a výsledkem je *rozšířené 2D měřené rozložení výkonu* dané vztahem

$$P_{\text{M,ex}}(i, j) = P_{\text{rec,interp}}(i, j) \cup P_{\text{M,tc}}(i, j). \quad (1.21)$$

K hodnotám  $P_{\text{M,tc}}(i, j)$  pro každou pozici rovněž přísluší neurčitosti  $\sigma_{\text{tc,dyn}}(i, j)$  a  $\sigma_{\text{tc,stat}}$ . Pro pozice, kde je měřený výkon interpretován axiálním sečtením výkonu je neurčitost měření dána kombinací  $\sigma_{\text{spd,tot}}(i, j, z)$  po výšce PS podle vztahu

$$\sigma_{\text{spd,tot}}(i, j) = \frac{P_{\text{rec,interp}}(i, j)}{\sum_{z \in Z_{3,\text{spd}}(i, j)} P_{\text{rec,interp}}(i, j, z)} \sqrt{\sum_{z \in Z_{3,\text{spd}}(i, j)} \sigma_{\text{spd,tot}}^2(i, j, z)}, \quad (1.22)$$

kde zlomek před odmocninou představuje korekci na výkon neměřených nódů a člen s odmocninou má význam sečtení neurčitostí měření měřených nódů. Pro porovnatelnost neurčitostí měření TC a SPND musí být hodnoty neurčitostí  $\sigma_{\text{tc,dyn}}(i, j)$ ,  $\sigma_{\text{tc,stat}}(i, j)$  a  $\sigma_{\text{spd,tot}}(i, j)$  dány v jednotkách watt.

5. Na základě 2D vypočteného rozložení výkonu a rozšířeného 2D měřeného rozložení výkonu je v souladu s kap. 1.2.1 pro všechny PS v AZ provedena 2D radiální rekonstrukce výkonu. Výsledkem je *2D kombinované rekonstruované rozložení výkonu* značené jako

$$P_{\text{rec,comb}}(i, j).$$

6. Pro 3D vypočtené rozložení výkonu  $P_C(i, j, z)$  a 3D rozložení výkonu měřené SPND  $P_{\text{M,spd}}(i, j, z)$  je provedena 3D rekonstrukce výkonu odpovídající kap. 1.2.2 jejímž výsledkem je *3D aproximované rozložení výkonu* stanovené pro všechny nody a značené

$$P_{\text{rec,approx}}(i, j, z).$$

7. 3D aproximované rozložení výkonu je pro jednotlivé PS přeskálováno tak, aby odpovídalo 2D kombinovanému rekonstruovanému rozložení výkonu, tj.

$$\sum_{z \in Z_3(i, j)} P_{\text{rec,approx}}(i, j, z) \stackrel{!}{=} P_{\text{rec,comb}}(i, j). \quad (1.23)$$

Uplatněním tohoto požadavku je stanoveno *3D kombinované rekonstruované rozložení výkonu*:

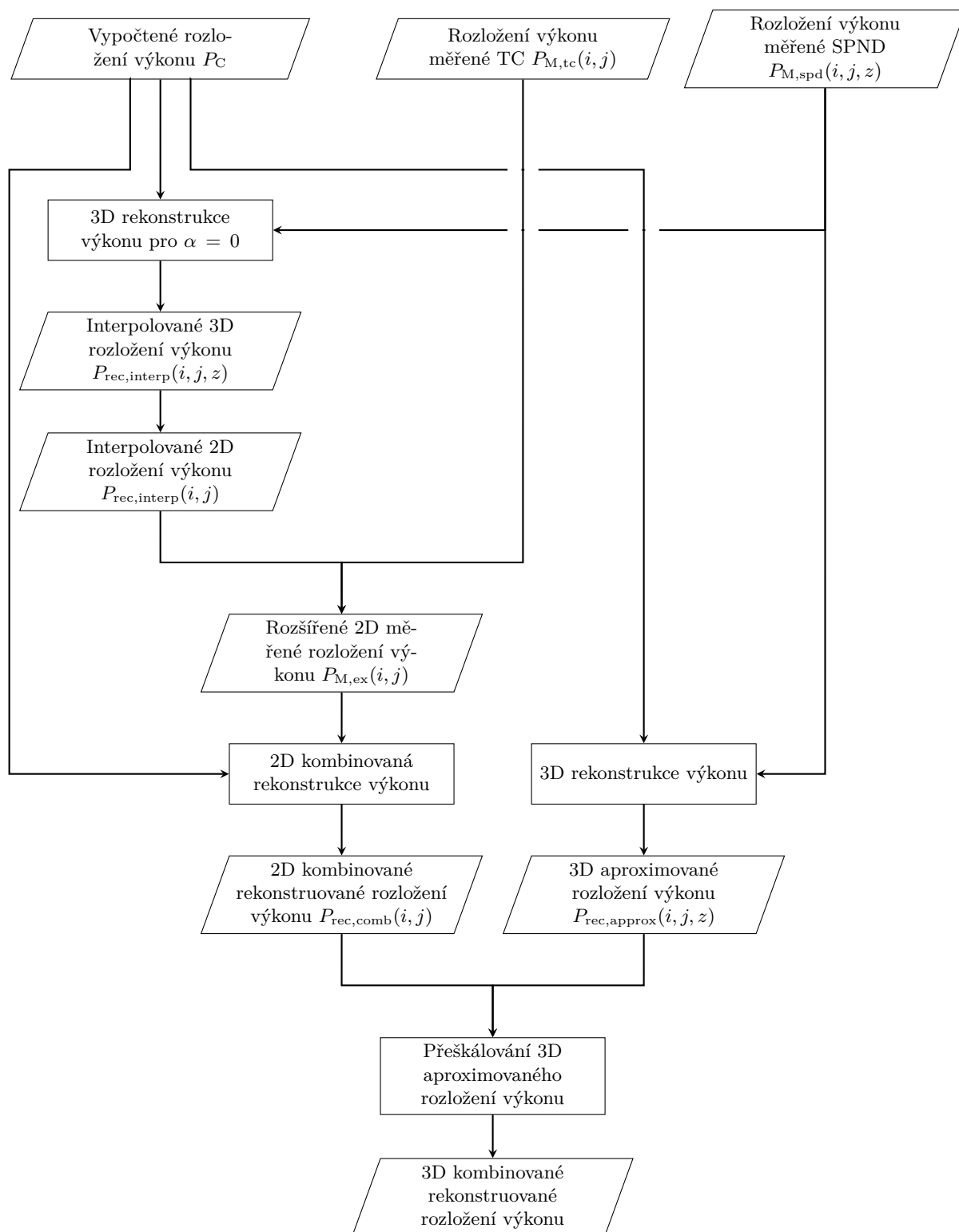
$$P_{\text{rec,comb}}(i, j, z) = \frac{P_{\text{rec,comb}}(i, j)}{\sum_{z \in Z_3(i, j)} P_{\text{rec,approx}}(i, j, z)} \cdot P_{\text{rec,approx}}(i, j, z), \quad (1.24)$$

kde

$$S(i, j) = \frac{P_{\text{rec,comb}}(i, j)}{\sum_{z \in Z_3(i, j)} P_{\text{rec,approx}}(i, j, z)} \quad (1.25)$$

je *škálovací funkce* a platí tedy

$$P_{\text{rec,comb}}(i, j, z) = S(i, j) \cdot P_{\text{rec,approx}}(i, j, z). \quad (1.26)$$



Obrázek 1.2: Schéma kombinované rekonstrukce výkonu



## 1.3 Parametry metody RBF a jejich optimalizace

### 1.3.1 Vliv parametrů metody RBF na rekonstruované rozložení výkonu

Práce [5] rozlišuje následující dvě skupiny faktorů majících vliv na rekonstrukci výkonu a tedy i na věrohodnost rekonstruovaného rozložení výkonu:

- faktory mající původ ve vstupních datech:
  - geometrie úlohy,
  - hodnoty relativních odchylek výkonu,
- řídicí parametry metody RBF:
  - tvar tolerančního faktoru,
  - škálování tolerančního faktoru – tj. hodnota parametru  $\alpha$ ,
  - konstanta  $C$ , které je obsažena v některých typech radiálních bázových funkcí,
  - typ radiální bázové funkce.

První skupina faktorů není nastavitelná uživatelem, nicméně má vliv na věrohodnost rekonstruovaného rozložení výkonu. Na charakter vypočteného, resp. měřeného rozložení výkonu má kromě skutečného rozložení výkonu vliv kvalita simulátoru AZ, resp. kvalita měření vnitroreaktorové instrumentace. Vypočtené a měřené rozložení výkonu se skrze relativní odchylky výkonu (viz vztahy (1.6) a (1.13)) promítají do matice soustavy metody RBF (viz (1.7) a (1.14)), čímž se skrze interpolační faktor (viz vztahy (1.11) a (1.17)) promítají do rekonstruovaného rozložení výkonu daného vztahem (1.12), resp. (1.18). Geometrie úlohy se projevuje v hodnotě argumentu radiálních bázových funkcí v soustavě (1.7) a (1.14) a dále pak v počtu prvků matic těchto soustav.

Druhá skupina faktorů – tedy řídicí parametry metody RBF je skupinou faktorů, jejichž hodnoty jsou nastavitelné uživatelem. Je cílem nastavit *optimální hodnoty těchto parametrů* – tj. takové hodnoty, aby rekonstruované rozložení výkonu bylo věrohodným obrazem skutečného rozložení výkonu v AZ. Optimální hodnoty parametrů metody RBF jsou takové hodnoty, pro které metoda v nejvyšší míře eliminuje chyby výpočtu simulátoru AZ a měření vnitroreaktorové instrumentace.

Vzhledem k tomu, že na rekonstruované rozložení výkonu mají vliv obě skupiny parametrů a zároveň první skupina není nastavitelná uživatelem, tak je obecně cílem odhadnout míru chyby výpočtu simulátoru AZ a měření vnitroreaktorové instrumentace a na základě toho nastavit optimální řídicí parametry metody RBF.

#### Tvar tolerančního faktoru

Toleranční faktor představuje zohlednění neurčitosti měření vnitroreaktorové instrumentace do rekonstrukce výkonu tím, že je zahrnut v matici metody RBF (viz soustavu (1.7), resp. (1.14)). Práce [5] určuje k analýze rekonstrukce výkonu na základě měření TC tři možné tvary tolerančního faktoru uvedené v tab. 1.2. Uvedená práce pomocí metodiky shodné s metodikou dále v kap. 1.3.2 stanovuje jako optimální tvar tolerančního faktoru s názvem *dělený výkonem*. Tento závěr je v souladu s teoretickým očekáváním, jelikož uvedený tvar zohledňuje neurčitost měření  $\sigma_{tc,tot}(i, j)$  i výkon vyvinutý daným PS  $P_{M,tc}(i, j)$  (tj. stejná hodnota  $\sigma_{tc,tot}(i, j)$  způsobí vyšší hodnotu  $T_{tc}(i, j)$  pokud je výkon daného PS nižší).

Pro případ 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND jsou obdobně tvary tolerančního faktoru určené k analýze uvedeny v tab. 1.3. Optimální tvar tolerančního faktoru ovšem není znám.

Popis charakteru měření vnitroreaktorové instrumentace a stanovování hodnot neurčitosti  $\sigma_{tc,tot}$  a  $\sigma_{spd,tot}$  je dále předmětem kapitoly 2.1.

Tabulka 1.2: Tvary tolerančního faktoru určené k optimalizaci rekonstrukce výkonu na základě měření TC [5],  $\bar{\sigma}_{tc,tot}$  má význam průměrné hodnoty celkové neurčitosti měření TC a  $\bar{P}_{M,tc}$  má význam průměrné hodnoty měřeného výkonu

Název	Předpis
konstantní	$T_{tc}(i, j) = \alpha \cdot \bar{\sigma}_{tc,tot}$ <sup>(7)</sup>
normální	$T_{tc}(i, j) = \alpha \cdot \sigma_{tc,tot}(i, j) = \alpha \cdot \sqrt{\sigma_{tc,dyn}^2(i, j) + \sigma_{tc,stat}^2}$
dělený výkonem	$T_{tc}(i, j) = \alpha \cdot \frac{\bar{P}_{M,tc}}{P_{M,tc}(i,j)} \cdot \sigma_{tc,tot}(i, j) = \alpha \cdot \frac{\bar{P}_{M,tc}}{P_{M,tc}(i,j)} \cdot \sqrt{\sigma_{tc,dyn}^2(i, j) + \sigma_{tc,stat}^2}$

Tabulka 1.3: Tvary tolerančního faktoru určené k optimalizaci rekonstrukce výkonu na základě měření SPND,  $\bar{\sigma}_{spd,tot}$  má význam průměrné hodnoty celkové neurčitosti měření TC a  $\bar{P}_{M,spd}$  má význam průměrné hodnoty měřeného výkonu

Název	Předpis
konstantní	$T_{spd}(i, j, z) = \alpha \cdot \bar{\sigma}_{spd,tot}$ <sup>(7)</sup>
normální	$T_{spd}(i, j, z) = \alpha \cdot \sigma_{spd,tot}(i, j, z) = \alpha \cdot \sigma_{spd,dyn}(i, j, z)$
dělený výkonem	$T_{spd}(i, j, z) = \alpha \cdot \frac{\bar{P}_{M,spd}}{P_{M,spd}(i,j,z)} \cdot \sigma_{spd,tot}(i, j, z) = \alpha \cdot \frac{\bar{P}_{M,spd}}{P_{M,spd}(i,j,z)} \cdot \sigma_{spd,dyn}(i, j, z)$

## Hodnota parametru $\alpha$

Práce [5] určuje parametr  $\alpha$  jako významný řídicí parametr metody RBF. Význam tohoto parametru vysvětluje práce [4], podle které pro hodnotu parametru  $\alpha$  (resp. tolerančního faktoru) blíží se k nule se hodnoty tolerančního faktoru v instrumentovaných pozicích blíží hodnotám relativních odchylek výkonu (viz vztah (1.6)), tj. pro 2D rekonstrukci výkonu platí <sup>(8)</sup>

$$\alpha \rightarrow 0 \implies W(i, j) \rightarrow w(i, j), \quad (1.27)$$

odkud pro rekonstruované rozložení výkonu dané vztahem (1.12) platí

$$P_{rec}(i, j) = \frac{P_C(i, j)}{1 - W(i, j)} \xrightarrow{(1.27)(1.6)} \frac{P_C(i, j)}{1 - \frac{P_{M,tc}(i,j) - P_C(i,j)}{P_{M,tc}(i,j)}} = P_{M,tc}(i, j), \quad (1.28)$$

tedy, že pro  $\alpha \rightarrow 0$  se rekonstruované rozložení výkonu blíží měřenému rozložení výkonu.

Dále platí, že rostoucí hodnota tolerančního faktoru vede na takové řešení aproximace metodou RBF, že se interpolační faktor blíží nulové funkci, tj.

$$\alpha \rightarrow +\infty \implies W(i, j) \rightarrow 0, \quad (1.29)$$

<sup>(7)</sup>Smyslem konstantního tolerančního faktoru je jeho nezávislost na poloze  $(i, j)$ . Lze volit i tvar  $T_{tc}(i, j) = \alpha$ , nicméně pro účely této práce byl zvolen tvar  $T_{tc}(i, j) = \alpha \cdot \bar{\sigma}_{tc,tot}$  pro dosažení srovnatelných hodnot tolerančního faktoru pro všechny jeho uvažované tvary.

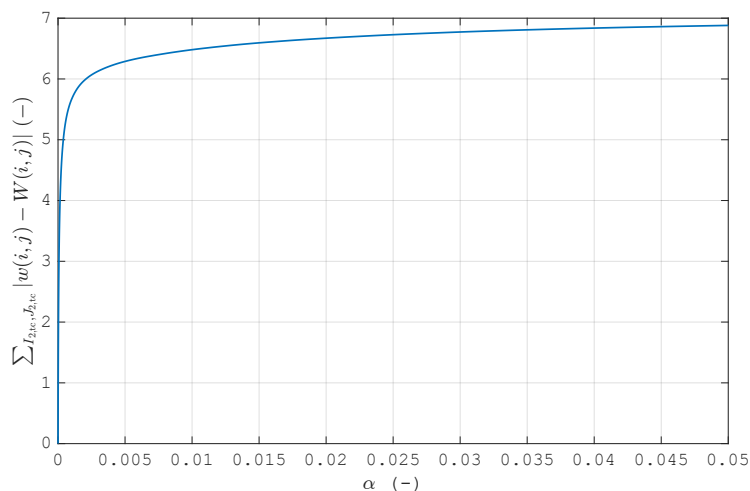
<sup>(8)</sup>Platí obdobně i pro 3D rekonstrukci výkonu.

což se do rekonstruovaného rozložení výkonu (viz vztah (1.12)) projeví následovně:

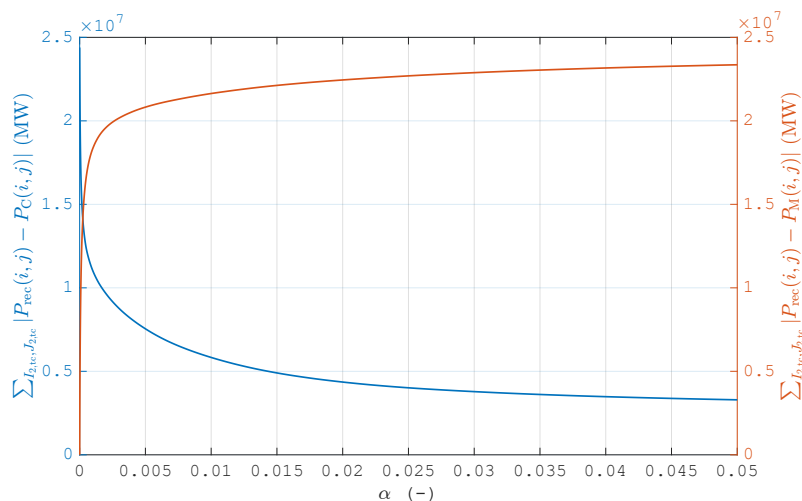
$$P_{\text{rec}}(i, j) = \frac{P_{\text{C}}(i, j)}{1 - W(i, j)} \xrightarrow{(1.29)} \frac{P_{\text{C}}(i, j)}{1 - 0} = P_{\text{C}}(i, j), \quad (1.30)$$

tedy, že pro  $\alpha \rightarrow +\infty$  se rekonstruované rozložení výkonu blíží vypočtenému rozložení výkonu.

Efekt hodnoty parametru  $\alpha$  je prostřednictvím rozdílu mezi interpolačním faktorem a relativními odchylkami výkonu zaznamenán na obr. 1.3 a prostřednictvím rozdílu mezi rekonstruovaným a vypočteným, resp. měřeným rozložení výkonu na obr. 1.4.



Obrázek 1.3: Ukázka vlivu parametru  $\alpha$  na shlazení interpolačního faktoru – tedy na rozdíl mezi relativními odchylkami výkonu a interpolačním faktorem v měřených pozicích



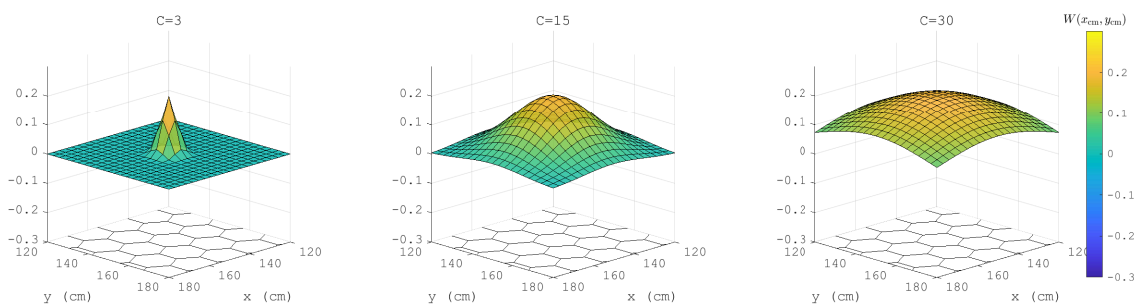
Obrázek 1.4: Ukázka vlivu parametru  $\alpha$  na rozdíl mezi rekonstruovaným a vypočteným (modrou barvou), resp. rekonstruovaným a měřeným (červenou barvou) rozložení výkonu pro měřené pozice

## Typ radiální bázové funkce

Typ funkce se promítá do matice soustavy metody RBF (viz soustavu (1.7) a (1.14)) a do vyčíslování interpolačního faktoru (viz vztah (1.11) a (1.17)). Typ funkce má tedy vliv na optimální hodnoty ostatních parametrů metody RBF – například je nutné pro různé typy funkcí volit různé hodnoty parametru  $\alpha$  tak, aby neurčitost do matice metody RBF byla naškálována úměrně hodnotám funkce v této matici. Rovněž nelze vyloučit, že různé typy funkcí mají různou schopnost realizovat aproximaci pro stanovení věrohodného rekonstruovaného rozložení výkonu.

## Konstanta $C$

Konstanta  $C$  představuje volnost ve tvaru některých typů funkcí (viz tab. 1.1). V případě gaussovské funkce a inverzní multikvadriky tato konstanta při 2D aproximaci určuje šířku této funkce jako 2D píku (viz obr. 1.5). Práce [5] pro případ 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC ukázala, že pro její hodnoty přibližně do  $C = 20$  je věrohodnost rekonstrukce výkonu významně snížena. To platí pro gaussovskou funkci a inverzní multikvadriku. Pro funkci nazvanou multikvadrika věrohodnost rekonstrukce výkonu závisí na hodnotě konstanty  $C$  jen slabě. Uvedená pozorování lze vysvětlit tak, že není možné nalézt takovou aproximaci, která se skládá z úzkých píků a zároveň bude dostatečně věrohodná.



Obrázek 1.5: Znázornění vlivu hodnoty konstanty  $C$  na interpolační faktor pro případ gaussovské funkce [5] – na jednotlivých obrázcích je vždy vykreslen jeden člen lineární kombinace z (1.11) a spodní část obrázků ukazuje geometrii AZ – příklad pro gaussovskou funkci a tři různé hodnoty konstanty  $C$

### 1.3.2 Metodika optimalizace parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu pomocí simulovaných vstupních dat

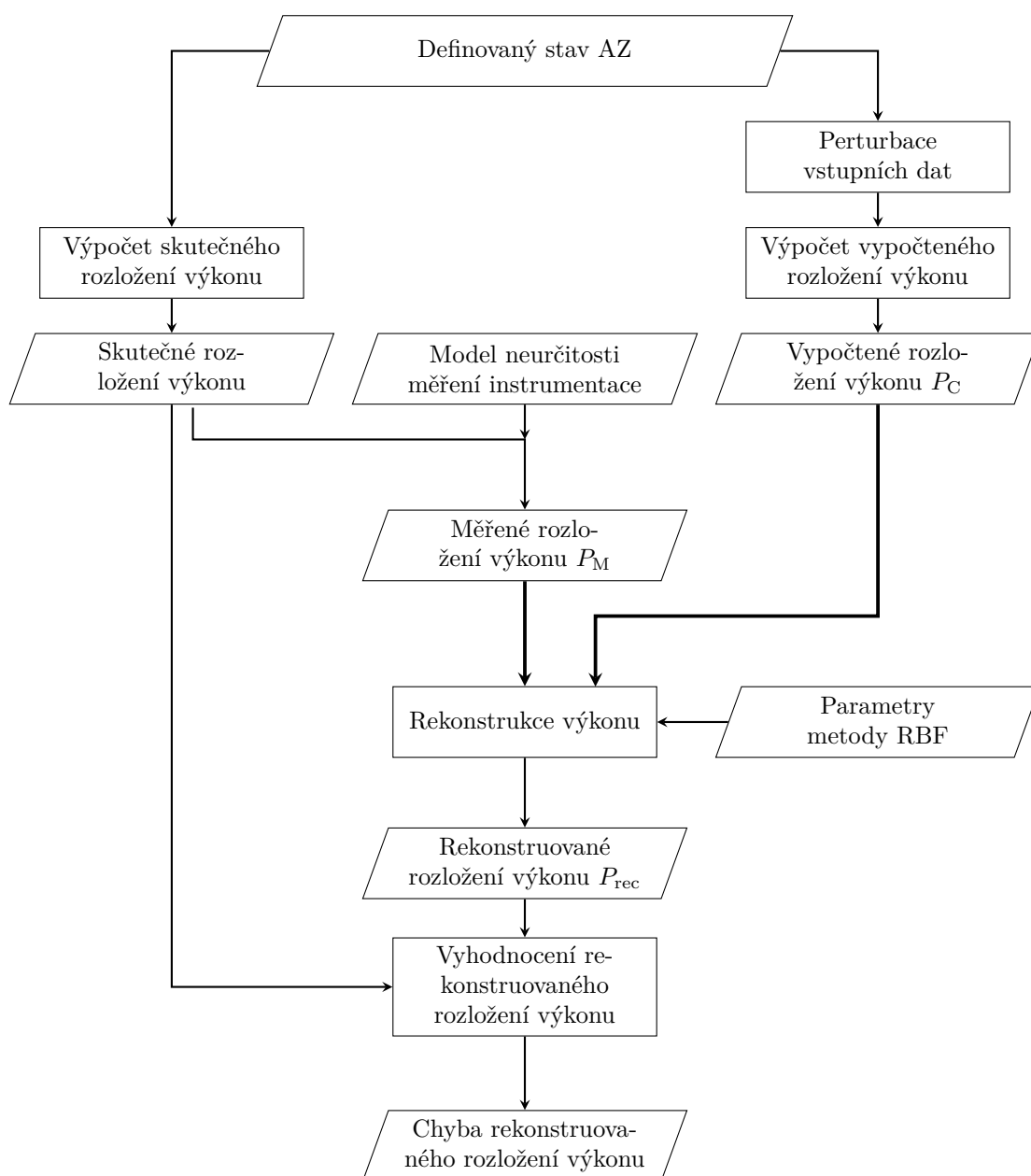
Metodika optimalizace parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu pomocí simulovaných vstupních dat byla na základě zpráv [13] a [14] pro případ 2D rekonstrukce na základě měření TC implementována v [5].

Tato metodika, schematicky znázorněná na obr. 1.6, spočívá v zavedení definovaného stavu AZ. *Definovaný stav AZ* je v rámci tohoto myšlenkového postupu považován za skutečný stav AZ, který při reálném provozu není znám a který je cílem věrohodně určit. Pro tento definovaný stav AZ je vypočteno *skutečné rozložení výkonu* – tedy rozložení výkonu, které v reálném provozu není přímo známo a je cílem ho věrohodně stanovit právě pomocí rekonstrukce výkonu. Účelem skutečného rozložení výkonu v rámci této metodiky je jeho porovnání s rekonstruovaným rozložením výkonu (viz dále).

Vybrané parametry definovaného stavu AZ jsou poté perturbovány a je pro ně vypočteno *vypočtené rozložení výkonu*, simulující rozložení výkonu stanovené simulátorem AZ v reálném provozu.

Zároveň je na skutečné rozložení výkonu aplikován model neurčitosti měření vnitroreaktorové instrumentace – výsledkem je *měřené rozložení výkonu*.

Následně je pro vybrané parametry metody RBF provedena rekonstrukce výkonu. Pro stanovené *rekonstruované rozložení výkonu* je vyhodnocena jeho chyba – tj. odchylka od postulovaného skutečného rozložení výkonu. Hodnota této chyby pak může být zkoumána v závislosti na různých parametrech metody RBF, čímž lze stanovovat optimální hodnoty těchto parametrů. Metrikami pro hodnocení chyby rekonstrukce výkonu se zabývá kap. 1.3.3.



Obrázek 1.6: Schéma provádění rekonstrukce výkonu pomocí simulovaných vstupních dat pro optimalizaci parametrů rekonstrukce výkonu [13] [5]

### 1.3.3 Metriky pro optimalizaci parametrů metody RBF

V rámci této práce bude pro hodnocení jednotlivých typů rozložení výkonu zpravidla <sup>(9)</sup> využívána relativní chyba rozložení výkonu pro PS v pozici  $(i, j)$ , resp. nód v pozici  $(i, j, z)$  daná vztahem

$$\delta_{\text{type}}(i, j) = \frac{P_{\text{type}}(i, j) - P_{\text{real}}(i, j)}{P_{\text{real}}(i, j)}, \quad (1.31)$$

resp.

$$\delta_{\text{type}}(i, j, z) = \frac{P_{1,\text{type}}(i, j, z) - P_{1,\text{real}}(i, j, z)}{P_{1,\text{real}}(i, j, z)}, \quad (1.32)$$

kde  $\text{type} \in \{C; M,tc; M,spd; rec\}$  – jedná se tedy o chybu vypočteného, měřeného, nebo rekonstruovaného rozložení výkonu. V případě 3D rekonstrukce se tato chyba uvažuje na základě lineárních výkonů  $P_{1,\text{type}}(i, j, z)$  a  $P_{1,\text{real}}(i, j, z)$ .

Pro hodnocení rekonstruovaného rozložení výkonu bude využívána především  $\delta_{\text{rec}}$  a z ní odvozené metriky. Při hodnocení pomocí  $\delta_{\text{rec}}$  vhodné přehlížet i k hodnotám  $\delta_C$  a  $\delta_M$ , čímž lze sledovat schopnost rekonstrukce výkonu eliminovat chyby měřeného a vypočteného rozložení výkonu.

Obecně lze (pro případ 2D rekonstrukce) na relativní chybu rekonstruovaného rozložení výkonu  $\delta_{\text{rec}}(i, j)$  nahlížet jako na funkci následujících proměnných:

- skutečného rozložení výkonu  $P_{\text{real}}(i, j)$ ,
- vypočteného rozložení výkonu  $P_C(i, j)$ ,
- měřeného rozložení výkonu  $P_{M,tc}(i, j)$ ,
- typu radiální bázové funkce  $\phi$ ,
- konstanty  $C$ ,
- tvaru tolerančního faktoru,  $T_{\text{form}} \in \{\text{normální, konstantní, dělený výkonem}\}$ ,
- parametru  $\alpha$ .

To lze symbolicky zapsat jako

$$\delta_{\text{rec}} = f((i, j), P_{\text{real}}(i, j), P_C(i, j), P_{M,tc}(i, j), \phi, T_{\text{form}}, \alpha, C). \quad (1.33)$$

Uvedená závislost bude obdobně platit i pro případ 3D rekonstrukce.

Takto definované relativní chyby rekonstruovaného rozložení výkonu slouží ke konstrukci metrik, které jsou popsány dále v následujících podkapitolách.

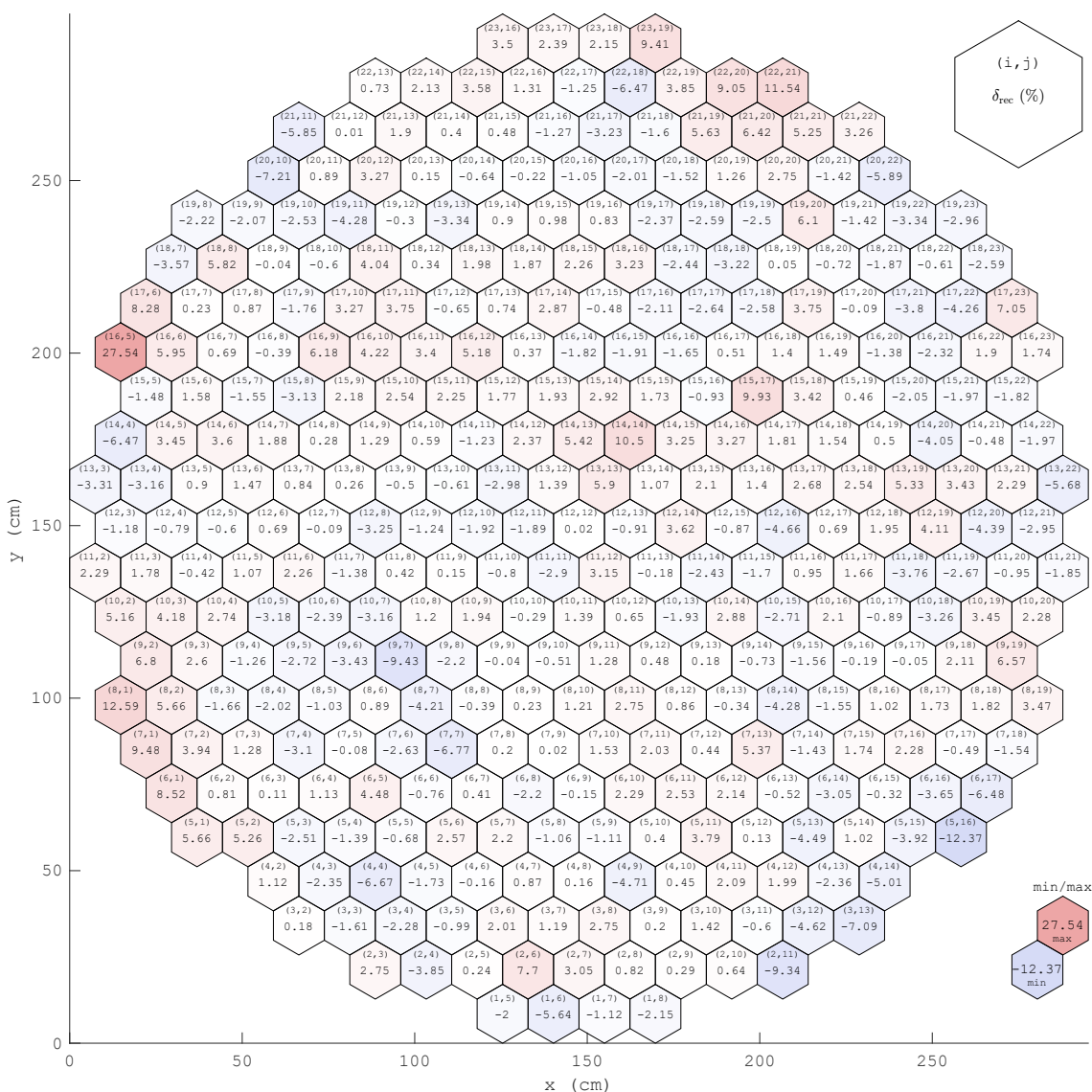
---

<sup>(9)</sup>Pouze v případě charakterizace vypočteného rozložení výkonu se dále v kap. 2.2 používá absolutní odchylka normovaného rozložení výkonu.

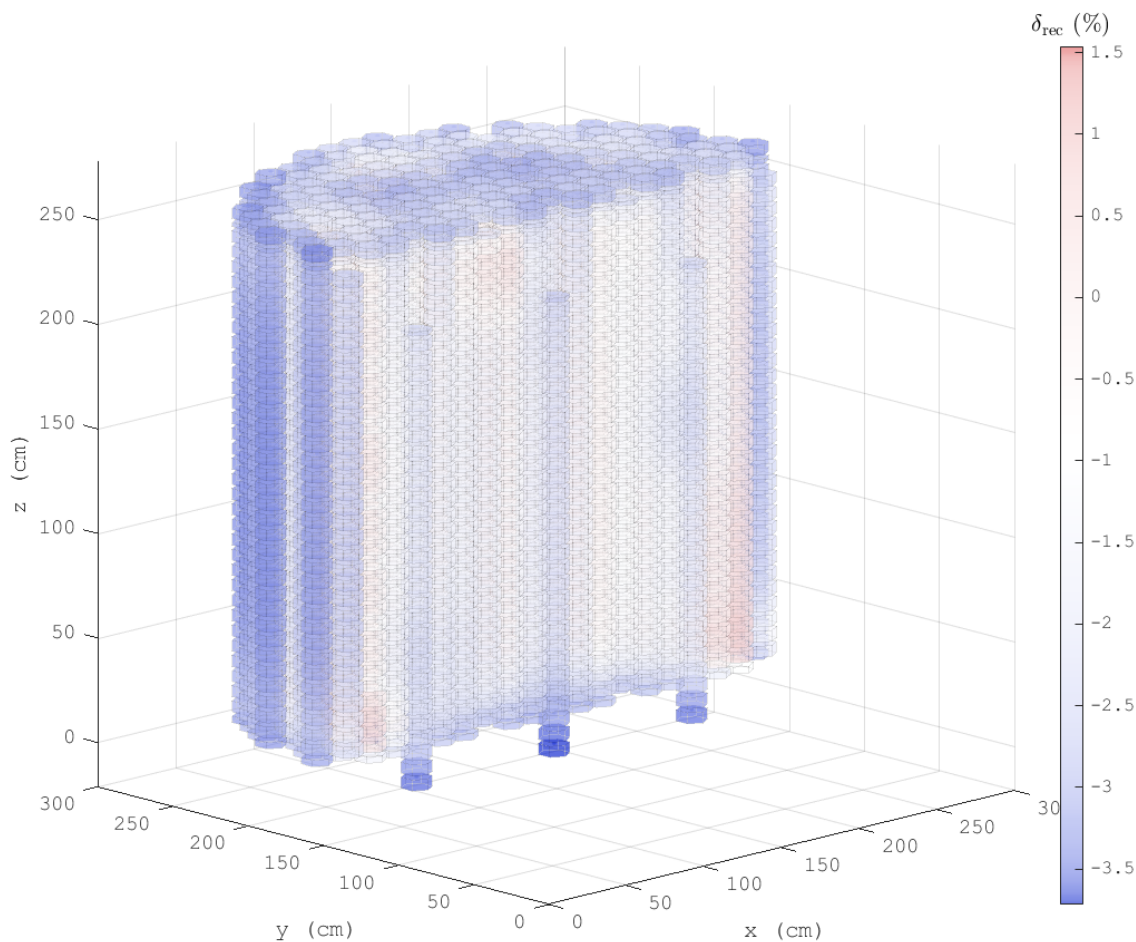
## Rozložení chyb rekonstruovaného rozložení výkonu

Východím přístupem pro posouzení věrohodnosti rekonstruovaného rozložení výkonu je vizuální zhodnocení rozložení jeho chyb  $\delta_{rec}$ . V závislosti na typu prováděné rekonstrukce lze nahlížet na tyto chyby na úrovni PS (viz obr. 1.7) nebo nódů (viz obr. 1.8). Výhodou tohoto přístupu je možnost podrobného studia těchto chyb v závislosti na lokalizaci chyb vypočteného, resp. měřeného rozložení výkonu  $\delta_C$ , resp.  $\delta_M$ .

Nevýhodou tohoto přístupu je, že takto lze hodnotit rekonstruované rozložení výkonu pro jedno nastavení parametrů a jednu skupinu vstupních dat. Tento způsob hodnocení je tedy závislý na všech proměnných ze vztahu (1.33). Rovněž je nevýhodné, že přímo neposkytuje vyhodnotitelná kvantitativní kritéria.



Obrázek 1.7: Ukázka pokazetového rozložení chyb rekonstruovaného rozložení výkonu v souladu se vztahem (1.31) – v horní části PS je prostřednictvím indexů  $(i, j)$  vyznačena jejich pozice, číslo ve středu PS udává chybu rekonstruovaného rozložení výkonu podle vztahu (1.31) v procentech



Obrázek 1.8: Ukázka nodálního rozložení chyb rekonstruovaného rozložení výkonu v souladu se vztahem (1.32) – řez AZ

### Chybová funkce parametru $\alpha$

Chybovou funkcí parametru  $\alpha$  se rozumí závislost průměrné velikosti chyby rekonstruovaného rozložení výkonu na hodnotě parametru  $\alpha$ .

Sestavení této závislosti spočívá v určení množiny  $A$  hodnot parametru  $\alpha$ ,  $A = \{\alpha_1, \dots, \alpha_{N_\alpha}\}$ , provedení rekonstrukce výkonu pro všechny hodnoty  $\alpha \in A$  a vyčíslení průměrné velikosti chyby rekonstruovaného rozložení výkonu  $\bar{\delta}_{\text{rec}}$  pro každou z hodnot  $\alpha$  pro 2D, resp. 3D rozložení výkonu:

$$\bar{\delta}_{\text{rec}}(\alpha) = \frac{1}{N_{\text{FA}}} \sum_{I_2, J_2} |\delta_{\text{rec}}((i, j), \alpha)|, \quad \text{resp.} \quad \bar{\delta}_{\text{rec}}(\alpha) = \frac{1}{N_{\text{node}}} \sum_{I_3, J_3, Z_3} |\delta_{\text{rec}}((i, j, z), \alpha)|. \quad (1.34)$$

Původní závislost (1.33) je tak redukována o prostorovou složku a zbývá závislost

$$\bar{\delta}_{\text{rec}} = f(P_{\text{real}}, P_C, P_M, \phi, T_{\text{form}}, \alpha, C). \quad (1.35)$$

Ukázka chybové funkce parametru  $\alpha$  je předmětem obr. 1.9, ze kterého je zřejmé, že má smysl v souladu se vztahem (1.34) vykreslovat tuto závislost společně s průměrnou velikostí chyby vypočteného 2D, resp. 3D rozložení výkonu:

$$\bar{\delta}_C = \frac{1}{N_{\text{FA}}} \sum_{I_2, J_2} |\delta_C(i, j)|, \quad \text{resp.} \quad \bar{\delta}_C = \frac{1}{N_{\text{node}}} \sum_{I_3, J_3, Z_3} |\delta_C(i, j, z)|, \quad (1.36)$$

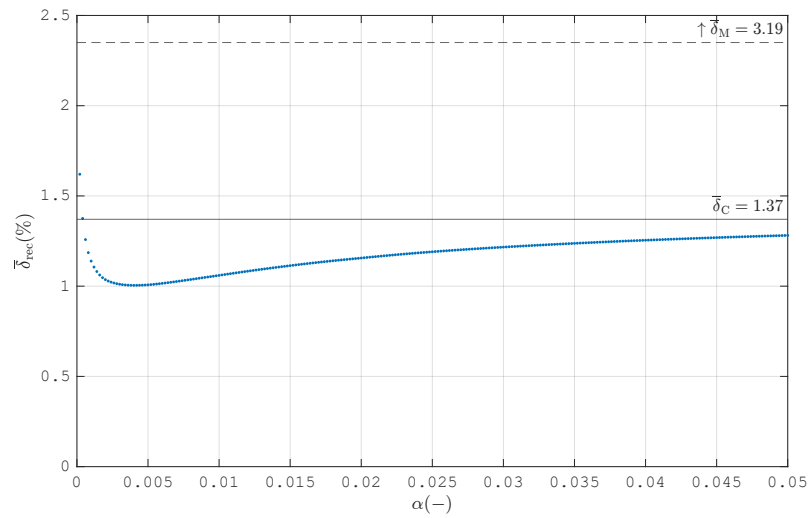


a průměrnou velikostí chyby rozložení výkonu měřeného TC, resp. SPND

$$\bar{\delta}_M = \frac{1}{N_{tc}} \sum_{I_{2,tc}, J_{2,tc}} |\delta_M(i, j)|, \quad \text{resp.} \quad \bar{\delta}_M = \frac{1}{N_{spd}} \sum_{I_{3,spd}, J_{3,spd}, Z_{3,spd}} |\delta_M(i, j, z)|. \quad (1.37)$$

Porovnání průběhu  $\bar{\delta}_{rec}(\alpha)$  s hodnotami  $\bar{\delta}_C$  a  $\bar{\delta}_M$  tak umožňuje sledovat schopnost parametru  $\alpha$  kompenzovat nepřesnosti vypočteného a měřeného rozložení výkonu – viz ukázkou na obr. 1.9 pro případ 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC.

Z obr. 1.9 lze pozorovat, že pro  $\alpha \rightarrow 0$  se hodnota chybové funkce parametru  $\alpha$  blíží průměrné velikosti chyby měřeného rozložení výkonu  $\bar{\delta}_M$ . Pro  $\alpha \rightarrow +\infty$  se hodnota chybové funkce parametru  $\alpha$  blíží průměrné velikosti chyby vypočteného rozložení výkonu  $\bar{\delta}_C$ . Toto pozorování odpovídá teoretickému popisu vlivu hodnoty parametru  $\alpha$  v kap. 1.3.1.



Obrázek 1.9: Ukázka chybové funkce parametru  $\alpha$  společně s vynesenu průměrnou velikostí chyby vypočteného rozložení výkonu  $\bar{\delta}_C$  a rozložení výkonu měřeného TC  $\bar{\delta}_M$

Pro závislost  $\bar{\delta}_{rec}$  lze stanovit její minimum

$$\bar{\delta}_{rec, \min} = \min_{\alpha \in A} (\bar{\delta}_{rec}(\alpha)), \quad (1.38)$$

které charakterizuje schopnost rekonstrukce výkonu přiblížit se skutečnému rozložení výkonu. Dále lze stanovit argument minima této závislosti

$$\alpha_{\min} = \arg \min_{\alpha \in A} (\bar{\delta}_{rec}(\alpha)), \quad (1.39)$$

mající význam *optimální hodnoty parametru  $\alpha$*  – tedy hodnoty parametru  $\alpha$ , která zajišťuje nejlepší shodu rekonstruovaného rozložení výkonu se skutečným.

## Chybová funkce parametrů $\alpha$ a $C$

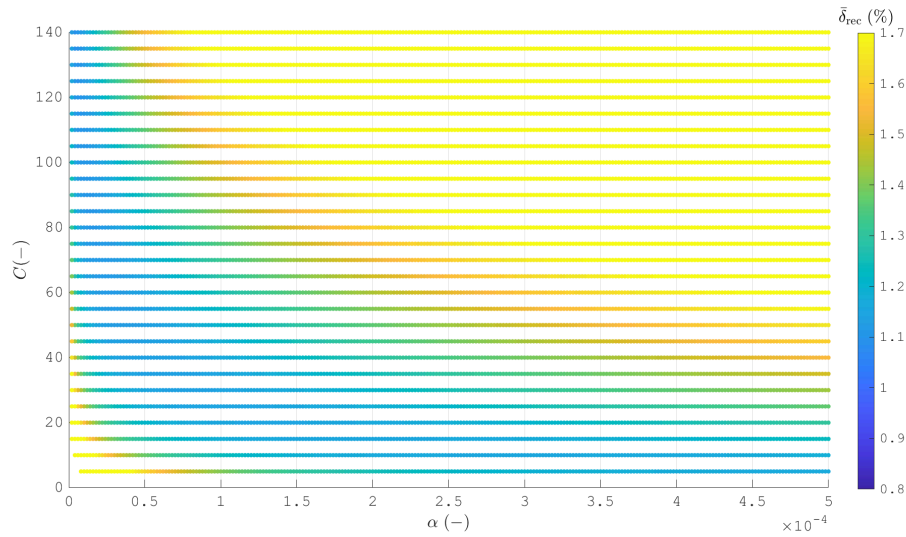
Oproti předchozí kapitole chybová funkce parametrů  $\alpha$  a  $C$  zohledňuje i konstantu  $C$  v definicích některých typů funkcí (viz tab. 1.1), čímž je na rozdíl od postupu v [5] analyzován vliv hodnot  $\alpha$  i  $C$  zároveň.

Pro každou kombinaci prvků  $\alpha$  a  $C$  z množin  $A = \{\alpha_1, \dots, \alpha_{N_\alpha}\}$  a  $\Gamma = \{C_1, \dots, C_{N_C}\}$  je provedena rekonstrukce výkonu a v souladu se vztahem (1.34) vyčíslena průměrná velikost chyby rekonstruovaného rozložení výkonu jako funkce těchto parametrů

$$\bar{\delta}_{\text{rec}}(\alpha, C) = \frac{1}{N_{\text{FA}}} \sum_{I_2, J_2} |\delta_{\text{rec}}((i, j), \alpha, C)|, \quad (1.40)$$

resp.

$$\bar{\delta}_{\text{rec}}(\alpha, C) = \frac{1}{N_{\text{node}}} \sum_{I_3, J_3, Z_3} |\delta_{\text{rec}}((i, j, z), \alpha, C)|. \quad (1.41)$$



Obrázek 1.10: Ukázka chybové funkce parametru  $\alpha$  a  $C$  pro 2D rekonstrukci výkonu na základě měření TC

Podobně jako v kapitole výše má smysl pro chybovou funkci parametrů  $\alpha$  a  $C$  stanovovat její minimum

$$\bar{\delta}_{\text{rec}, \min} = \min_{\alpha \in A, C \in \Gamma} (\bar{\delta}_{\text{rec}}(\alpha, C)) \quad (1.42)$$

a argument minima této závislosti

$$\{\alpha_{\min}, C_{\min}\} = \arg \min_{\alpha \in A, C \in \Gamma} (\bar{\delta}_{\text{rec}}(\alpha, C)), \quad (1.43)$$

který má význam dvojice optimálních parametrů  $\alpha_{\min}, C_{\min}$ , pro kterou je zajištěna nejlepší shoda rekonstruovaného rozložení výkonu se skutečným.

Chybová funkce parametru  $\alpha$  a  $C$  je znázorněna na obr. 1.10.

## Celková chybová funkce parametrů $\alpha$ a $C$

Chybová funkce parametru  $\alpha$  (1.34), resp. parametrů  $\alpha$  a  $C$  (1.40) popsaná v kapitolách výše je vždy sestavena pro jednu skupinu vstupních dat, tj. pro jednu kombinaci skutečného rozložení výkonu  $P_{\text{real}}$ , vypočteného rozložení výkonu  $P_C$  a měřeného rozložení výkonu  $P_M$ . Pro získání reprezentativního průběhu této metriky je nutné uvážit reprezentativní soubory vstupních dat a provést sestavení chybových funkcí pro všechny tyto soubory vstupních dat a stanovit reprezentativní průběh těchto funkcí. Tento reprezentativní průběh bude nazýván jako *celková chybová funkce parametrů  $\alpha$  a  $C$* , bude značen jako  $\bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}}$  a bude stanoven jako průměr jednotlivých chybových funkcí přes všechny kombinace vstupních dat.

Pro sestavení této funkce jsou předpokládány následující skupiny vstupních dat:

- skupina skutečných rozložení výkonu  $P_{\text{real},i_{\text{real}}}$  pro  $i_{\text{real}} = 1, \dots, N_{P_{\text{real}}}$ ,
- skupina vypočtených rozložení výkonu  $P_{C,i_c}$  pro  $i_c = 1, \dots, N_{P_C}$ ,
- skupina měřených rozložení výkonu  $P_{M,i_m}$  pro  $i_m = 1, \dots, N_{P_M}$ .

Pro  $\bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}}$  platí původní závislost (1.35). Tato závislost je vypočtením hodnot celkové chybové funkce  $\bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}}$  pomocí vztahu

$$\bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}} = \frac{1}{N_{P_{\text{real}}} \cdot N_{P_C} \cdot N_{P_M}} \sum_{i_{\text{real}}} \sum_{i_c} \sum_{i_m} \bar{\delta}_{\text{rec}}(P_{\text{real},i_{\text{real}}}, P_{C,i_c}, P_{M,i_m}) \quad (1.44)$$

redukována na závislost

$$\bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}} = f(\phi, T_{\text{form}}, \alpha, C). \quad (1.45)$$

Stejně jako v kapitolách výše má smysl i pro celkovou chybovou funkci parametru  $\alpha$ , resp.  $\alpha$  a  $C$  charakterizovat minimum těchto závislostí. V analogii se vztahem (1.38) tak bude celková minimální průměrná velikost chyby rekonstruovaného rozložení výkonu dána vztahem

$$\bar{\delta}_{\text{rec},\min}^{\text{tot}} = \min_{\alpha \in A} \left( \bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}}(\alpha) \right). \quad (1.46)$$

Podobně v analogii se vztahem (1.39) bude pro celkovou optimální hodnotu parametru  $\alpha$  platit

$$\alpha_{\min}^{\text{tot}} = \arg \min_{\alpha \in A} \left( \bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}}(\alpha) \right). \quad (1.47)$$

Pro případ celkové chybové funkce parametru  $\alpha$  a  $C$  rovněž

$$\bar{\delta}_{\text{rec},\min}^{\text{tot}} = \min_{\alpha \in A, C \in \Gamma} \left( \bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}}(\alpha, C) \right) \quad (1.48)$$

a

$$\{\alpha_{\min}^{\text{tot}}, C_{\min}^{\text{tot}}\} = \arg \min_{\alpha \in A, C \in \Gamma} \left( \bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}}(\alpha, C) \right). \quad (1.49)$$

Aby bylo možné považovat výše definované metriky za reprezentativní, tak je nutné v rámci analýz uvažovat dostatečně reprezentativní vstupní data – tedy reprezentativní skutečná, vypočtená a měřená rozložení výkonu. Popisem a volbou reprezentativních vstupních dat se dále zabývá kap. 2.

Ve speciálních případech, kdy je pevně zvolena hodnota parametru  $\alpha$  lze vyšetřovat celkovou chybovou funkci pouze parametru  $C$  (viz dále kap. 3.4.1).

### 1.3.4 Plán optimalizace parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu

V kap. 1.2 jsou definovány tři typy rekonstrukce výkonu metodou RBF a následně jsou v kap. 1.3.1 identifikovány a popsány volné parametry metody RBF a jejich vliv na rekonstrukci výkonu. Cílem této kapitoly je stanovit plán optimalizace parametrů metody RBF zvláště pro 2D rekonstrukci výkonu na základě měření TC (viz kap. 1.2.1), 3D rekonstrukci výkonu na základě měření SPND (viz kap. 1.2.2) a pro rekonstrukci výkonu spočívající v kombinaci 2D a 3D rekonstrukcí (viz kap. 1.2.3), která je specifická různým využitím dílčích rekonstrukcí výkonu.

#### 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC

Touto optimalizací se zabývá práce [5]. Na základě metodiky podle kap. 1.3.2 byly pomocí metrik popsaných v kap. 1.3.3 stanoveny následující závěry:

- jako nejvhodnější tvar tolerančního faktoru se ukázal být tvar s označením *dělený výkonem* (viz tab. 1.2),
- byly stanoveny optimální hodnoty parametru  $\alpha$  a  $C$  pro jednotlivé typy funkcí,
- závislost metriky  $\bar{\delta}_{\text{rec}}$  na hodnotě parametru  $C$  se ukázala být relativně slabá vyjma hodnot nižších než 20 (na rozdíl od metodiky v této práci byla závislost  $\bar{\delta}_{\text{rec}}$  na  $\alpha$  a  $C$  zkoumána odděleně),
- je nutné věnovat pozornost citlivosti uvažovaných metrik na charakter skutečného, vypočteného i měřeného rozložení výkonu,
- pro optimalizované parametry  $\alpha$ ,  $C$  a  $T_{\text{form}}$  je rozdíl mezi jednotlivými typy funkcí relativně málo významný.

Práce [5] rovněž konstatuje, že stanovené závěry nelze zobecnit na odlišné geometrie úlohy aproximace metodou RBF, což vyplývá i z popisu parametrů rekonstrukce výkonu v kap. 1.3.1. Z tohoto důvodu bude nutné zvláště analyzovat ostatní přístupy pro rekonstrukci výkonu.

Dílčím cílem této práce bude opětovně provést výpočty optimalizace parametrů metody RBF pro 2D radiální rekonstrukci výkonu a ověřit tak závěry uvedené výše. Rovněž bude cílem takto nově určit optimální hodnoty parametru  $\alpha$  s ohledem na nové využití jednotek neurčitostí – tedy wattů místo stupňů Celsia (viz kap. 1.2.1). Rozdíl oproti [5] bude představovat využití celkové chybové funkce parametru  $\alpha$  a  $C$ , což uvedená práce neuvažuje.

#### 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND

Oproti 2D rekonstrukci výkonu na základě měření TC lze důsledku odlišného počtu bodů aproximace a rozdílné geometrie interpolační úlohy očekávat odlišné výsledky. Význačnou odlišností budou rovněž hodnoty neurčitostí měření SPND  $\sigma_{\text{spd,tot}}$  (dále v kap. 2.3 je ukázáno, že neurčitosti měření SPND dosahují nižších hodnot než neurčitosti měření TC). V této souvislosti bude nutné přehodnotit množiny  $A$  a  $\Gamma$  analyzovaných hodnot  $\alpha$  a  $C$ . Na rozdíl od optimalizace 2D rekonstrukce bude cílem minimalizovat chybu rekonstrukce výkonu na nodální a nikoliv pokazetové úrovni.

## Kombinovaná rekonstrukce výkonu

Optimalizace parametrů metody RBF pro kombinovanou rekonstrukci výkonu bude významná tím, že samotná rekonstrukce výkonu je – jak vyplývá z kap. 1.2.3 – v tomto procesu zahrnuta třikrát, což je dále popsáno v následujících třech bodech.

1. První potřebnou rekonstrukcí je 3D rekonstrukce výkonu, jejímž produktem je interpolované 3D rozložení výkonu  $P_{\text{rec,interp}}$ . Vzhledem tomu, že v případě této rekonstrukce je cílem minimalizovat vliv vypočteného rozložení výkonu, tak je volena nulová hodnota parametru  $\alpha$ , čímž se neprojeví vliv tvaru tolerančního faktoru. Volnými parametry určenými k optimalizaci jsou typ funkce a konstanta  $C$ . Soubor bodů, na nichž budou zadány hodnoty relativních odchylek výkonu bude odpovídat množině pozic měřících SPND. Chyba rekonstrukce výkonu bude minimalizována na pokazetové úrovni, jelikož cílem této rekonstrukce je doplnění 2D rozšířeného měřeného rozložení výkonu (viz 3. krok v kap. 1.2.3).
2. Druhou dílčí rekonstrukcí bude 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND a její optimalizace bude shodná s podkapitolou výše – cílem bude určit optimální hodnotu parametrů  $\alpha$ ,  $C$ , optimální typ funkce a tvar tolerančního faktoru.
3. Třetí rekonstrukcí je 2D kombinovaná rekonstrukce výkonu na základě rozšířeného 2D měřeného rozložení výkonu. Tato část bude podobná 2D rekonstrukci na základě měření TC. Rozdílné výsledky analýz mohou být způsobeny vyšším počtem bodů aproximace a rozdílnými hodnotami neurčitostí složených z neurčitostí měření jednotlivých SPND. Vzhledem k těmto odlišnostem nelze automaticky předpokládat stejné výsledky jako v případě 2D rekonstrukce na základě měření TC a bude nutné se zabývat stanovením optimálních hodnot parametru  $\alpha$ , parametru  $C$ , optimálního typu funkce a tvaru tolerančního faktoru. Vyhodnocení této rekonstrukce bude probíhat na nodální úrovni po přeškálování 3D aproximovaného rozložení výkonu (viz 7. krok v kap. 1.2.3).



## Kapitola 2

# Analýza a generování vstupních dat

Samotná rekonstrukce výkonu metodou RBF popsaná v kap. 1.2 jako vstupní údaje vyžaduje stanovené reprezentativní hodnoty měřeného výkonu  $P_{M,tc}(i, j)$ , resp.  $P_{M,spd}(i, j, z)$  a příslušné neurčitosti měření TC, resp. SPND reprezentované hodnotami  $\sigma_{tc,tot}(i, j)$ , resp.  $\sigma_{spd,tot}(i, j, z)$ . Věrohodné určení těchto hodnot je základním předpokladem pro stanovení věrohodného rekonstruovaného rozložení výkonu. Proto se dále kap. 2.1 věnuje popisu a stanovování uvedených neurčitostí pro rekonstrukci výkonu.<sup>(10)</sup>

Kromě samotné rekonstrukce výkonu je nutné věnovat pozornost i charakteru simulovaných vstupních dat pro účely optimalizace parametrů metody RBF popsané v kap. 1.3.2. Věrohodné stanovení a simulace chyby vstupních dat v rámci metodiky optimalizace parametrů metody RBF je nutným předpokladem pro stanovení optimálních hodnot těchto parametrů a tím i zajištění věrohodnosti výsledné rekonstrukce výkonu (viz kap. 1.3.2).

### 2.1 Diagnostika signálů

Cílem diagnostiky signálu je stanovení neurčitostí měření vnitroreaktorové instrumentace jako vstupního údaje pro rekonstrukci výkonu. Popis diagnostiky je dále členěn zvlášť pro případ TC a SPND.

#### 2.1.1 Diagnostika signálů TC

Měření rozložení výkonu pomocí TC je založeno na měření teploty chladiva v hlavici PS. Na základě rozdílu této teploty a stanovené teploty chladiva na vstupu do PS  $\Delta T_M(i, j)$  lze stanovit měřený výkon vyvinutý daným PS  $P_{M,tc}(i, j)$ .

Interpretace výkonu PS na základě jeho měřeného ohřevu je přitom zatížena neurčitostmi v důsledku:

- přepočtu ohřevu  $\Delta T_M(i, j)$  na výkon  $P_{M,tc}(i, j)$  pomocí hmotnostního toku a nárůstu entalpie,

---

<sup>(10)</sup>Cílem této práce naopak není popis uvedené vnitroreaktorové instrumentace pro měření rozložení výkonu. Zabývá se jím například práce [4].

- nerovnoměrností teplotního pole chladiva v místě měření TC – reálně není měřena střední teplota na výstupu PS, ale nereprezentativní teplota části proudu chladiva [15] [16],
- skutečností, že samotný TC je umístěn v tzv. koncovce (tj. konstrukční prvek, který zajišťuje mechanickou ochranu samotného termočlánku), což způsobuje zpoždění odezvy měření teploty proudu chladiva [17],
- instrumentálního šumu signálu.

Celková neurčitost měření TC  $\sigma_{tc,tot}(i,j)$  se podle tab. 1.2 skládá ze statické  $\sigma_{tc,stat}$  a dynamické  $\sigma_{tc,dyn}(i,j)$  složky. Statická složka zohledňuje celkovou neurčitost interpretace měřené teploty a dynamická složka zohledňuje míru fluktuace signálu kolem své reprezentativní hodnoty.

Statickou složku neurčitosti zpráva [13] stanovuje na základě porovnání měřených teplot na symetrických pozicích pro několik kampaní všech bloků EDU. Tímto způsobem byla určena její průměrná hodnota  $\sigma_{tc,stat} = 0,9$  °C.

Pro stanovení dynamické složky neurčitosti signálu  $\sigma_{tc,dyn}(i,j)$  je v Oddělení reaktorové fyziky a podpory palivového cyklu ÚJV Řež, a. s. vyvíjen modul monitorovacího systému SCORPIO-VVER s označením DIAG, který má sloužit k on-line stanovování dynamické neurčitosti signálu. Následující popis diagnostiky signálu tak odpovídá současnému stavu vývoje tohoto modulu. [18][19]

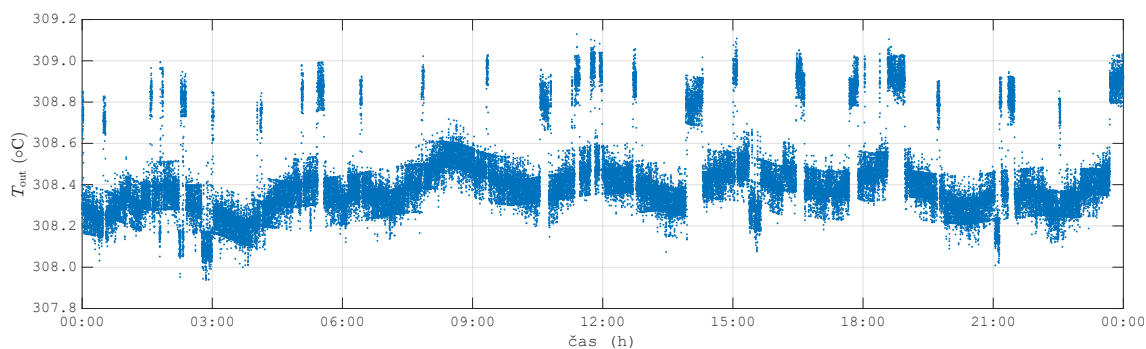
V rámci stanovení dynamické neurčitosti signálu TC je formálně předpokládán surový signál  $s_t(i,j)$  v pozici  $(i,j)$  v čase  $t$  v rámci analyzované množiny časových kroků  $\tau$ , kde čas je vzorkován do kroků s délkou jedné sekundy. Signál je tvořen hodnotami měřené teploty chladiva na výstupu PS.

Na průběhu signálu měření TC lze obecně pozorovat:

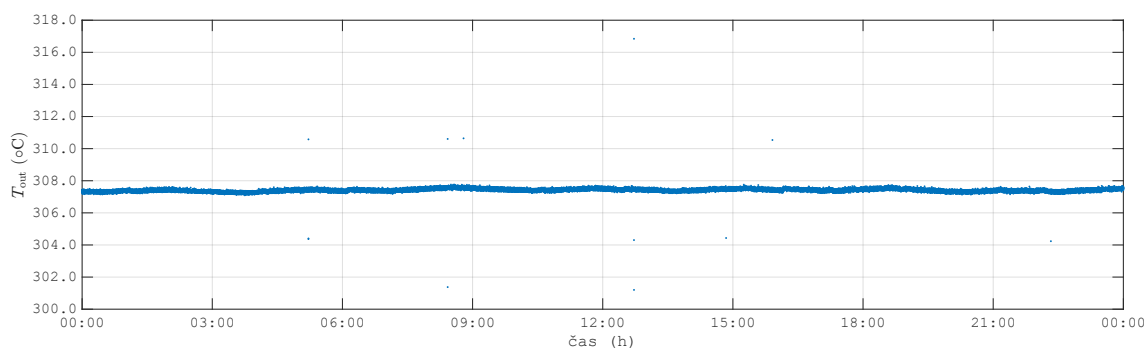
- základní trend signálu – má charakter periodické, po částech lineární funkce (tento charakter je způsoben oscilacemi tlaku v důsledku řízené netěsnosti chladné větve kompenzátoru objemu a spínání elektroohříváků společně s tlakovým koeficientem reaktivity [20]),
- instrumentální šum – má charakter náhodných oscilací,
- *skoky* – dlouhodobější změny hladiny měřené teploty v důsledku omývání TC jazyky chladiva o různé teplotě [16][19] (viz obr. 2.1),
- *odlehle hodnoty* – velmi krátké a rychlé změny měřené teploty, které na základě stanovených kritérií (viz dále) mohou být identifikovány jako *vyloučené odlehle hodnoty* – tedy hodnoty signálu jednoznačně způsobené chybou měření a nikoliv změnou teploty chladiva (viz obr. 2.2),
- regulační zásahy,
- kvantitační chybu analogově digitálního převodníku – převodník je v důsledku vady schopen převádět analogový signál do příliš malého množství diskrétních hladin digitálního signálu (viz obr. 2.3).

Pokud se v signálu TC nachází *skoky*, pak tento TC bývá označován jako *skákačící*. V opačném případě se hovoří o *neskákačícím* TC.

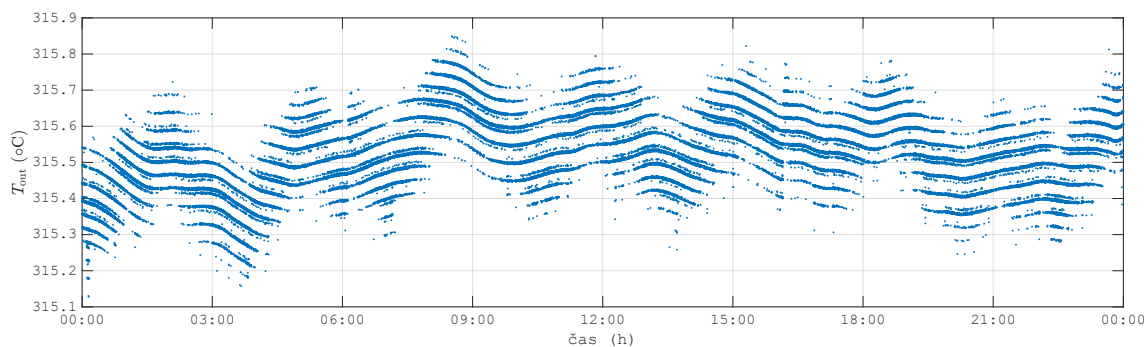




Obrázek 2.1: Ukázka signálu TC obsahujícího skoky



Obrázek 2.2: Ukázka signálu TC obsahujícího odlehlé hodnoty



Obrázek 2.3: Ukázka signálu TC obsahujícího kvantitační chybu analogově digitálního převodníku

Diagnostiku výše popsaného signálu lze rozdělit do následujících kroků, které jsou popsány dále a znázorněny na schématu 2.7:

- detekce a eliminace výpadků,
- mediánová filtrace,
- stanovení výkonového trendu,
- vyloučení vybraných odlehlých hodnot z původního signálu,
- určení reprezentativního signálu a neurčitostí.

## Detekce a eliminace výpadků

V surovém signálu TC  $s_t(i, j)$  se kromě číselných hodnot měřené teploty vyskytují i lokální výpadky reprezentované nečíselnými údaji (tzv. NaN). Takto detekované výpadky jsou nahrazeny nejbližší číselnou hodnotou.

## Mediánová filtrace

Cílem mediánové filtrace je získat shlazené signály – filtry – pro další zpracování. Pro shlazení je využívána mediánová filtrace, pomocí které jsou stanoveny dva typy filtrů:

- $s_{\text{fast},t}(i, j)$  – *rychlý filtr* – klouzavý medián s oknem o velikosti 7 sekund, což lze formálně zapsat jako

$$s_{\text{fast},t}(i, j) = \text{movemed}(s_t(i, j), 7), \quad (2.1)$$

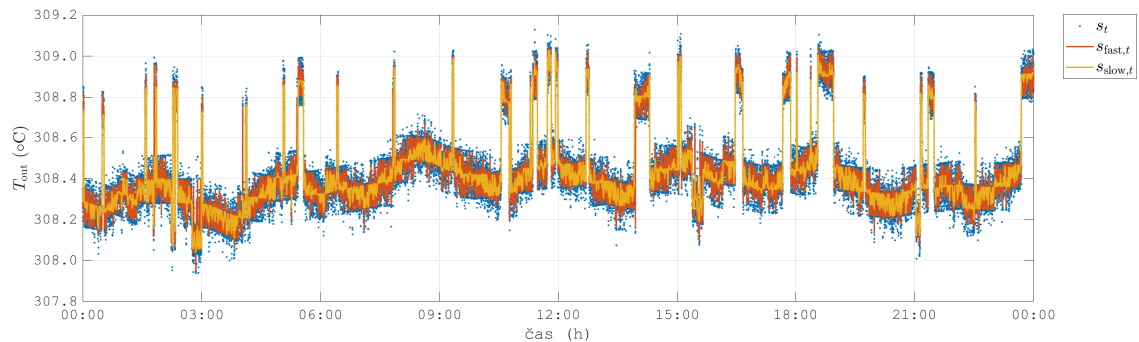
- $s_{\text{slow},t}(i, j)$  – *pomalý filtr* – klouzavý medián s oknem o velikosti 61 sekund:

$$s_{\text{slow},t}(i, j) = \text{movemed}(s_t(i, j), 61), \quad (2.2)$$

kde uvedené velikosti časových oken byly zvoleny empiricky tak, aby rychlý filtr eliminoval odlehlé hodnoty a nebyl shlazený a aby pomalý filtr eliminoval odlehlé hodnoty, byl shlazený, ale zároveň zachovával trend a strmost surového signálu  $s_t(i, j)$ .

V rámci diagnostiky signálu vnitroreaktorové instrumentace se obecně ukazuje, že mediánový filtr vhodně shlazuje signál a zároveň je schopen věrohodně zachovat trend signálu. Těchto vlastností nelze dosáhnout například pomocí klouzavého průměru.

Rychlý i pomalý filtr pro signál z obr. 2.1 jsou vykresleny na obr. 2.4. Z tohoto obrázku lze pozorovat, že rychlý filtr  $s_{\text{fast},t}$  vykazuje vyšší míru shlazení než surový signál  $s_t$  a dále pomalý filtr vykazuje vyšší míru shlazení  $s_{\text{slow},t}$  než rychlý filtr  $s_{\text{fast},t}$ .



Obrázek 2.4: Znárodnění signálu TC z obr. 2.1 společně s jeho rychlým filtrem (červenou barvou) a pomalým filtrem (žlutou barvou)

## Stanovení výkonových trendů

Stanovení výkonového trendu je důležitým krokem pro následné stanovení reprezentativního signálu (viz dále). Jeho cílem je ze signálů TC stanovit trend výkonu tak, aby se do něj nepromítly skoky v signálu některých TC (viz skoky na obr. 2.1). Pro stanovení výkonového trendu je tak předpokládáno:

- skoky jsou přítomny v relativně malém množství signálů,
- signály jsou vzájemně korelované.

Za pomoci splnění těchto předpokladů lze dále globální výkonový trend (viz dále vztah (2.4)) považovat za reprezentativní trend signálu pro všechny pozice TC v AZ.

Postup pro stanovení výkonových trendů je pak následující:

- od každého rychlého filtru je odečtena jeho střední hodnota přes časový úsek  $\tau$

$$s_{\text{fast},t}^-(i, j) = s_{\text{fast},t}(i, j) - \frac{1}{N_t} \sum_{\tau} s_{\text{fast},t}(i, j) \quad (2.3)$$

- pro každý časový krok je vypočten průměr přes rychlé filtry ve všech měřených pozicích – je tak stanoven *globální výkonový trend*:

$$\bar{s}_t = \frac{1}{N_{\text{tc}}} \sum_{I_{2,\text{tc}}, J_{2,\text{tc}}} s_{\text{fast},t}^-(i, j), \quad (2.4)$$

který má význam reprezentativního trendu pro všechny pozice TC v AZ,

- pro každý signál jsou stanoveny hodnoty konstant  $a_1, a_2$ , pro které norma rozdílu mezi posunutým přeskálovaným globálním výkonovým trendem (odpovídá výrazu  $a_1 \bar{s}_t + a_2$ ) a rychlým filtrem  $s_{\text{fast},t}(i, j)$

$$\|a_1 \bar{s}_t + a_2 - s_{\text{fast},t}(i, j)\| \quad (2.5)$$

nabývá minima – tedy platí pro ně

$$\{a_{1,\min}(i, j), a_{2,\min}(i, j)\} = \arg \min_{a_1, a_2} (\|a_1 \bar{s}_t + a_2 - s_{\text{fast},t}(i, j)\|), \quad (2.6)$$

čímž je nalezen *lokální výkonový trend* pro pozici  $(i, j)$ :

$$\hat{s}_t(i, j) = a_{1,\min}(i, j) \cdot \bar{s}_t + a_{2,\min}(i, j). \quad (2.7)$$

Lokální výkonový trend je znázorněn dále na obr. 2.5.

## Vyloučení vybraných odlehlých hodnot z původního signálu

Pro vyloučení vybraných odlehlých hodnot z původního signálu je využívána mediánová absolutní odchylka [21] [22]. Mediánová absolutní odchylka (MAD) je mírou variability signálu a je uvažována jako přeskálovaný medián odchylek surového signálu od pomalého filtru:

$$\text{MAD}(i, j) = K \cdot \text{med}(|s_t(i, j) - s_{\text{slow},t}(i, j)|), \quad (2.8)$$

kde  $K$  je empirická konstanta.

Na základě hodnoty  $\text{MAD}(i, j)$  jsou pro daný signál v pozici  $(i, j)$  nalezeny takové časy  $t$ , pro které jsou absolutní odchylky pomalého filtru  $s_{\text{slow},t}(i, j)$  od surového signálu  $s_t(i, j)$  větší než právě hodnoty mediánové absolutní odchylky  $\text{MAD}(i, j)$ . Takto nalezené časy náleží množině časů vyloučených časových kroků  $\tau_{\text{out}}(i, j)$  pro signál v pozici  $(i, j)$ :

$$\forall(i, j) : t \in \tau_{\text{out}}(i, j) \subset \tau \Leftrightarrow |s_t(i, j) - s_{\text{slow},t}(i, j)| > \text{MAD}(i, j)$$

Pro takto nalezené časy je hodnota surového signálu nahrazena příslušnými hodnotami pomalého filtru, čímž je stanoven *surový signál bez vyloučených odlehlých hodnot*:

$$\tilde{s}_t(i, j) = \begin{cases} s_t(i, j) & \text{pro } t \in \tau \setminus \tau_{\text{out}}(i, j), \\ s_{\text{slow},t}(i, j) & \text{pro } t \in \tau_{\text{out}}(i, j). \end{cases} \quad (2.9)$$

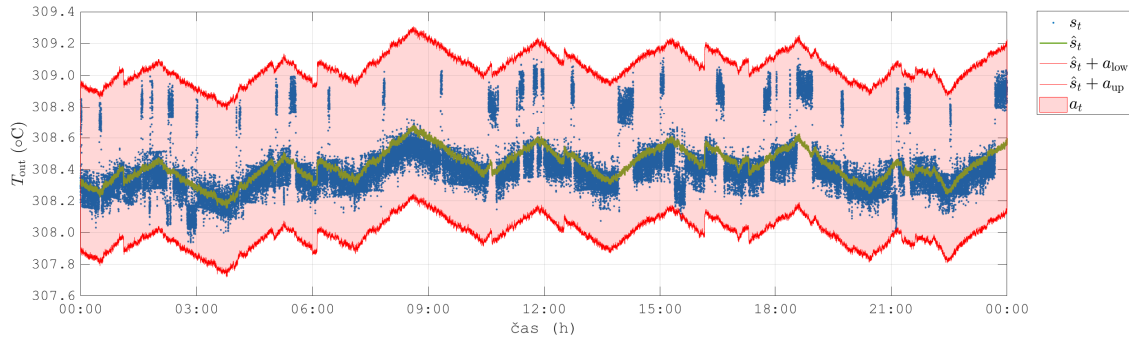
## Určení reprezentativního signálu a neurčitostí

Pro stanovení výsledného signálu a neurčitostí je nejprve stanovena *apertura signálu*  $a_t$  – pásmo hodnot vymezující maximální a minimální odchylku lokálního výkonového trendu:

$$a_t(i, j), t \in \tau : a_t(i, j) \in \langle \hat{s}_t(i, j) + a_{\text{low}}(i, j), \hat{s}_t(i, j) + a_{\text{up}}(i, j) \rangle, \quad (2.10)$$

kde pro spodní, resp. horní šířku platí

$$a_{\text{low}}(i, j) = \min_{\tau} (\tilde{s}_t(i, j) - \hat{s}_t(i, j)), \quad \text{resp.} \quad a_{\text{up}}(i, j) = \max_{\tau} (\tilde{s}_t(i, j) - \hat{s}_t(i, j)). \quad (2.11)$$



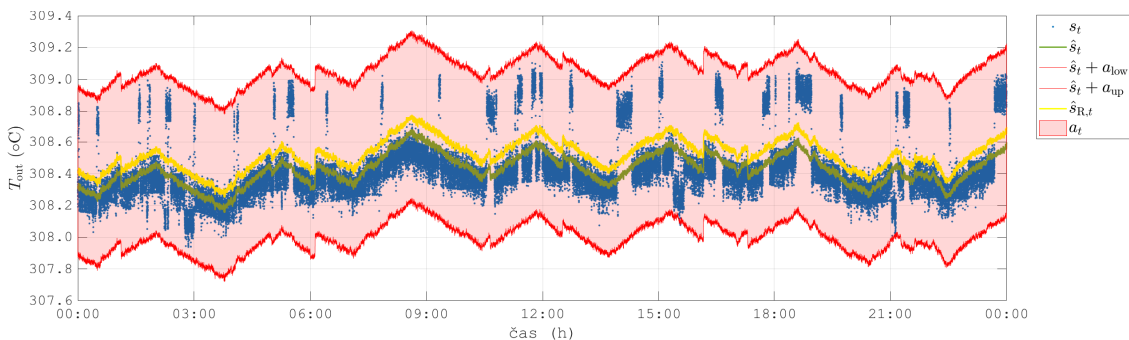
Obrázek 2.5: Znárodnění apertury signálu TC (červená plocha) se surovým signálem (modrou barvou) a lokálním výkonovým trendem (zelenou barvou) pro signál z obr. 2.1

Na základě apertury je stanoven reprezentativní signál  $\hat{s}_{R,t}(i, j)$  (viz obr. 2.6):

$$\hat{s}_{R,t}(i, j) = \hat{s}_t(i, j) + \frac{a_{\text{up}}(i, j) + a_{\text{low}}(i, j)}{2}, \quad (2.12)$$

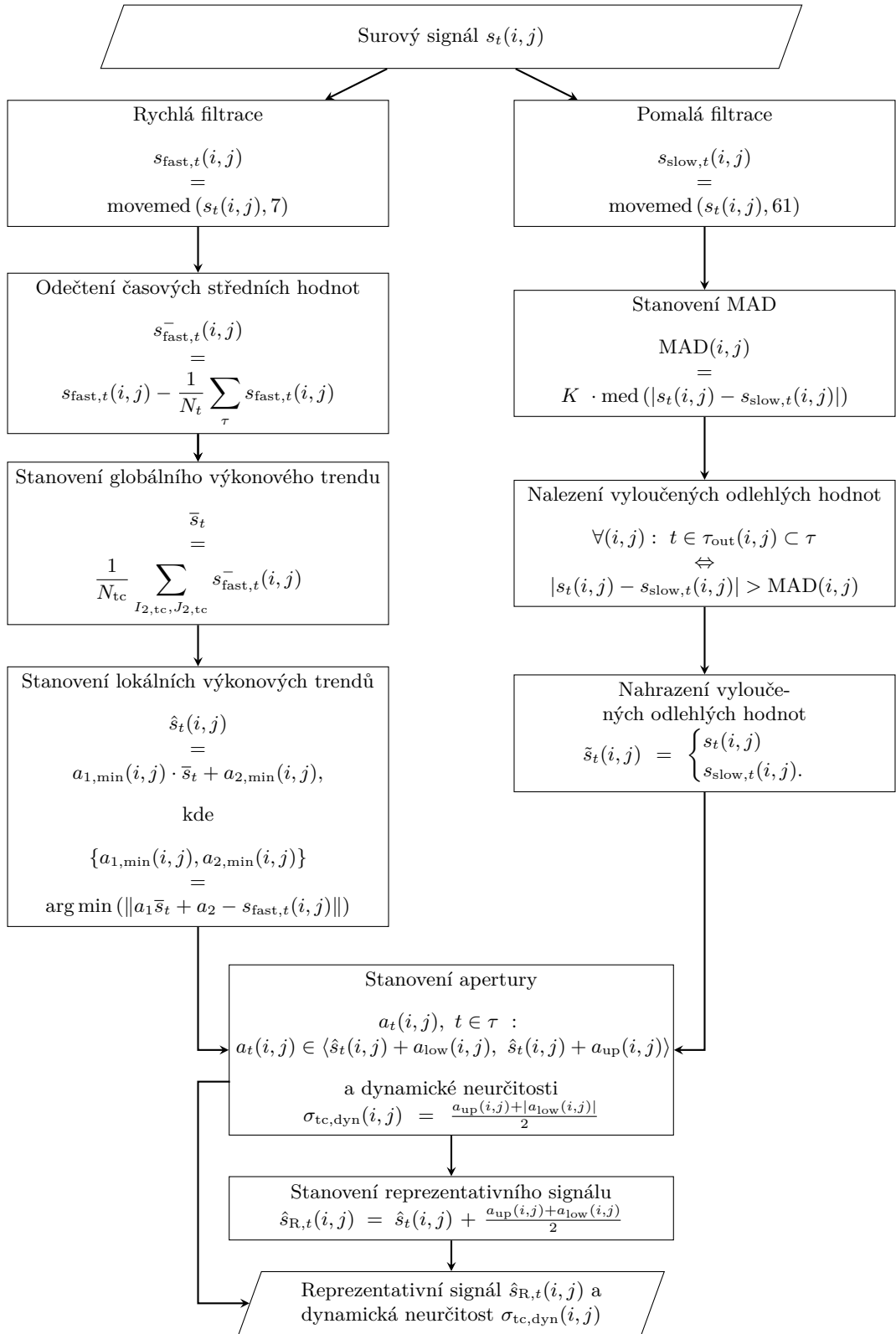
který má význam lokálního výkonového trendu posunutého do středu apertury <sup>(11)</sup>. Dynamická neurčitost  $\sigma_{\text{tc,dyn}}(i, j)$  je volena jako polovina šířky apertury:

$$\sigma_{\text{tc,dyn}}(i, j) = \frac{a_{\text{up}}(i, j) + |a_{\text{low}}(i, j)|}{2}. \quad (2.13)$$



Obrázek 2.6: Znárodnění reprezentativního signálu TC (žlutou barvou) s jeho aperturou (červená plocha), surovým signálem (modrou barvou) a lokálním výkonovým trendem (zelenou barvou) pro signál z obr. 2.1

<sup>(11)</sup>Toto přiřazení je považováno za oprávněné, protože není známo, jaká hladina teploty odpovídá střední teplotě proudu chladiva a proto, že stanovená dynamická neurčitost  $\sigma_{\text{tc,dyn}}$  je symetrickým parametrem.



Obrázek 2.7: Schéma diagnostiky signálu TC [18] [19]

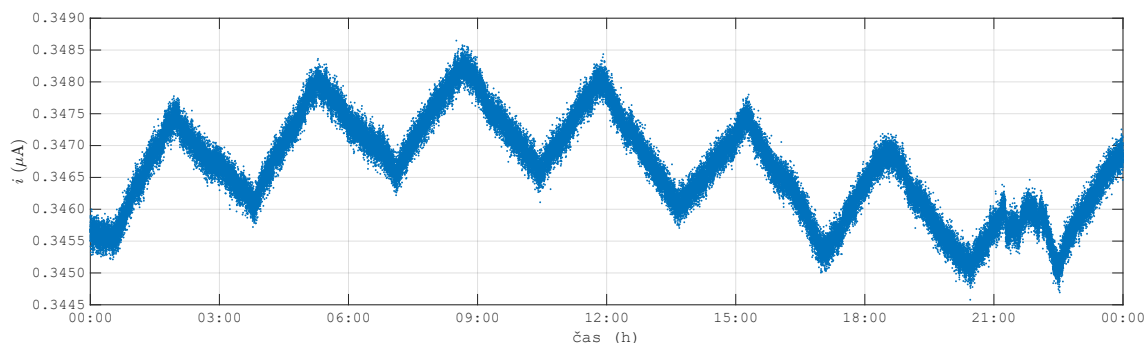
## 2.1.2 Diagnostika signálu SPND

Měření rozložení výkonu pomocí SPND je založeno na měření velikosti proudu produkovaného tímto detektorem, který je úměrný výkonu v dané části AZ. SPND jsou v případě EDU umístěny v 36 PS. V každém z těchto PS je v jeho centrální trubce rovnoměrně po výšce umístěno 7 SPND. Dále je společně se samotnými SPND v centrální trubce přítomen detektor pozadí. Na základě hodnot proudu měřených na tomto detektoru pozadí je pro každý jednotlivý SPND v daném PS provedena korekce na proud indukovaný na vodičích k těmto SPND. [23]

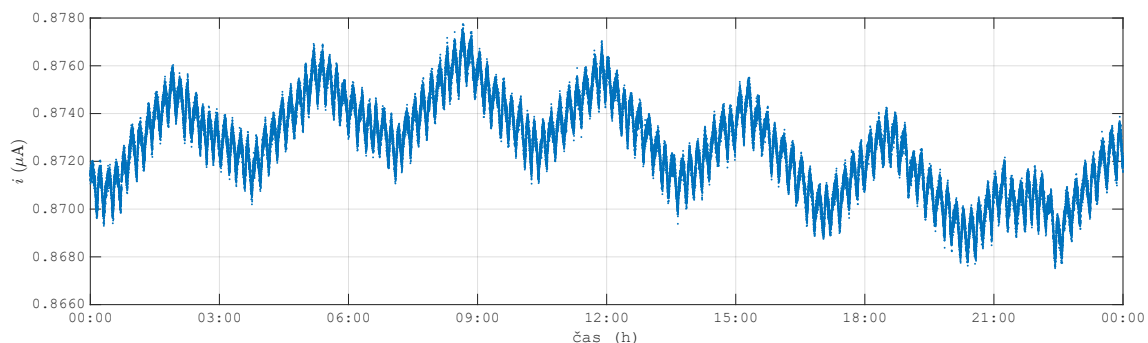
Je tedy předpokládán surový signál  $s_t(i, j, z)$  pro SPND v pozici  $(i, j, z)$  v čase  $t$  v rámci analyzované množiny časových kroků  $\tau$ , kde hodnoty signálu jsou udávány v jednotce  $\mu\text{A}$ .

V signálu SPND lze obecně identifikovat:

- základní trend signálu – stejně jako v případě signálu TC je tento trend dán řízenou netěsností chladné větve kompenzátoru objemu a spínáním elektroohříváků společně s tlakovým koeficientem reaktivity, nicméně oproti signálům TC nejsou trendy signálů SPND v rámci všech pozic v AZ dostatečně korelované,
- instrumentální šum,
- regulační zásahy,
- rychlé periodické exponenciální oscilace signálu (viz obr. 2.9) – jejich původ není v současné době dostatečně objasněný.



Obrázek 2.8: Ukázka signálu SPND



Obrázek 2.9: Ukázka signálu SPND obsahujícího rychlé periodické oscilace signálu

Diagnostika signálů SPND, znázorněná na obr. 2.11, je založena na diagnostice signálů TC popsané v kap. 2.1.1, nicméně postup je význačný několika odlišnostmi:

- je využíván pouze pomalý filtr  $s_{\text{slow},t}(i, j, z)$ ,
- okno klouzavého mediánu pomalého filtru má velikost 125 sekund,
- v případě signálů SPND nejsou známy hodnoty statické neurčitosti (tj. ekvivalent  $\sigma_{\text{tc,stat}}$  pro TC) – tedy globální neurčitosti interpretace měřeného proudu.

Poslední bod seznamu výše představuje slabé místo současného stavu určování a interpretace neurčitosti měření SPND. Tato skutečnost může způsobit, že výsledné celkové neurčitosti měření SPND jsou podhodnoceny.

## Detekce a eliminace výpadků

Stejně jako v případě diagnostiky signálů TC se i v signálu SPND mohou nacházet lokální výpadky reprezentované nečíslnými hodnotami, které jsou nahrazeny nejbližší číselnou hodnotou.

## Mediánová filtrace

Vzhledem k charakteru signálu SPND je pro jeho diagnostiku postačující stanovení pouze pomalého filtru s oknem o velikosti 125 sekund:

$$s_{\text{slow},t}(i, j, z) = \text{movemed}(s_{\text{slow},t}(i, j, z), 125). \quad (2.14)$$

Tento pomalý filtr je znázorněn na obr. 2.10.

## Stanovení výkonového trendu

V případě stanovování výkonového trendu v rámci diagnostiky signálů SPND nelze postupovat jako v případě stanovování výkonového trendu v rámci diagnostiky signálu TC (viz kap. 2.1.1). Důvodem je nesplnění jednoho z předpokladů využívaných v případě TC – signály SPND nejsou v rámci AZ korelované, čímž nedává smysl stanovování globálního výkonového trendu přes všechny pozice v AZ. Lokální výkonový trend je zjednodušeně uvažován jako shodný s pomalým filtrem:

$$\hat{s}_t(i, j, z) = s_{\text{slow},t}(i, j, z). \quad (2.15)$$

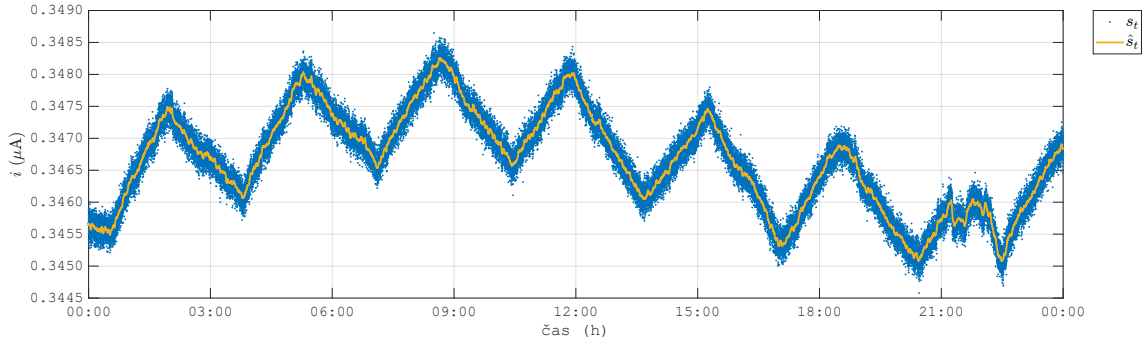
## Vyloučení vybraných odlehlých hodnot z původního signálu

Podobně jako v kap. 2.1.1 je pro vyloučení odlehlých hodnot využito mediánové absolutní odchylky. Je tedy vypočtena její hodnota podle vztahu

$$\text{MAD}(i, j, z) = K \cdot \text{med}(|s_t(i, j, z) - s_{\text{slow},t}(i, j, z)|), \quad (2.16)$$

kde  $K$  je empirická konstanta obecně různá od konstanty ve vztahu (2.8) pro případ diagnostiky signálu TC. V souladu s (2.9) je pro daný signál v pozici  $(i, j, z)$  nalezena množina vyloučených časových kroků  $\tau_{\text{out}}(i, j, z)$  pro signál v pozici  $(i, j, z)$ :

$$\forall(i, j, z) : t \in \tau_{\text{out}}(i, j, z) \subset \tau \Leftrightarrow |s_t(i, j, z) - s_{\text{slow},t}(i, j, z)| > \text{MAD}(i, j, z).$$



Obrázek 2.10: Znáornění lokálního výkonového trendu – pomalého filtru (žlutou barvou) pro surový signál SPND z obr. 2.8 (modrou barvou)

Následně je stanoven *surový signál bez vyloučených odlehlých hodnot*:

$$\tilde{s}_t(i, j, z) = \begin{cases} s_t(i, j, z) & \text{pro } t \in \tau \setminus \tau_{\text{out}}(i, j, z), \\ s_{\text{slow},t}(i, j, z) & \text{pro } t \in \tau_{\text{out}}(i, j, z). \end{cases} \quad (2.17)$$

### Určení reprezentativního signálu a neurčitostí

Podobně jako v případě TC je nejprve stanovena apertura signálu  $a_t(i, j, z)$ , která má význam pásma hodnot vymezujícího maximální a minimální odchylku lokálního výkonového trendu:

$$a_t(i, j, z), t \in \tau : a_t(i, j, z) \in \langle \hat{s}_t(i, j, z) + a_{\text{low}}(i, j, z), \hat{s}_t(i, j, z) + a_{\text{up}}(i, j, z) \rangle, \quad (2.18)$$

kde pro spodní šířku platí

$$a_{\text{low}}(i, j, z) = \min_{\tau} (\hat{s}_t(i, j, z) - \tilde{s}_t(i, j, z)) \quad (2.19)$$

a pro horní šířku platí

$$a_{\text{up}}(i, j, z) = \max_{\tau} (\hat{s}_t(i, j, z) - \tilde{s}_t(i, j, z)). \quad (2.20)$$

Na základě apertury je stanoven reprezentativní signál  $\hat{s}_{R,t}(i, j, z)$  jako lokální výkonový trend posunutý do středu apertury:

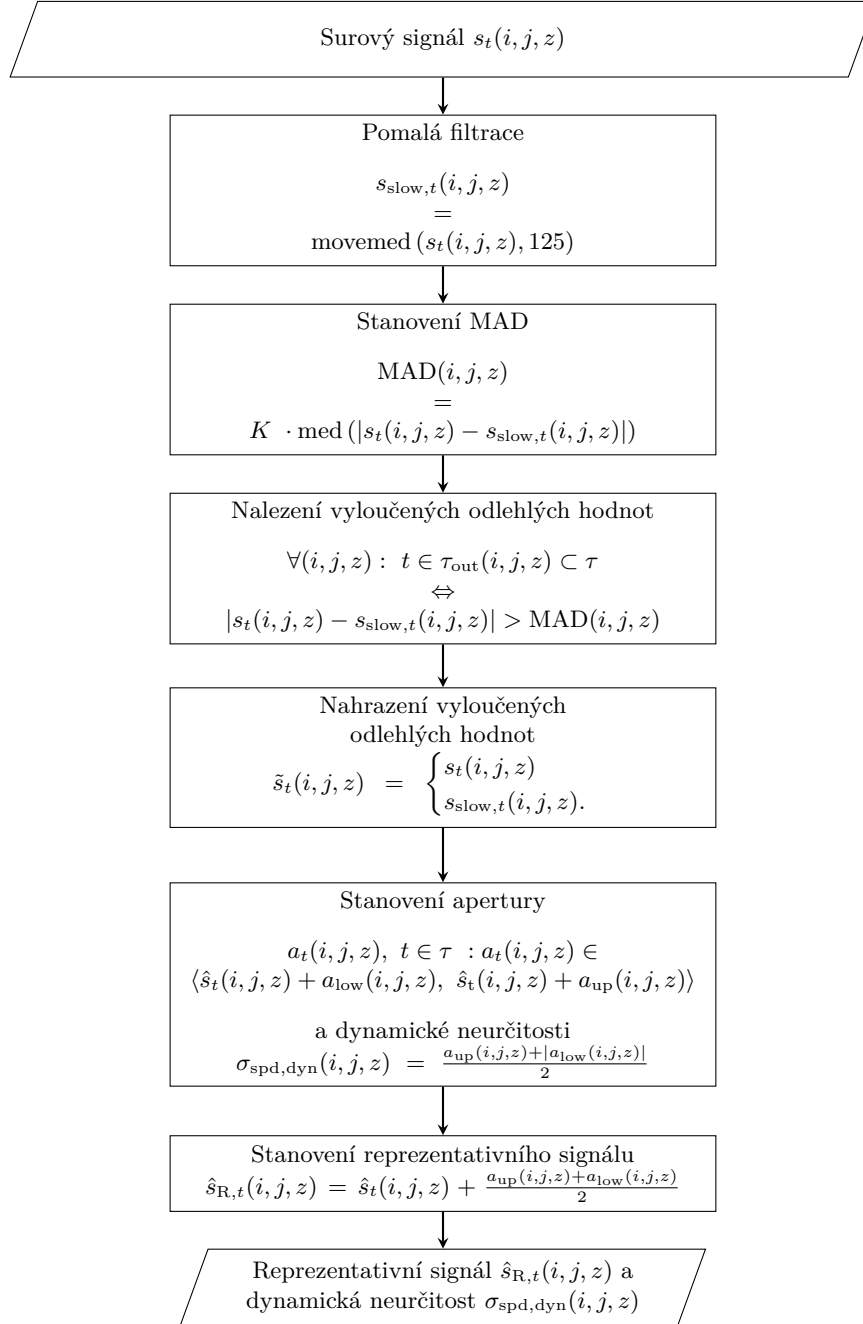
$$\hat{s}_{R,t}(i, j, z) = \hat{s}_t(i, j, z) + \frac{a_{\text{up}}(i, j, z) + a_{\text{low}}(i, j, z)}{2}. \quad (2.21)$$

Dynamická neurčitost je stejně jako v případě TC volena jako polovina šířky apertury:

$$\sigma_{\text{spd,dyn}}(i, j, z) = \frac{a_{\text{up}}(i, j, z) + |a_{\text{low}}(i, j, z)|}{2}. \quad (2.22)$$

Stejně jako v případě diagnostiky TC je toto přiřazení voleno, protože věrohodně zohledňuje skoky v historii signálu, které tak vymezují jeho neurčitost a které charakterizuje právě apertura signálu.





Obrázek 2.11: Schéma diagnostiky signálu SPND [18] [19]

## 2.2 Generování výkonových distribucí

Generování výkonových distribucí potřebných pro optimalizaci parametrů metody RBF podle kap. 1.3.2 vyžaduje výpočet *skutečných rozložení výkonu* a k nim příslušných *vypočtených rozložení výkonu*, kde nepřesnost výpočtu je simulována zavedením perturbací vstupních dat do výpočtu.

Pro generování výkonových distribucí byl použit program ANDREA [6] ve verzi 2.3.2.intel. Pro korektní zavedení perturbací vstupních dat byl nejdříve bez těchto perturbací proveden výpočet celé kampaně s generováním tzv. DUMP<sup>(12)</sup> souborů pro každý krok vyhořívání. Na tento základní výpočet je navázáno v libovolném kroku vyhořívání, kde pro tyto navazující výpočty jsou zadány perturbace vstupních dat. Vždy je přitom zadána jedna nulová perturbace a libovolné množství nenulových perturbací. Tím je pro jeden krok vyhořívání vytvořen jeden soubor s distribucemi obsahující jedno skutečné rozložení výkonu a libovolný počet vypočtených rozložení výkonu.

Data jsou z výstupních souborů programu ANDREA exportována do formátu XML a poté i do binárních MAT souborů, které jsou využity při samotných analýzách (viz dále kap. 3.1).

Uvedený postup je přitom založen na práci [5]. Pro tuto práci byl postup upraven tak, aby byla využita 3D nodální data pro 3D rekonstrukci výkonu.

Na základě zprávy [14] je perturbována poloha 6. skupiny HRK, difúzní koeficient v rychlé grupě a makroskopický účinný průřez pro absorpci v rychlé grupě. Uvedené perturbace jsou považovány za věrohodnou simulaci chyby výpočtu simulátoru AZ z následujících důvodů:

- takto zavedené chyby mají fyzikální původ, což by mělo věrohodně napodobovat charakter chyb výpočtu simulátoru AZ, které jsou obecně dány jednak neurčitostí jaderných dat a pak také nepřesností samotného simulátoru AZ (takto fyzikální původ by například neměly zcela náhodně prováděné změny hodnot v rozložení výkonu),
- perturbace difúzního koeficientu v rychlé grupě a makroskopického účinného průřezu pro absorpci způsobují značně odlišný charakter rozložení chyb vypočteného rozložení výkonu,
- míra perturbací uvedených parametrů je volena tak, že odpovídá míře neurčitosti výpočtu programu ANDREA deklarované ve kvalifikační zprávě tohoto programu [24].

Pro tuto práci byl primárně využit výpočet 30. kampaně 1. bloku EDU – převážně pro 13. krok vyhořívání. Ukazuje se, že pro dosažení distribuce chyb, která je srovnatelná s mírou chyb popsanou v [24] je možné volit perturbace – relativní změny vybraných parametrů – podle tab. 2.1. Je přitom uvažováno sestavení všech kombinací hodnot uvedených v tab. 2.1, což celkově vede na 75 různých perturbací a tedy 75 různých vypočtených rozložení výkonu náležících k jednomu skutečnému rozložení výkonu pro daný jeden krok vyhořívání.

Zpráva [24] popisuje chybu vypočteného rozložení výkonu  $i$ -tého PS ve smyslu rozdílu

$$P_{\text{calc},i} - P_{\text{monitor},i}, \quad (2.23)$$

kde  $P_{\text{calc},i}$  je výkon  $i$ -tého PS stanovený programem ANDREA a převedený na střední výkon AZ. Dále  $P_{\text{monitor},i}$  je výkon  $i$ -tého PS stanovený monitorovacím systémem a převe-

---

<sup>(12)</sup>Výstupní soubor programu ANDREA obsahující data pro opětovné spuštění a navázání výpočtu.

Tabulka 2.1: Hodnoty perturbací vstupních dat výpočtu kódem ANDREA pro simulaci vypočteného rozložení výkonu [5]

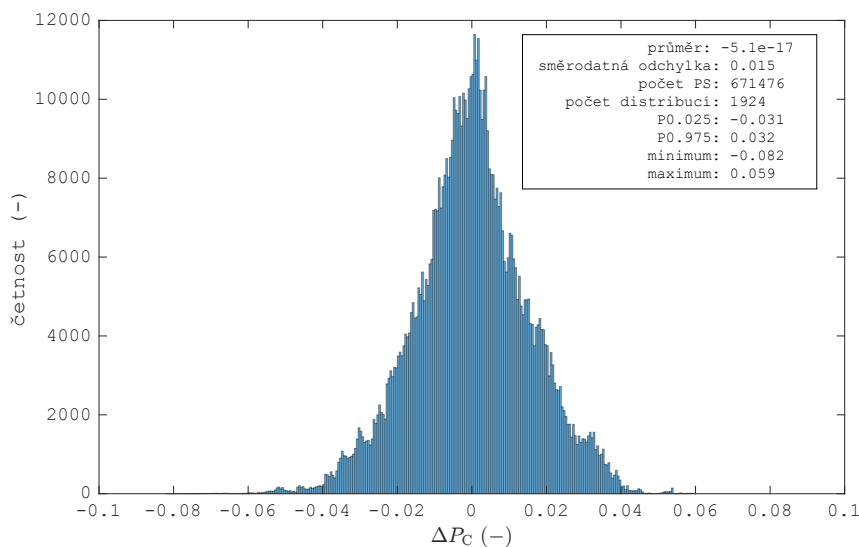
Typ perturbace	Hodnoty perturbací (zavedených chyb)
Difúzní koeficient v rychlé grupě	-7 %, -4 %, 0 %, 4%, 7 %
Makroskopický účinný průřez pro absorpci v rychlé grupě	-7 %, -4 %, 0 %, 4%, 7 %
Změna polohy 6. skupiny HRK	-12 cm, -6 cm, 0 cm

dený na střední výkon AZ. Tento přístup hodnocení kvality vypočteného rozložení výkonu zřejmě považuje rozložení výkonu stanovené monitorovacím systémem za referenční.

Pro napodobení charakteru chyb z [24] daných vztahem (2.23) je za referenční považováno skutečné rozložení výkonu a je vyhodnocována absolutní chyba vypočteného rozložení výkonu podle vztahu

$$\Delta P_C(i, j) = \frac{P_C(i, j)}{\frac{1}{N_{FA}} \sum_{I_2, J_2} P_C(i, j)} - \frac{P_{real}(i, j)}{\frac{1}{N_{FA}} \sum_{I_2, J_2} P_{real}(i, j)}. \quad (2.24)$$

Histogram chyb vypočteného rozložení výkonu ve smyslu vztahu (2.24) je vykreslen na obr. 2.12. Uvedený histogram je sestaven pro výpočet 30. kampaně 1. bloku EDU, který se skládá z 26 výpočetních kroků vyhořívání.



Obrázek 2.12: Histogram pokazetových absolutních chyb vypočteného rozložení výkonu (viz vztah (2.24)) pro výkonové distribuce určené pro analýzy v této práci

## 2.3 Modely měření vnitroreaktorové instrumentace

V souladu se schématem 1.6 jsou pro metodiku optimalizace parametrů metody RBF potřebné modely neurčitosti měření vnitroreaktorové instrumentace. Uvedené schéma ukazuje, že tyto modely jsou aplikovány na *skutečné rozložení výkonu*, čímž je získáno simulované *měřené rozložení výkonu*.

Pod pojmem *model měření* je uvažován soubor dat charakterizující jeden okamžitý stav měření vnitroreaktorové instrumentace. Vzhledem k odlišnému charakteru a výchozím údajům jsou dále zvlášť popsány modely měření TC a SPND.

### 2.3.1 Modely měření TC

V případě TC jsou součástí modelu měření následující údaje:

- indexy  $(i, j)$  všech PS v AZ a čísla radiálních řad od periferie, ve kterých se nachází,
- logická hodnota značící přítomnost nebo nepřítomnost TC v jednotlivých PS,
- stav TC (funkční, nebo nefunkční),
- charakter TC – skákající, nebo neskákající (viz popis signálu TC v kap. 2.1.1),
- hodnoty  $\sigma_{tc,dyn}(i, j)$ ,  $\sigma_{tc,stat}$  a  $\sigma_{tc,tot}(i, j)$  (viz kap. 2.1.1 a 1.3.1),
- hodnota chyby měřeného rozložení výkonu  $\Delta T_{error}(i, j)$ .

Generování modelů měření TC je přitom prováděno v souladu se schématem na obr. 2.13 pomocí součástí frameworku popsaného dále v kap. 3.1. Vstupním údajem jsou data o pozicích TC v AZ a uživatelem zadané pravděpodobnosti charakteru TC (viz hodnoty uvažované pro tuto práci v tab. 2.2). Na základě těchto pravděpodobností je pro každý TC rozhodnuto, zda bude funkční či nefunkční, dále skákající či neskákající. Poté je s uniformní distribucí danou rozsahy podle tab. 2.3 provedeno přiřazení hodnot  $\sigma_{tc,dyn}(i, j)$ , je vypočtena hodnota  $\sigma_{tc,tot}(i, j)$  (viz tab. 1.2) a s normální hustotou pravděpodobnosti danou parametry  $\mu = 0$  a  $\sigma = \sigma_{tc,tot}(i, j)$  je generována chyba měření TC  $\Delta T_{error}(i, j)$ .

Tabulka 2.2: Zadané pravděpodobnosti charakteru TC v závislosti PS na radiální řadě od periferie v AZ [5] [19]

Radiální řada	Pravděpodobnost selhání TC (–)	Pravděpodobnost skákajícího charakteru TC (–)
1.	0,075	0,15
2.	0,075	0,15
3.	0,075	0,15
4.	0,075	0,10
5.	0,075	0,05
6.	0,075	0,05
7.	0,075	0,05
8.	0,075	0,05
9.	0,075	0,05
10.	0,075	0,05

Při aplikaci modelu měření TC na skutečné rozložení výkonu (viz schéma na obr. 1.6) je nejprve na základě skutečného ohřevu  $\Delta T_{real}(i, j)$  stanoveného programem ANDREA a na základě chyby měřeného ohřevu  $\Delta T_{error}(i, j)$  daného modelem měření TC stanoven měřený

Tabulka 2.3: Zadané rozsahy parametrů pro generování modelů měření TC [5] [19] – pro hodnoty dynamické neurčitosti jsou dány intervaly uniformní hustoty pravděpodobnosti a statická neurčitost  $\sigma_{tc,stat}$  je vždy rovna stejné hodnotě

Parametr	Hodnota (°C)
Rozsah dynamické neurčitosti $\sigma_{tc,dyn}$ pro skákající TC	$\langle 0,5; 1,5 \rangle$
Rozsah dynamické neurčitosti $\sigma_{tc,dyn}$ pro neskákající TC	$\langle 0,05; 0,25 \rangle$
Statická neurčitost $\sigma_{tc,stat}$	0,9

ohřev  $\Delta T_M(i, j)$  vztahem

$$\Delta T_M(i, j) = \Delta T_{real}(i, j) + \Delta T_{error}(i, j). \quad (2.25)$$

Následně je proveden převod měřeného ohřevu na watty podle vztahu

$$P_{M,tc}(i, j) = P_{real}(i, j) \cdot \left( 1 + \frac{\Delta T_{error}(i, j)}{\Delta T_M(i, j)} \right). \quad (2.26)$$

Obdobně je provedeno převedení celkové neurčitosti měření TC  $\sigma_{tc,tot}$  na jednotky wattů. V rámci modelu měření TC jsou používány jednotky stupňů Celsia, jelikož se jedná o jednotku, ve které je dán signál TC. K převodu na watty dochází až při aplikaci modelu měření TC na skutečné rozložení výkonu podle vztahu (2.26). Použití jednotky watt je zvoleno pro sjednocení rekonstrukcí výkonu na základě měření SPND, kde jsou výchozí údaje k dispozici v bezrozměrné podobě a rovněž je proveden převod od wattů (viz dále kap. 2.3.2).

Pro účely optimalizace parametrů metody RBF v této práci byl generován soubor 75 modelů měření TC. Pro generování tohoto souboru měření TC byly nastaveny pravděpodobnosti charakteru TC podle tab. 2.2 a rozsahy neurčitostí podle tab. 2.3. Charakteristiky vygenerovaných modelů měření TC jsou prostřednictvím histogramů hodnot  $\sigma_{tc,tot}$  a  $\Delta T_{error}$  znázorněny na obr. 2.14.

### 2.3.2 Modely měření SPND

Součástí modelů měření SPND jsou následující údaje:

- indexy  $(i, j)$  těch PS v AZ, které jsou instrumentovány SPND a značky radiální řady od periferie,
- pole axiálních pozic SPND v centimetrech vztažené k počátku palivového sloupce,
- pole stavů SPND po výšce jednotlivých řetězců SPND (funkční, nebo nefunkční),
- pole hodnot  $\sigma_{spd,tot}(i, j, z)$  po výšce jednotlivých řetězců SPND,
- pole hodnot relativních chyb měření SPND  $i_{error,rel}(i, j, z)$ .

Schéma generování modelů měření SPND je předmětem obr. 2.15 – vstupním údajem pro generování jsou data o pozicích SPND v AZ a uživatelem zadané pravděpodobnosti charakteru SPND (pravděpodobnost selhání SPND je uvažována jako 15 % a nezávisle na pozici v AZ a hustota pravděpodobnosti pro generování  $\sigma_{spd,dyn}(i, j, z)$  je uvedena v tab. 2.4). Pro každý SPND je tak rozhodnuto, zda bude funkční či nefunkční a jaká bude příslušná hodnota  $\sigma_{spd,dyn}(i, j, z)$  na základě uvedené hustoty pravděpodobnosti. S normální hustotou pravděpodobnosti danou parametry  $\mu = 0$  a  $\sigma = \sigma_{spd,tot}(i, j, z) = \sigma_{spd,dyn}(i, j, z)$  je generována relativní chyba měřeného proudu  $i_{error,rel}(i, j, z)$ .

Hustota pravděpodobnosti hodnot  $\sigma_{\text{spd,dyn}}$  byla pro tuto práci poskytnuta v bezrozměrné podobě vztažené na střední hodnotu měřeného proudu – viz tab. 2.4.

Pro účely této práce bylo stejně jako v případě TC generováno 75 modelů měření SPND, které jsou prostřednictvím histogramů hodnot  $\sigma_{\text{spd,tot}}$  a  $i_{\text{error,rel}}$  charakterizovány na obr. 2.16.

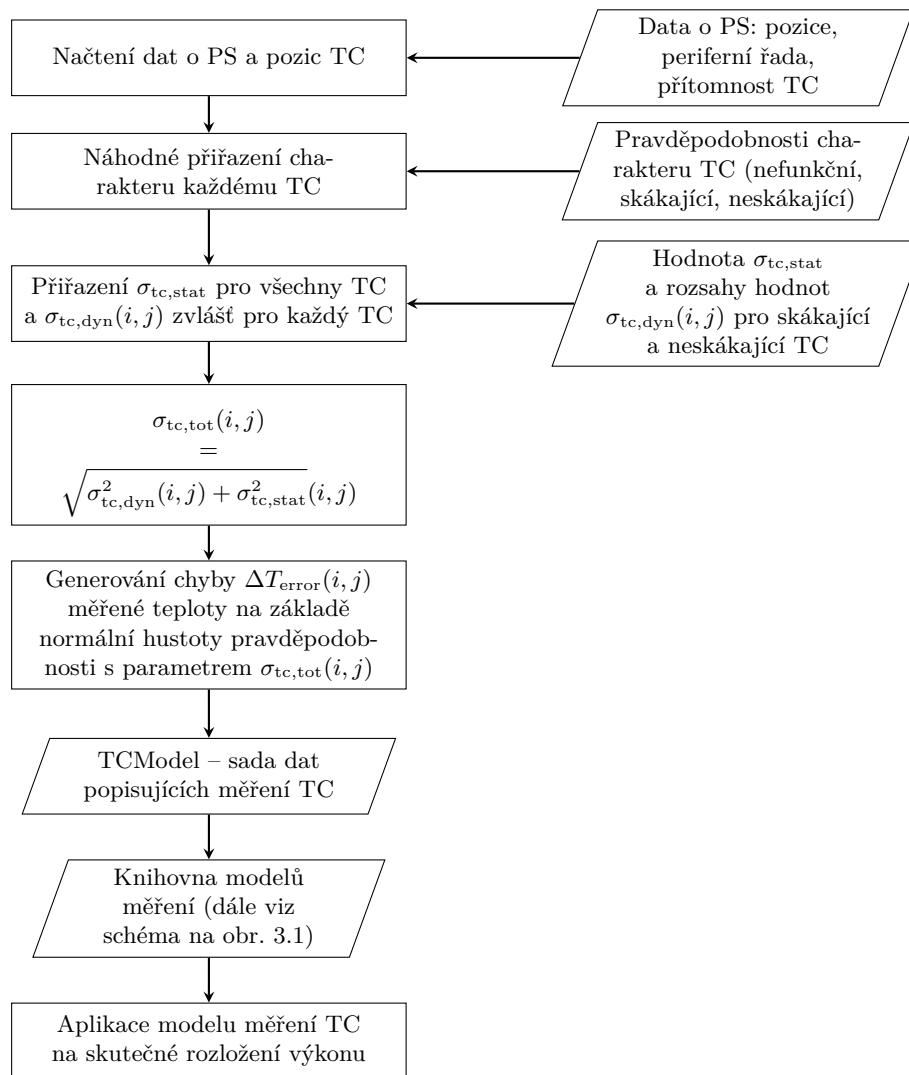
Pro instrumentované pozice s funkčním měřením, které jsou určeny daty modelu měření SPND, je v rámci samotné rekonstrukce výkonu stanoveno měřené rozložení výkonu  $P_{\text{M,spd}}(i, j, z)$  na základě skutečného rozložení výkonu  $P_{\text{real}}(i, j, z)$  a relativních chyb měření  $i_{\text{error,rel}}(i, j, z)$  podle vztahu

$$P_{\text{M,spd}}(i, j, z) = P_{\text{real}}(i, j, z) \cdot (1 + i_{\text{error,rel}}(i, j, z)). \quad (2.27)$$

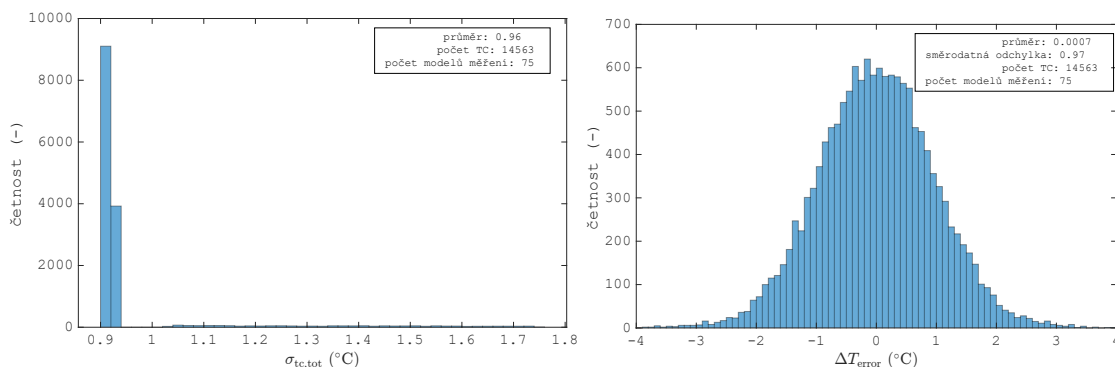
Obdobným způsobem je proveden převod celkové neurčitosti měření  $\sigma_{\text{spd,tot}}$  na jednotky wattů.

Tabulka 2.4: Hustota pravděpodobnosti hodnot dynamické neurčitosti měření SPND  $\sigma_{\text{spd,dyn}}$

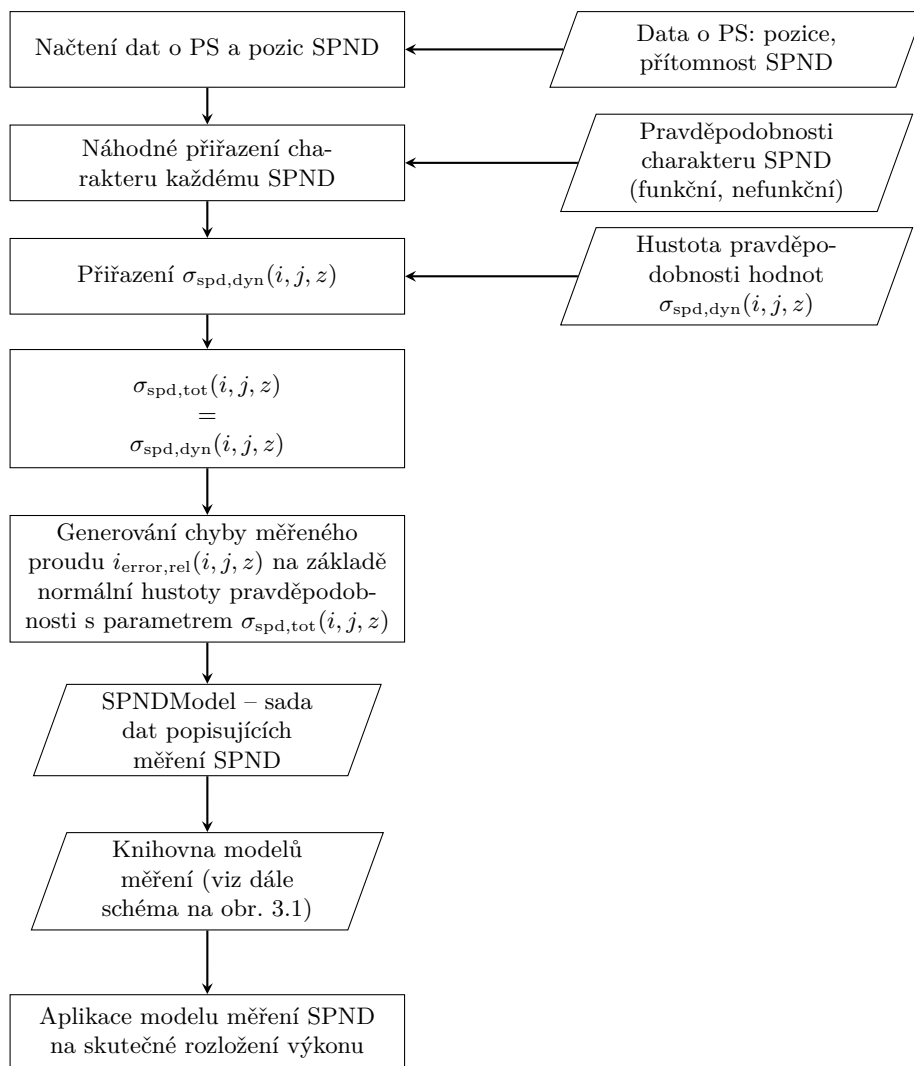
$\sigma_{\text{spd,dyn}} (-)$	Četnost $(-)$
(0,0005; 0,0015)	0,7
(0,0015; 0,0025)	0,1
(0,0025; 0,0035)	0,1
(0,0035; 0,0045)	0,05
(0,0045; 0,0065)	0,02
(0,0065; 0,008)	0,01
(0,008; 0,05)	0,02



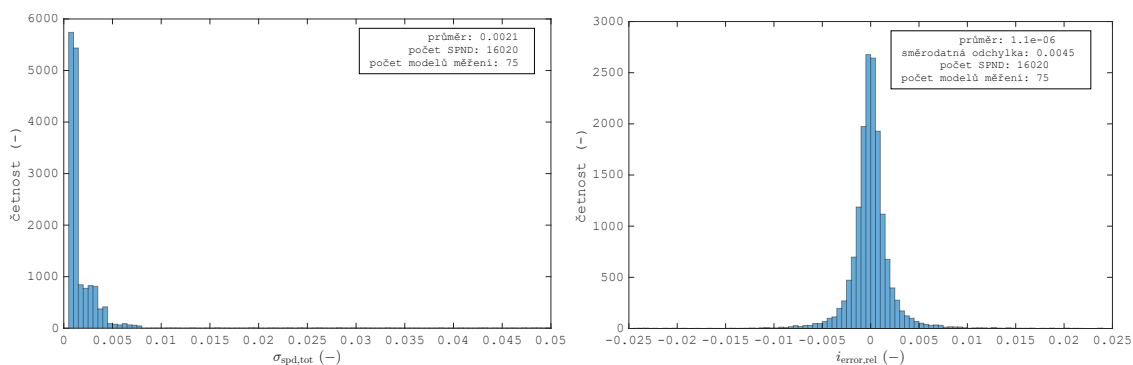
Obrázek 2.13: Schéma generování modelu měření TC [5]



Obrázek 2.14: Histogram hodnot celkové neurčitosti měření TC  $\sigma_{tc,tot}$  (vlevo) a histogram chyb měřených ohřevů  $\Delta T_{error}$  (vpravo) pro soubor 75 modelů měření TC použitých pro analýzy v této práci



Obrázek 2.15: Schéma generování modelu měření SPND



Obrázek 2.16: Histogram hodnot celkové neurčitosti měření SPND  $\sigma_{\text{spd,tot}}$  (vlevo) a histogram relativních chyb měřeného proudu  $i_{\text{error,rel}}$  (vpravo) pro soubor 75 modelů měření SPND použitých pro analýzy v této práci



## Kapitola 3

# Optimalizace parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu

V kap. 1.3.1 je popsán vliv parametrů metody RBF na rekonstrukci výkonu. Následně kap. 1.3.4 jako parametry k optimalizaci určuje typ radiální bázové funkce, konstantu  $C$  a škálovací parametr neurčitosti měření  $\alpha$ .

Cílem optimalizace parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu je na základě metodiky (viz kap. 1.3.2), metrik (viz kap. 1.3.3) a v souladu s plánem v kap. 1.3.4 realizovat a vyhodnotit výpočty pro stanovení optimálních parametrů metody RBF. V souladu s uvedeným plánem jsou tak následující kapitoly 3.2 až 3.4 věnovány jednotlivým typům rekonstrukce výkonu. Uvedené analýzy přitom byly realizovány pomocí frameworku speciálně vytvořeného pro tuto práci, který je popsán v kap. 3.1.

### 3.1 Framework pro parametrické studie a optimalizaci parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu

Pro realizaci výpočtů pro optimalizaci parametrů metody RBF byl pro účely této práce naprogramován samostatný framework v prostředí Matlab ve verzi 2020b. Konstrukce vychází z práce [5], nicméně pro účely provádění všech tří typů rekonstrukce výkonu (viz kap. 1.2) byla provedena kompletní reimplementace.

Základ frameworku tvoří funkce pro realizaci samotné aproximace metodou RBF, které jsou založené na řešení [25]. Vytvořený kód se sestává z:

- šesti samostatných aplikací s grafických uživatelským rozhraním,
- šablon pro automatické generování výstupních reportů jednotlivých analýz,
- konfiguračních souborů, které definují rozsahy hodnot  $\alpha$  a  $C$  k analýzám jednotlivých typů rekonstrukce výkonu zvláště pro různé typy radiálních bázových funkcí,
- konfiguračního souboru obsahujícího stanovené optimální parametry metody RBF (viz dále tab. 3.6), se kterými jsou provedeny výpočty alternativních metrik (viz dále kap. 4),
- 48 funkcí které slouží výpočtům jednotlivých metrik pro optimalizaci (viz kap. 1.3.3), automatickou tvorbu reportů analýz, vybavování konfiguračních dat, vizualizaci metrik, načítání vstupních dat, vyčíslování alternativních metrik (viz dále kap. 4), atd.

Samostatnou větev frameworku tvoří moduly pro generování modelů měření TC a SPND (viz kap. 2.3). Dále pak modul generování výkonových distribucí programem ANDREA podle kap. 2.2, který byl naprogramován v jazyce Ruby.

Vývoj frameworku byl přitom realizován za pomoci verzovacího nástroje Git a webové služby GitHub.

Význačným aspektem této reimplementace byla pokročilá práce se vstupními daty pro rekonstrukci výkonu, jelikož oproti práci [5] přibyla nutnost rychle a efektivně pracovat s dlouhými poli popisujícími veličiny pro všechny nody v AZ.

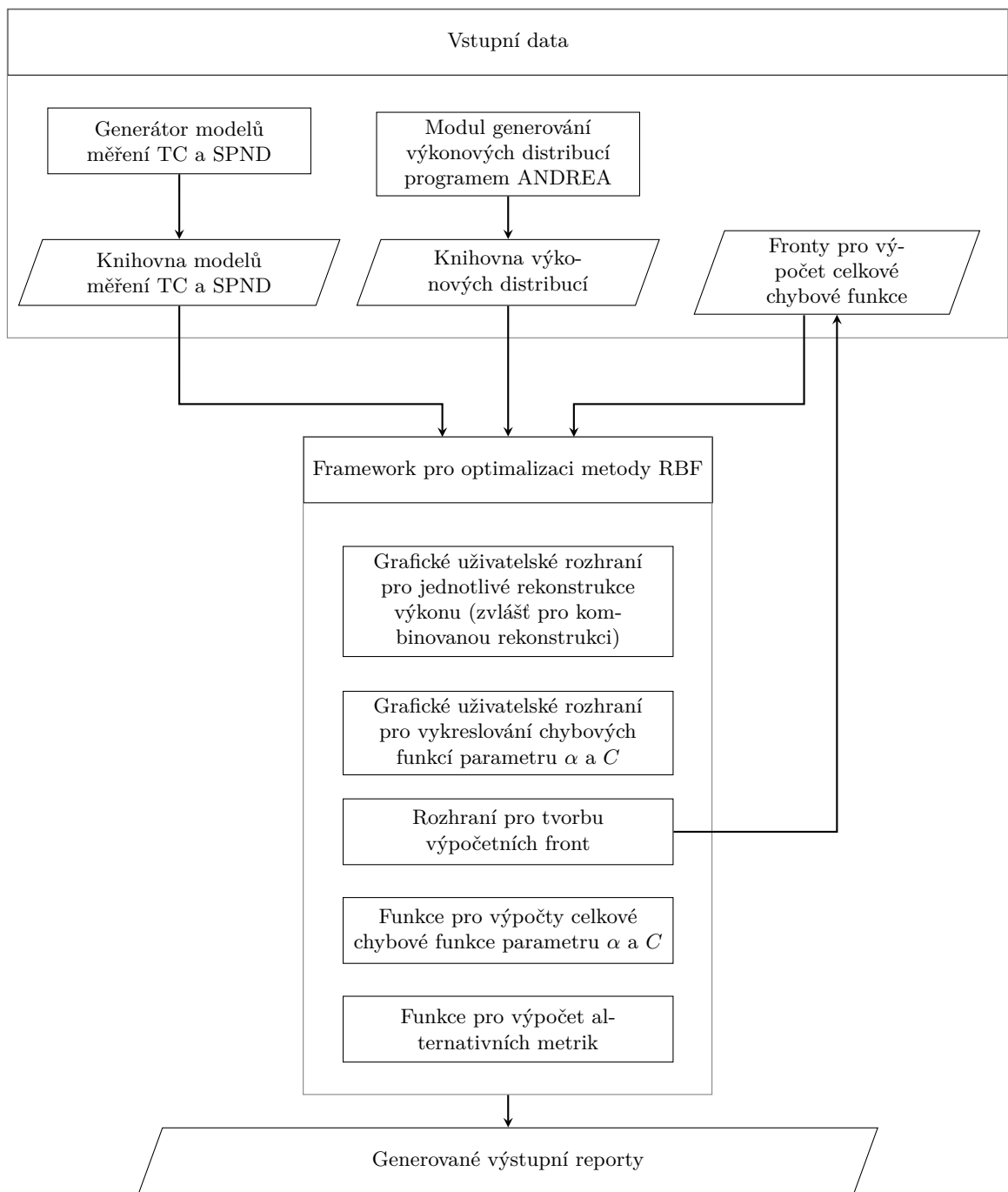
Nejdůležitější funkce uvedeného frameworku lze shrnout do následujících bodů:

- provádění jednotlivých rekonstrukcí výkonů v grafickém uživatelském rozhraní se zobrazením charakteristik vstupních dat, map vstupních rozložení výkonu a map rekonstruovaných rozložení výkonů a příslušných chyb,
- provádění výpočtů chybové funkce parametru  $\alpha$ , resp.  $\alpha$  a  $C$  pro zvolenou jednu kombinaci vstupních dat v grafickém uživatelském rozhraní,
- tvorba fronty pro výpočet celkové chybové funkce parametru  $\alpha$ , resp.  $\alpha$  a  $C$  pro zvolené soubory vstupních dat pomocí grafického uživatelského rozhraní s možností následného zadání výpočtu na vzdálený server.

Důležitou vlastností frameworku je jeho modularita ve smyslu volby vstupních dat. Tedy že vstupní data jsou generována nezávisle na samotném výpočtu pro optimalizaci – viz schéma na obr. 3.1. Lze tak vytvářet vstupní data různého charakteru a zkoumat charakter metrik v závislosti na různých vstupních datech. Uvedené modulární řešení rovněž zajišťuje reprodukovatelnost výpočtů.

V případě výkonových distribucí jsou data z výpočtu programem ANDREA nejprve exportována do uživatelsky čitelného XML souboru a až následně do binárního MAT souboru – při splnění formátu dat v XML tak lze využít i zcela odlišný program pro výpočet *skutečných* a *vypočtených* rozložení výkonu.

Pro optimalizaci byla využita simulovaná vstupní data v souladu s kap. 2.3.2 – 75 modelů měření TC podle kap. 2.3.1, 75 modelů měření SPND podle kap. 2.3.2 a dále 75 vypočtených rozložení výkonu popsanych v kap. 2.2. Pro výpočty tak bylo využíváno 5625 kombinací vstupních dat. Výjimku tvoří výpočty kombinované rekonstrukce výkonu (viz dále kap. 3.4), kde vzhledem ke způsobu využití vstupních dat bylo využito 8 modelů měření TC a 8 modelů měření SPND společně s původní sadou 75 vypočtených rozložení výkonu. Tato konfigurace vedla na 4800 různých kombinací vstupních dat.



Obrázek 3.1: Schéma toku dat frameworku pro optimalizaci parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu

## 3.2 Optimalizace parametrů metody RBF pro 2D rekonstrukci výkonu na základě měření TC

Cílem této části výpočtů bylo ověřit novou implementaci metodiky optimalizace parametrů metody RBF – tedy ověřit, zda budou stanovené výsledky mít charakter shodný s [5]. Dalším cílem bylo stanovení optimálních hodnot parametru  $\alpha$  v souvislosti se změnou jednotky neurčitosti měření – tedy wattů místo stupňů Celsia.

### 3.2.1 Určení optimálních hodnot parametru $\alpha$ , $C$ a typu funkce

Pro nalezení optimálních hodnot parametrů  $\alpha$  a  $C$  pro rekonstrukci výkonu na základě měření TC byly pro všechny typy funkcí a všechny tvary tolerančního faktoru provedeny výpočty pro stanovení celkových chybových funkcí parametru  $\alpha$ , resp.  $\alpha$  a  $C$ . Výsledky těchto výpočtů jsou uvedeny v tab. 3.1. Pro lineární funkci a toleranční faktor dělený výkonem jsou prostřednictvím celkové chybové funkce parametru  $\alpha$  znázorněny na obr. 3.2. Pro funkci inverzní multikvadrata a toleranční faktor dělený výkonem jsou výsledky prostřednictvím celkové chybové funkce parametrů  $\alpha$  a  $C$  znázorněny na obr. 3.3. Chyby rekonstruovaného rozložení výkonu byly v tomto případě hodnoceny na pokazetové úrovni v souladu se vztahem (1.31).

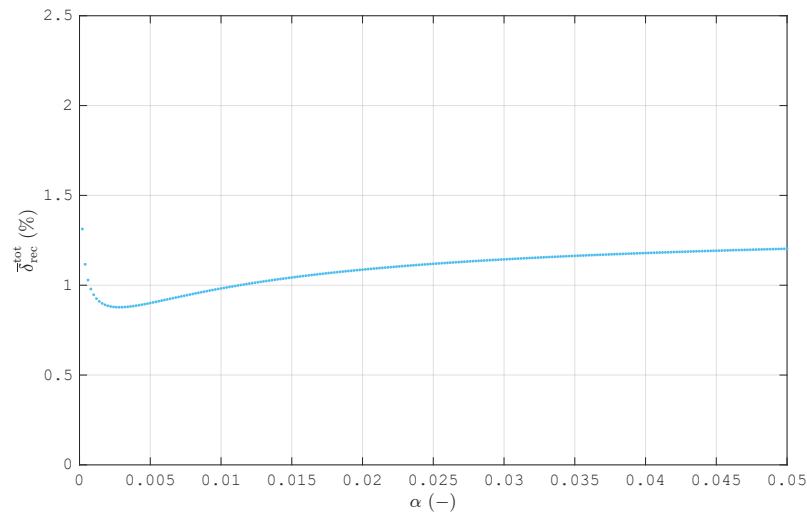
Tabulka 3.1: Nalezené optimální hodnoty parametrů  $\alpha$  a  $C$  společně s celkovými minimálními průměrnými velikostmi chyby rekonstruovaného rozložení výkonu pro jednotlivé typy funkcí a tvary tolerančního faktoru – 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC, hodnoceno pokazetově

Typ funkce	Tvar tolerančního faktoru	$\alpha_{\min}^{\text{tot}}$ (-)	$C_{\min}^{\text{tot}}$ (-)	$\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$ (%)
lineární	konstantní	0,0036	–	1,140
	normální	0,0036	–	1,142
	dělený výkonem	0,0028	–	0,877
kubická	konstantní	140	–	1,190
	normální	145	–	1,195
	dělený výkonem	75	–	0,884
gaussovská	konstantní	$5,0 \cdot 10^{-5}$	55	1,150
	normální	$5,2 \cdot 10^{-5}$	50	1,152
	dělený výkonem	$2,2 \cdot 10^{-5}$	80	0,877
multikvadrata	konstantní	$3,52 \cdot 10^{-4}$	10	1,140
	normální	$3,52 \cdot 10^{-4}$	10	1,143
	dělený výkonem	$4,6 \cdot 10^{-5}$	40	0,873
inverzní multikvadrata	konstantní	$2,8 \cdot 10^{-5}$	55	1,142
	normální	$2,8 \cdot 10^{-5}$	50	1,143
	dělený výkonem	$8,0 \cdot 10^{-6}$	120	0,875
tenkostěnný spline	konstantní	0,74	–	1,157
	normální	0,74	–	1,161
	dělený výkonem	0,5	–	0,872

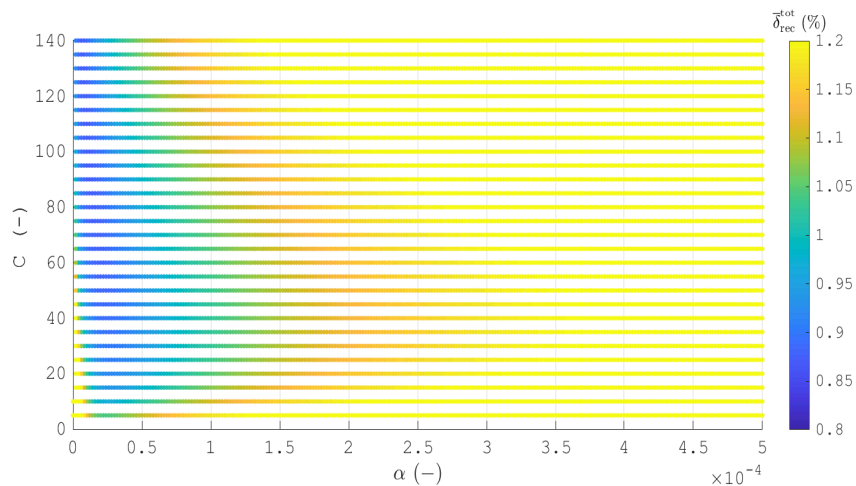
Z výsledků uvedených v tab. 3.1 vyplývá následující:

- ve shodě s [5] z hodnot  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$  vyplývá, že jako optimální se jeví toleranční faktor značený jako *dělený výkonem*,

- hodnoty  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$  indikují, že *konstantní* toleranční faktor je mírně vhodnější než *normální* – jedná se o opačné zjištění oproti [5], které může být způsobeno následujícími faktory:
  - relativně nízkým rozdílem hodnot  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$  mezi normálním a konstantním tolerančním faktorem,
  - odlišným způsobem zpracování chyb a neurčitostí oproti [5],
  - použitím odlišných modelů měření TC, přestože byly generovány se stejným nastavením statistických charakteristik,
  - použitím mírně odlišných vypočtených rozložení výkonu,
- rozdíl mezi jednotlivými typy funkcí je při volbě tolerančního faktoru s označením *dělený výkonem* relativně malý.



Obrázek 3.2: Celková chybová funkce parametru  $\alpha$  pro lineární funkci a toleranční faktor dělený výkonem,  $\alpha_{\text{min}}^{\text{tot}} = 0,0028$ ,  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}} = 0,877$  %



Obrázek 3.3: Celková chybová funkce parametrů  $\alpha$  a  $C$  pro funkci inverzní multikvadrika a toleranční faktor dělený výkonem,  $\alpha_{\text{min}}^{\text{tot}} = 8,0 \cdot 10^{-6}$ ,  $C_{\text{min}}^{\text{tot}} = 120$ ,  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}} = 0,875$  %

Z výsledků vykreslených na obr. 3.2 lze pozorovat podobný charakter chybové funkce jako v [5].

Z výsledků vykreslených na obr. 3.3 lze ve shodě se závěry uvedenými v [5] pozorovat relativně malou citlivost věrohodnosti rekonstrukce výkonu na hodnotu konstanty  $C$ .<sup>(13)</sup>

Dále lze z obr. 3.3 pozorovat, že s rostoucí hodnotou konstanty  $C$  klesá optimální hodnota parametru  $\alpha$ . Tento jev byl pozorován u všech typů funkcí.

### 3.3 Optimalizace parametrů metody RBF pro 3D rekonstrukci výkonu na základě měření SPND

#### 3.3.1 Charakter chybové funkce parametru $\alpha$ a $C$

V případě vyhodnocování chybové funkce parametru  $\alpha$  a  $C$  pro 3D rekonstrukci výkonu na základě měření SPND se ukazuje, že minimum této funkce je lokalizované výrazně blíže nuly než v případě 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC (viz obr. 3.2). Výpočty jsou proto zaměřeny na tuto oblast blízko nuly (viz obr. 3.4 dole) a nikoliv na oblast, která zachycuje globální trend této závislosti (viz obr. 3.4 nahoře). Podobný trend byl pozorován i pro chybovou funkci parametrů  $\alpha$  a  $C$ .

Tento odlišný charakter této závislosti je pravděpodobně způsoben nižší mírou simulované neurčitosti měření SPND oproti neurčitosti měření TC (viz kap. 2.3).

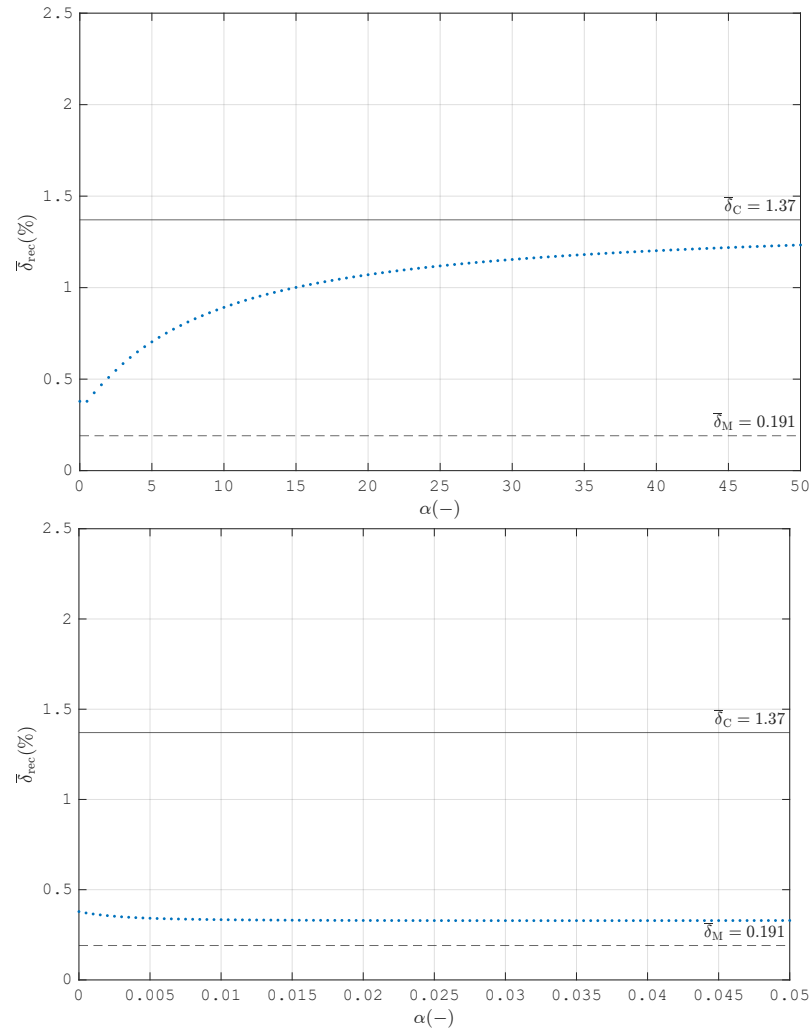
#### 3.3.2 Určení optimálních hodnot parametru $\alpha$ , $C$ a typu funkce

Pro určení optimálních hodnot parametrů  $\alpha$  a  $C$  pro 3D rekonstrukci výkonu na základě měření SPND byly realizovány výpočty pro stanovení celkové chybové funkce těchto parametrů. Chyba rekonstruovaného rozložení výkonu byla vyhodnocována na nodální úrovni (viz vztah (1.32)). Výsledky těchto výpočtů jsou uvedeny v tab. 3.2. Z těchto výsledků lze pozorovat:

- na základě hodnot  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$  se pro všechny typy funkcí jako nevhodnější ukazuje tvar tolerančního faktoru s označením *dělený výkonem*,
- rozdíly mezi hodnotami  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$  pro jednotlivé tvary tolerančního faktoru jsou relativně malé (tj. v porovnání s 2D rekonstrukcí výkonu na základě měření TC – viz tab. 3.1) – možnou příčinou je relativně nízká míra neurčitosti měření SPND,
- rozdíl mezi jednotlivými typy funkcí ve smyslu metriky  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$  se ukazuje být jako relativně malý, nejlepších výsledků je dosaženo použitím funkce *tenkostěnný splíne*.

V případě gaussovské funkce se ukazuje, že pro hodnoty  $\alpha = 0$  a přibližně  $C > 30$  se aproximace stává nestabilní – to je pozorováno výrazným nárůstem hodnot  $\bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}}$  a oscilacemi interpolačního faktoru v prostoru AZ. Na základě tohoto pozorování bylo rozhodnuto vyloučit tuto funkci pro výběr optimální funkce pro 3D rekonstrukci výkonu na základě měření SPND.

<sup>(13)</sup>V práci [5] byla pomocí odlišného přístupu určena optimální hodnota konstanty  $C$  jako  $C_{\text{min}}^{\text{tot}} = 30$ , kdežto v případě analýzy příslušející obr. 3.3 byla tato hodnota určena jako  $C_{\text{min}}^{\text{tot}} = 120$ . Tento výsledek není považován za významný rozpor s [5] i proto, že pro výpočet znázorněný na obr. 3.3 lze pro  $C = 30$  dosáhnout hodnoty  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}} = 0,900$  %, což není považováno za významný rozdíl oproti  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}} = 0,875$  % z obr. 3.3 pro  $C = 120$ .



Obrázek 3.4: Ukázka chybové funkce parametru  $\alpha$  – 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND pro lineární funkci pro rozsah hodnot  $\alpha$  zachycující globální trend závislosti (nahore) a pro rozsah hodnot  $\alpha$  zachycující oblast minima této závislosti (dole),  $\alpha_{\min} = 0,033$ ,  $\bar{\delta}_{\text{rec},\min} = 0,32\%$

### 3.4 Optimalizace parametrů metody RBF pro kombinovanou rekonstrukci výkonu

V souladu s plánem optimalizace parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu ve třetí části kap. 1.3.4 a definicí kombinované rekonstrukce výkonu uvedené v kap. 1.2.3 se tato kapitola věnuje výsledkům výpočtů optimalizace parametrů pro tento typ rekonstrukce výkonu. Optimalizace je (v souladu s třetí částí kap. 1.3.4) dělena do tří dílčích částí:

- optimalizace parametrů metody RBF pro 3D interpolační rekonstrukci výkonu na základě měření SPND – viz dále kap. 3.4.1,
- optimalizace parametrů metody RBF pro 2D rekonstrukci výkonu na základě rozšířené 2D mapy měření TC a SPND – viz dále kap. 3.4.2,
- optimalizace parametrů metody RBF pro 3D aproximační rekonstrukci výkonu na základě měření SPND – ta byla řešena v kap. 3.3.

Tabulka 3.2: Nalezené optimální hodnoty parametrů  $\alpha$  a  $C$  společně s celkovými minimálními průměrnými velikostmi chyby rekonstruovaného rozložení výkonu pro jednotlivé typy funkcí a tvary tolerančního faktoru – 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND, hodnoceno nodálně

Typ funkce	Tvar tolerančního faktoru	$\alpha_{\min}^{\text{tot}}$ (-)	$C_{\min}^{\text{tot}}$ (-)	$\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$ (%)
lineární	konstantní	0,0005	–	0,780
	normální	0,0145	–	0,766
	dělený výkonem	0,015	–	0,765
kubická	konstantní	380	–	0,776
	normální	380	–	0,763
	dělený výkonem	430	–	0,760
gaussovská	konstantní	$2,5 \cdot 10^{-6}$	170	0,783
	normální	$2,5 \cdot 10^{-6}$	185	0,776
	dělený výkonem	$2,5 \cdot 10^{-6}$	185	0,772
multikvadrík	konstantní	0.0004	50	0,780
	normální	0,0013	20	0,761
	dělený výkonem	0,0013	20	0,759
inverzní multikvadrík	konstantní	$7 \cdot 10^{-5}$	125	0,787
	normální	$1,15 \cdot 10^{-4}$	110	0,776
	dělený výkonem	$1,2 \cdot 10^{-4}$	110	0,773
tenkostěnný spline	konstantní	4,3	–	0,770
	normální	3,9	–	0,753
	dělený výkonem	4,2	–	0,750

### 3.4.1 Optimalizace parametrů metody RBF pro 3D interpolační rekonstrukci výkonu na základě měření SPND

Pro optimalizaci parametrů metody RBF pro 3D interpolační rekonstrukci výkonu na základě měření SPND je dáno, že hodnota parametru  $\alpha$  má být rovna nule – tento požadavek zaručuje, že rekonstruované rozložení výkonu je blízké měřenému rozložení výkonu (viz kap. 1.2.3). Parametrem k optimalizaci tak je typ radiální bázové funkce a konstanta  $C$  zahrnutá v některých typech těchto funkcí (viz tab. 1.1).

Byl zvolen takový postup, kdy pro funkce zahrnující konstantu  $C$  byl nejprve proveden výpočet celkové chybové funkce parametru  $C$ . Poté byly všechny funkce s optimálními hodnotami konstanty  $C$  porovnány s hodnotami  $\bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}}$  pro typy funkcí, které neobsahují konstantu  $C$ .

Chyby rekonstruovaného rozložení výkonu byly stanovovány pokazetově, jelikož cílem 3D interpolační rekonstrukce na základě měření je doplnění 2D mapy měření TC (viz 2. 3. a 4. krok v kap. 1.2.3).

#### Určení optimálních hodnot parametru $C$

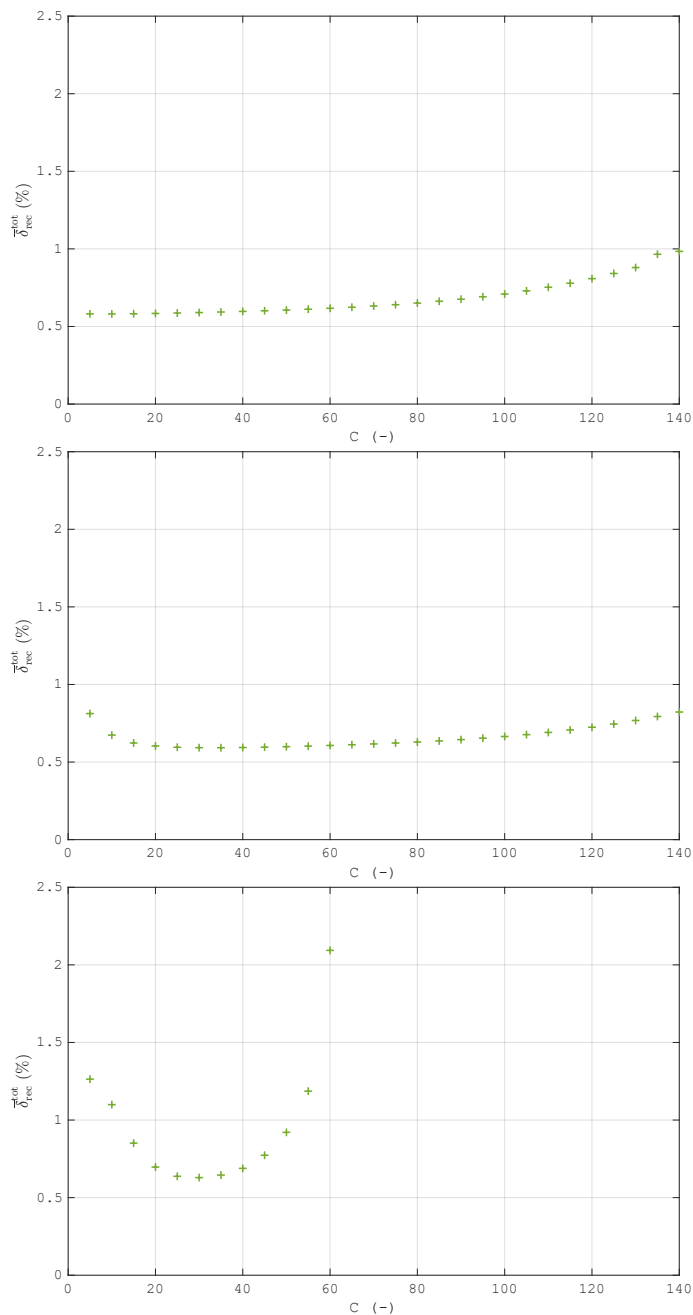
Výsledky výpočtů celkové chybové funkce parametru  $C$  jsou pro jednotlivé typy funkcí uvedeny v tab. 3.3 a znázorněny na obr. 3.5. Z tohoto obrázku lze pozorovat, že pro gaussovskou funkci roste celková chybová funkce nad rozsah grafu (bylo zjištěno, že se hodnoty  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$  blíží 100 %). Z této skutečnosti, z hodnot čísla podmíněnosti příslušných matic metody RBF a z pozorovaného charakteru interpolačního faktoru vyplývá, že tento



průběh je pravděpodobně způsoben numerickou nestabilitou metody pro vyšší hodnoty konstanty  $C$ .

Tabulka 3.3: Výsledky výpočtů pro nalezení optimální hodnoty konstanty  $C$  pro 3D interpolační rekonstrukci výkonu

Typ funkce	$C_{\min}^{\text{tot}}$ (-)	$\bar{\delta}_{\text{rec},\min}^{\text{tot}}$ (%)
multikvadratika	10	0,581
inverzní multikvadratika	35	0,592
gaussovská	30	0,629



Obrázek 3.5: Celková chybová funkce konstanty  $C$  pro 3D interpolační rekonstrukci výkonu – funkce multikvadratika (nahore), inverzní multikvadratika (uprostřed) a gaussovská (dole)

## Určení optimálního typu funkce

Pro stanovení optimálního typu funkce pro 3D interpolační rekonstrukci byly společně porovnány:

- hodnoty  $\bar{\delta}_{\text{rec},\text{min}}^{\text{tot}}$  pro optimální hodnoty konstanty  $C$  (viz tab. 3.3) pro typy funkcí, které zahrnují tuto konstantu,
- hodnoty  $\bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}}$  pro případ interpolace (tj.  $\bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}}(\alpha = 0)$ ) pro typy funkcí, které nezahrnují konstantu  $C$ .

Hodnoty celkové chyby rekonstruovaného rozložení výkonu přitom byly opět vyhodnocovány na pokazetové úrovni. Hodnoty celkové chyby rekonstruovaného rozložení výkonu jsou jednotlivé typy funkcí uvedeny v tab. 3.4. Z této tabulky vyplývá relativně malý rozdíl mezi jednotlivými typy funkcí, nicméně nejnižší hodnotu  $\bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}}$  vykazuje kubická funkce.

Tabulka 3.4: Hodnoty celkové chyby rekonstruovaného rozložení výkonu pro určení optimálního typu funkce pro 3D interpolační rekonstrukci výkonu

Typ funkce	$\bar{\delta}_{\text{rec}}^{\text{tot}}$ (%)
lineární	0,584
kubická	0,574
gaussovská	0,629
multikvadrík	0,581
inverzní multikvadrík	0,592
tenkostěnný spline	0,576

### 3.4.2 Optimalizace parametrů metody RBF pro 2D rekonstrukci výkonu na základě rozšířené 2D mapy měření TC a SPND

Pro optimalizaci parametrů metody RBF pro 2D rekonstrukci výkonu na základě rozšířené 2D mapy měření TC a SPND (viz 5. krok v kap. 1.2.3) bylo využito 8 modelů měření TC a 8 modelů měření SPND, které vytvořily 64 různých map rozšířeného 2D měřeného rozložení výkonu. Společně s 75 používanými vypočtenými rozloženími výkonu tak byl každý výpočet prováděn pro 4800 kombinací vstupních dat. Pro dílčí interpolace a aproximace byly použity následující optimální hodnoty parametrů:

- pro stanovení 3D interpolovaného rozložení výkonu (viz 3. krok v kap. 1.2.3) je na základě kap. 3.4.1 a tab. 3.4 použita kubická funkce,
- pro stanovení 3D aproximovaného rozložení výkonu (viz 6. krok v kap. 1.2.3) je na základě kap. 3.3 a tab. 3.2 uvažována funkce tenkostěnný spline, tvar tolerančního faktoru s označením *dělený výkonem* a hodnota  $\alpha = 4,2$ .

Byly provedeny výpočty pro nalezení optimálních hodnot parametru  $\alpha$  a  $C$  pro 2D kombinovanou rekonstrukci výkonu. Vyhodnocování bylo prováděno na nodální úrovni pro následně stanovené 3D kombinované rekonstruované rozložení výkonu (viz 7. krok v kap. 1.2.3). Výsledky uvedených výpočtů jsou uvedeny v tab. 3.5.

Z tab. 3.5 lze pozorovat:

- pro optimalizované parametry kombinované rekonstrukce výkonu je dosahováno vyšších hodnot průměrné velikosti chyby rekonstruovaného rozložení výkonu než v případě 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND (viz kap. 3.3 a tab. 3.2)

Tabulka 3.5: Nalezené optimální hodnoty parametrů  $\alpha$  a  $C$  společně s celkovými minimálními průměrnými velikostmi chyby rekonstruovaného rozložení výkonu pro jednotlivé typy funkcí a tvary tolerančního faktoru – kombinovaná rekonstrukce výkonu s vyhodnocením na nodální úrovni

Typ funkce	Tvar tolerančního faktoru	$\alpha_{\min}^{\text{tot}}$ (-)	$C_{\min}^{\text{tot}}$ (-)	$\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$ (%)
lineární	konstantní	0,005	–	1,338
	normální	0,006	–	0,849
	dělený výkonem	0,0035	–	0,802
kubická	konstantní	100	–	1,416
	normální	25	–	0,827
	dělený výkonem	7	–	0,765
gaussovská	konstantní	$7 \cdot 10^{-5}$	50	1,341
	normální	$4,5 \cdot 10^{-5}$	50	0,830
	dělený výkonem	$1,5 \cdot 10^{-5}$	50	0,777
multikvadrík	konstantní	0,00023	20	1,343
	normální	$6,5 \cdot 10^{-5}$	35	0,824
	dělený výkonem	$1 \cdot 10^{-9}$	250	0,755
inverzní multikvadrík	konstantní	$4 \cdot 10^{-5}$	50	1,336
	normální	$2,5 \cdot 10^{-5}$	65	0,824
	dělený výkonem	$2 \cdot 10^{-9}$	290	0,762
tenkostěnný spline	konstantní	1,15	–	1,363
	normální	0,5	–	0,828
	dělený výkonem	0,2	–	0,776

– tento výsledek lze zdůvodnit relativně vysokou mírou neurčitosti měření TC a relativně nízkou mírou neurčitosti měření SPND,

- podobně jako v předchozích kapitolách se rozdíl mezi jednotlivými typy funkcí jeví jako relativně malý,
- podobně jako v případě 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC (viz tab. 3.1) a 3D rekonstrukce na základě měření SPND (viz tab. 3.2) se jako optimální jeví toleranční faktor s označením *dělený výkonem*,
- na rozdíl od výsledků uvedených v tab. 3.1 a 3.2 je relativně velký rozdíl mezi hodnotami  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$  pro konstantní a normální toleranční faktor, rozdíl mezi hodnotami  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$  pro normální toleranční faktor a dělený výkonem je v tomto porovnání relativně malý – toto pozorování lze vysvětlit širokým spektrem neurčitosti měření v mapě rozšířeného 2D měřeného rozložení výkonu.

### 3.5 Shrnutí výsledků optimalizace parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu

Na základě metodiky popsané v kap. 1.3.2 byla za pomoci metrik uvedených v kap. 1.3.3 v kap. 3.2, 3.3 a 3.4 provedena optimalizace parametrů metody RBF pro jednotlivé typy rekonstrukce výkonu – byly tedy určeny optimální typy funkcí, tvary tolerančního faktoru, hodnoty parametrů  $\alpha$  a  $C$  pro jednotlivé typy rekonstrukcí. Tyto optimalizované parametry uvádí tab. 3.6 a rekonstrukce výkonu prováděná s tímto nastavením parametrů je označována jako *optimalizovaná rekonstrukce výkonu*.

Tabulka 3.6: Optimální parametry metody RBF pro jednotlivé typy rekonstrukce výkonu stanovené v kap. 3

Typ rekonstrukce	Typ funkce	Toleranční faktor	$\alpha_{\min}^{\text{tot}}$ (-)	$C_{\min}^{\text{tot}}$ (-)
2D na základě měření TC	tenkostěnný spline	dělený výkonem	0,5	–
3D na základě měření SPND	tenkostěnný spline	dělený výkonem	4,2	–
3D interpolační	kubická	–	–	–
2D kombinovaná	multikvadrika	dělený výkonem	$1 \cdot 10^{-9}$	250

Zároveň se jeví jako nutné zdůraznit následující skutečnosti:

- pro všechny tři typy rekonstrukce výkonu jsou rozdíly mezi jednotlivými typy funkcí relativně malé s výjimkou gaussovské funkce, která se při interpolaci vyznačuje numerickou nestabilitou,
- stanovené závěry jsou platné za předpokladu použitých vypočtených rozložení výkonu (viz kap. 2.2) a modelů měření (viz kap. 2.3).

Pro takto optimalizované rekonstrukce výkonu je zřejmě žádoucí se zabývat porovnáním jednotlivých typů rekonstrukce výkonu a hledáním nejvhodnějšího typu rekonstrukce výkonu. Tomuto problému se dále věnuje kap. 4.

## Kapitola 4

# Porovnání jednotlivých typů rekonstrukce výkonu

V kap. 3 byly předloženy výsledky výpočtů pro stanovení optimálních parametrů metody RBF pro jednotlivé typy rekonstrukce výkonu – 2D rekonstrukci výkonu na základě měření TC, 3D rekonstrukci výkonu na základě měření SPND a kombinovanou rekonstrukci výkonu.

Cílem této kapitoly je zavést a využít alternativní metriky, prostřednictvím kterých bude možné porovnávat charakter rozložení výkonu stanovených pomocí jednotlivých typů rekonstrukce výkonu. Jednotlivé typy rekonstrukce přitom budou prováděny pro optimalizované parametry metody RBF – viz tab. 3.6.

Obecně lze metriky definované dále v kap. 4.2 kvalitativně vyhodnocovat pro jednotlivé rekonstrukce výkonu nebo lze provést souhrnné kvantitativní porovnání. Pro účely kvalitativního porovnání byly tyto metriky implementovány do grafického uživatelského rozhraní frameworku popsaného v kap. 3.1. Kvantitativní porovnání jednotlivých typů rekonstrukce výkonu bylo zvoleno pro tuto kapitolu.

Výpočty prezentované v této kapitole přitom byly provedeny pro stejnou sadu vstupních dat, jaká byla použita pro optimalizaci v kap. 3. Jedná se tedy o soubor 75 vypočtených rozložení výkonů popsaných v kap. 2.2, 75 modelů měření TC popsaných v kap. 2.3.1 a 75 modelů měření SPND popsaných v kap. 2.3.2.

### 4.1 Porovnání typů rekonstrukce výkonu na základě výsledků optimalizace z kapitoly 3

Hodnoty metriky  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$  v tab. 3.1, 3.2 a 3.5 jsou vždy uváděny nodálně nebo pokazetově podle typu optimalizace. Pro vzájemné porovnání jednotlivých typů rekonstrukce výkonu tak nejsou vhodné. Pro jejich porovnání jsou v tab. 4.1 uvedeny hodnoty  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$  stanovené pro optimální parametry z tab. 3.6 a vyčíslené na pokazetové úrovni pro možnou porovnatelnost.

Tyto hodnoty ukazují, že nejvyšší mírou chyby je zatížena 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC. Hodnoty  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$  pro 3D rekonstrukci výkonu na základě měření SPND a kombinovanou rekonstrukci výkonu jsou si relativně blízké. To může indikovat schopnost

kombinované rekonstrukce výkonu věrohodně interpretovat neurčitosti měření TC a SPND.

Tabulka 4.1: Porovnání celkových minimálních průměrných velikostí chyby rekonstruovaného rozložení výkonu  $\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$  pro různé typy rekonstrukce výkonu a optimální parametry podle tab. 3.6 na pokazetové úrovni

Typ rekonstrukce	$\bar{\delta}_{\text{rec,min}}^{\text{tot}}$ (%)
2D na základě měření TC	0,872
3D na základě měření SPND	0,570
kombinovaná	0,556

## 4.2 Porovnání typů rekonstrukce výkonu pomocí alternativních metrik

Pro porovnání jednotlivých typů rekonstrukce výkonu jsou dále v kap. 4.2.1 definovány alternativní metriky. Tyto metriky jsou dále v kap. 4.2.2 vyhodnoceny prostřednictvím souborů jejich hodnot pro rekonstrukce výkonu provedené pro optimální parametry z tab. 3.6 a výše uvedených 5625 kombinací vstupních dat.

### 4.2.1 Zavedení alternativních metrik

#### Mapa chyb optimální rekonstrukce

Sestavení mapy chyb optimální rekonstrukce spočívá v provedení samostatných rekonstrukcí výkonu pro stanovené optimální parametry a pro množství kombinací vstupních dat. Pro všechny provedené rekonstrukce jsou uchovávány relativní chyby rekonstruovaného rozložení výkonu pro jednotlivé PS, resp. nody (viz vztah (1.31), resp. (1.32)). Na základě provedených rekonstrukcí výkonu je každý PS, resp. nód charakterizován souborem relativních chyb přes 5625 provedených rekonstrukcí. Uvedené soubory odchylek jsou charakterizovány průměrnými hodnotami, 5% a 95% percentily vykreslenými do mapy AZ.

#### Korelace rekonstruovaného a skutečného rozložení výkonu

Míru korelace rekonstruovaného a skutečného rozložení výkonu lze vyhodnocovat pomocí Pearsonova korelačního koeficientu, který charakterizuje míru lineární závislosti těchto dvou veličin a který je dán vztahem

$$c = \frac{\sum_{I_2, J_2} [(P_{\text{rec}}(i, j) - \bar{P}_{\text{rec}}) (P_{\text{real}}(i, j) - \bar{P}_{\text{real}})]}{\sqrt{\left(\sum_{I_2, J_2} (P_{\text{rec}}(i, j) - \bar{P}_{\text{rec}})^2\right) \left(\sum_{I_2, J_2} (P_{\text{real}}(i, j) - \bar{P}_{\text{real}})^2\right)}}, \quad (4.1)$$

kde

$$\bar{P}_{\text{type}} = \frac{1}{N_{\text{FA}}} \sum_{I_2, J_2} P_{\text{type}}(i, j) \quad (4.2)$$

pro  $\text{type} \in \{\text{rec}, \text{real}\}$  [26] [27]. V prostředí Matlab je tento 2D korelační koeficient implementován ve funkci `corr2`.

## Náklon výkonu

Určení náklonu výkonu spočívá v proložení roviny relativními chybami rekonstruovaného rozložení výkonu  $\delta_{\text{rec}}(i, j)$  (viz vztah (1.31))<sup>(14)</sup>. Hodnocení je tak v případě 2D i 3D rekonstrukce ve výsledku prováděno ve 2D (tj. v případě 3D rekonstrukce výkonu je pro stanovení náklonu nejprve provedeno axiální sečtení rozložení výkonu).

Z důvodu standardizace výsledných hodnot metrik jsou odchylky  $\delta_{\text{rec}}(i, j)$  vyčíslovány v bezrozměrných jednotkách. Proložení rovinou je provedeno pro pozice AZ normované na maximální hodnotu pozice PS v centimetrech. Na proloženou rovinu je nahlíženo jako na funkci  $f(x_{\text{cm}}, y_{\text{cm}}) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  danou obecným předpisem

$$f(x_{\text{cm}}, y_{\text{cm}}) = \beta_1 x_{\text{cm}} + \beta_2 y_{\text{cm}} + \beta_3. \quad (4.3)$$

Funkce (4.3) je charakterizována gradientem – dvousložkovým vektorem, který udává směr největšího růstu této funkce a pro který platí

$$\text{grad}(f(x_{\text{cm}}, y_{\text{cm}})) = \left( \frac{\partial f(x_{\text{cm}}, y_{\text{cm}})}{\partial x_{\text{cm}}}, \frac{\partial f(x_{\text{cm}}, y_{\text{cm}})}{\partial y_{\text{cm}}} \right) \stackrel{(4.3)}{=} (\beta_1, \beta_2). \quad (4.4)$$

Na základě uvedeného gradientu je stanoven azimutální úhel  $\varphi$

$$\varphi = \arctan2\left(\frac{\beta_2}{\beta_1}\right) \quad (4.5)$$

a elevační úhel  $\theta$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta z}{\sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2}}\right), \quad (4.6)$$

kde

$$\Delta z = f(\beta_1, \beta_2) - f(0, 0). \quad (4.7)$$

Vztahy (4.5), (4.6) a (4.7) přitom vyplývají z geometrie gradientu. Náklon výkonu je společně s relativními chybami rekonstruovaného rozložení výkonu znázorněn na obr. 4.1.

## Asymetrie rekonstruovaného rozložení výkonu

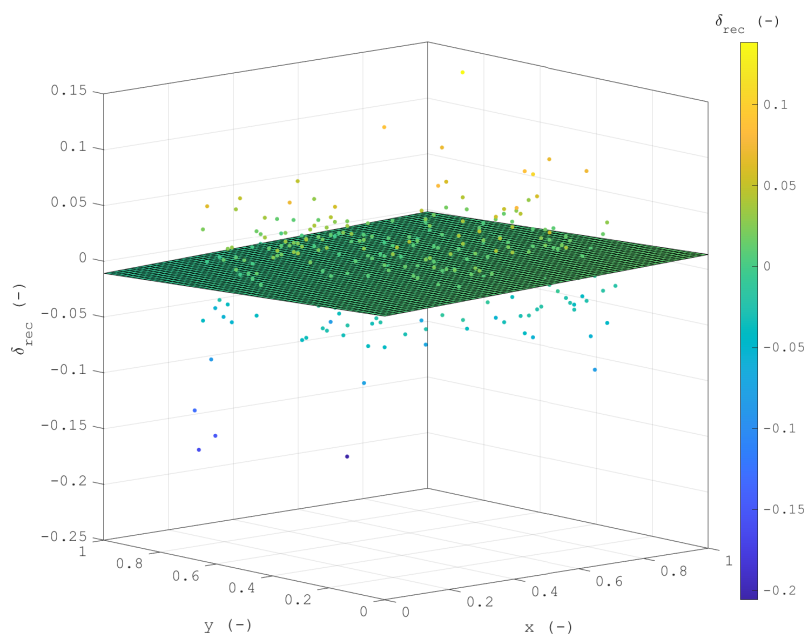
Rozložení asymetrie rekonstruovaného rozložení výkonu  $A(i, j)$  je posuzováno ve 2D a je dáno vztahem

$$A(i, j) = \frac{P_{\text{rec}}(i, j) - \bar{P}_{\text{rec, sym}}(i, j)}{\bar{P}_{\text{rec, sym}}(i, j)}, \quad (4.8)$$

kde  $\bar{P}_{\text{rec, sym}}(i, j)$  je průměrný výkon přes pozice šestinově symetrické k dané pozici  $(i, j)$ . Takto definovanou asymetrii výkonu lze hodnotit kvalitativně pomocí mapy rozložení veličiny  $A(i, j)$  nebo může být pro danou rekonstrukci výkonu hodnocena střední hodnota asymetrie daná vztahem

$$\bar{A} = \frac{1}{N_{\text{FA}}} \sum_{I_2, J_2} |A(i, j)|. \quad (4.9)$$

<sup>(14)</sup>Chyby  $\delta_{\text{rec}}(i, j)$  jsou využity proto, že prokládání roviny těmito chybami vykazuje konzistentní chování při změnách hodnot prokládaných chyb. Oproti tomu charakter roviny při prokládání samotného rekonstruovaného rozložení výkonu se mění relativně nekonzistentně se změnou hodnot těchto chyb. Uvedené pozorování je pravděpodobně způsobeno charakterem rekonstruovaného rozložení výkonu, které je poměrně špatně aproximovatelné rovinou.



Obrázek 4.1: Znázornění náklonu relativních chyb rekonstruovaného rozložení výkonu (rovina) společně s relativními chybami rekonstruovaného rozložení výkonu (jednotlivé body)

#### 4.2.2 Vyhodnocení pomocí alternativních metrik

Vyhodnocení porovnání jednotlivých typů rekonstrukce výkonu je předmětem následujících podkapitol. Graficky jsou výsledné hodnoty těchto metrik znázorněny na obr. 4.2 až 4.7. Soubory hodnot metrik pak prostřednictvím percentilů kvantitativně shrnuje tab. 4.2 a jsou komentovány dále v následujících podkapitolách.

Tabulka 4.2: Percentily metrik pro jednotlivé typy optimalizované rekonstrukce výkonu – elevační úhel  $\theta$ , korelační koeficient  $c$  a střední hodnota asymetrie  $\bar{A}$

Metrika	$\theta$ ( $^\circ$ )		$c$ (-)		$\bar{A}$ (%)	
	95%	5%	95%	5%	95%	5%
2D na základě měření TC	0,0055	0,99941	0,99990	0,27	0,65	
3D na základě měření SPND	0,0017	0,99955	0,99998	0,11	0,57	
kombinovaná	0,0022	0,99960	0,99996	0,18	0,53	

#### Vyhodnocení map chyb optimální rekonstrukce

Pro mapy chyb optimální rekonstrukce na obr. 4.2 až 4.4 lze v případě všech typů rekonstrukcí pozorovat, že:

- v pozicích, ve kterých jsou umístěny HRK jsou velikosti průměrné hodnoty souboru chyb významně vyšší, než v ostatních pozicích – to je způsobeno skutečností, že perturbace poloh HRK byly voleny pouze v záporném smyslu (viz tab. 2.1) a také tím, že se ukazuje, že perturbace polohy HRK mají oproti ostatním typům perturbací relativně silný a lokalizovaný vliv,
- mimo HRK je velikost 5%, resp. 95% percentilu chyb rekonstruovaného výkonu vždy nižší než 5%,



- na základě 5% a 95% percentilu se ukazuje, že vyšší relativní chyba rekonstrukce je dosahována na periferii AZ, než v centrální části AZ,

Dále lze z uvedených obrázků pozorovat, že velikosti percentilů souborů relativních chyb jsou nejvyšší v případě 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC. V případě 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND a kombinované rekonstrukce výkonu se jeví jako srovnatelné.

### **Vyhodnocení korelace rekonstruovaného a skutečného rozložení výkonu**

Histogramy korelace rekonstruovaného a skutečného rozložení výkonu, vykreslené na obr. 4.5 prostřednictvím hodnot percentilů indikují:

- 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC se vyznačuje nižší mírou korelace než zbylé dva typy rekonstrukce výkonu,
- 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND a kombinovaná rekonstrukce výkonu se vyznačují srovnatelnou mírou korelace.

### **Vyhodnocení náklonu výkonu**

Histogramy náklonu výkonu jsou pro jednotlivé typy rekonstrukcí vykresleny na obr. 4.6. Z uvedeného obrázku lze pozorovat:

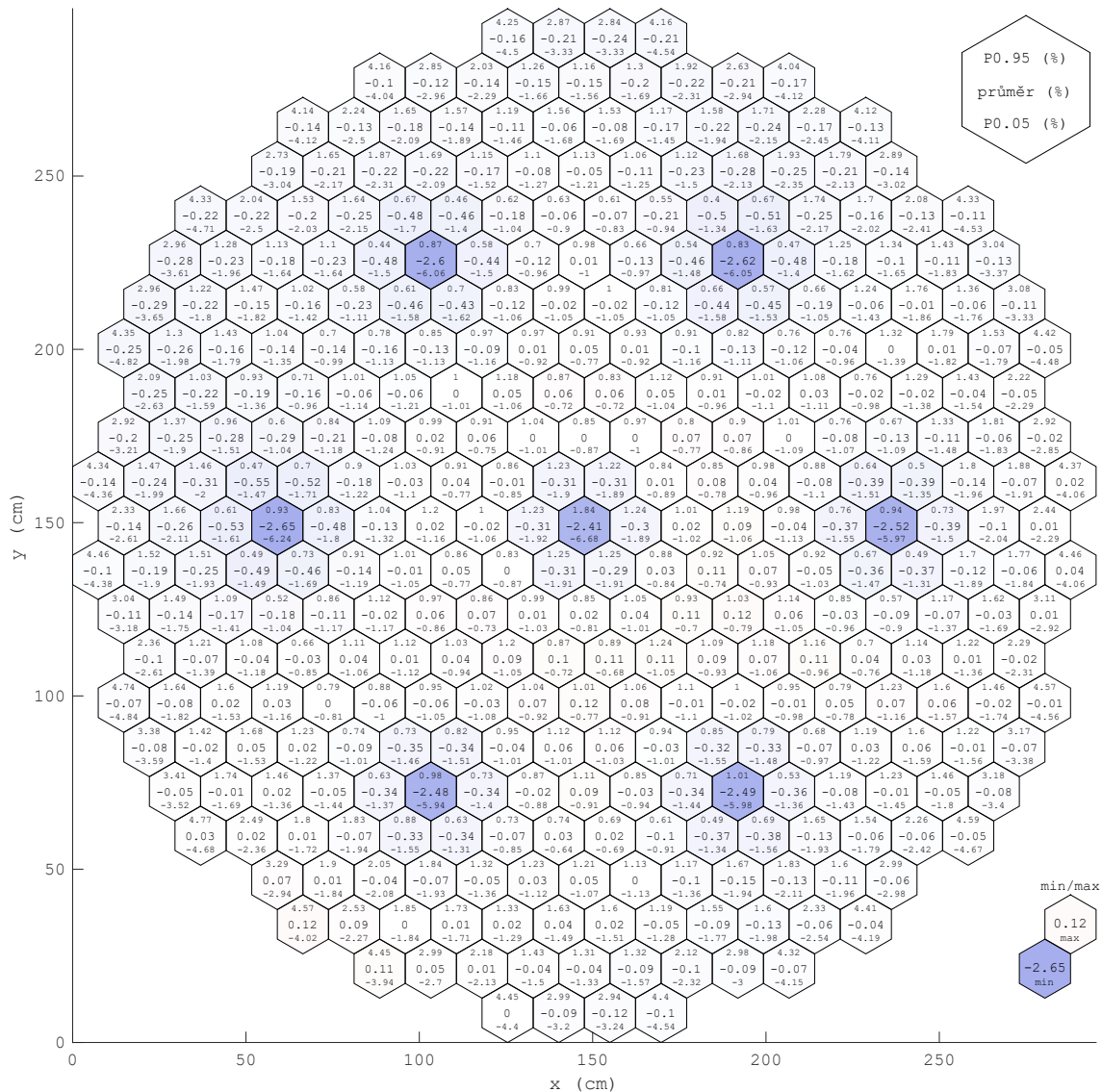
- v případě 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC je dosahováno vyšších hodnot elevace  $\theta$  než pro ostatní dva typy rekonstrukce výkonu,
- v případě kombinované rekonstrukce výkonu na základě měření TC a SPND je dosahováno mírně vyšších hodnot elevace v porovnání s 3D rekonstrukcí na základě měření SPND,
- v případě 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND (a do menší míry i v případě kombinované rekonstrukce výkonu) lze pozorovat zvýšenou četnost azimutu v okolí  $-100$  a  $+100$  stupňů.

Vyšší míra elevace 2D rekonstrukce na základě měření TC je zdůvodnitelná vyšší simulovanou neurčitostí měření TC. Lokální zvýšení četnosti azimutu může být dáno lokalizací poloh SPND při jejich relativně nízkém počtu v radiálních pozicích v AZ.

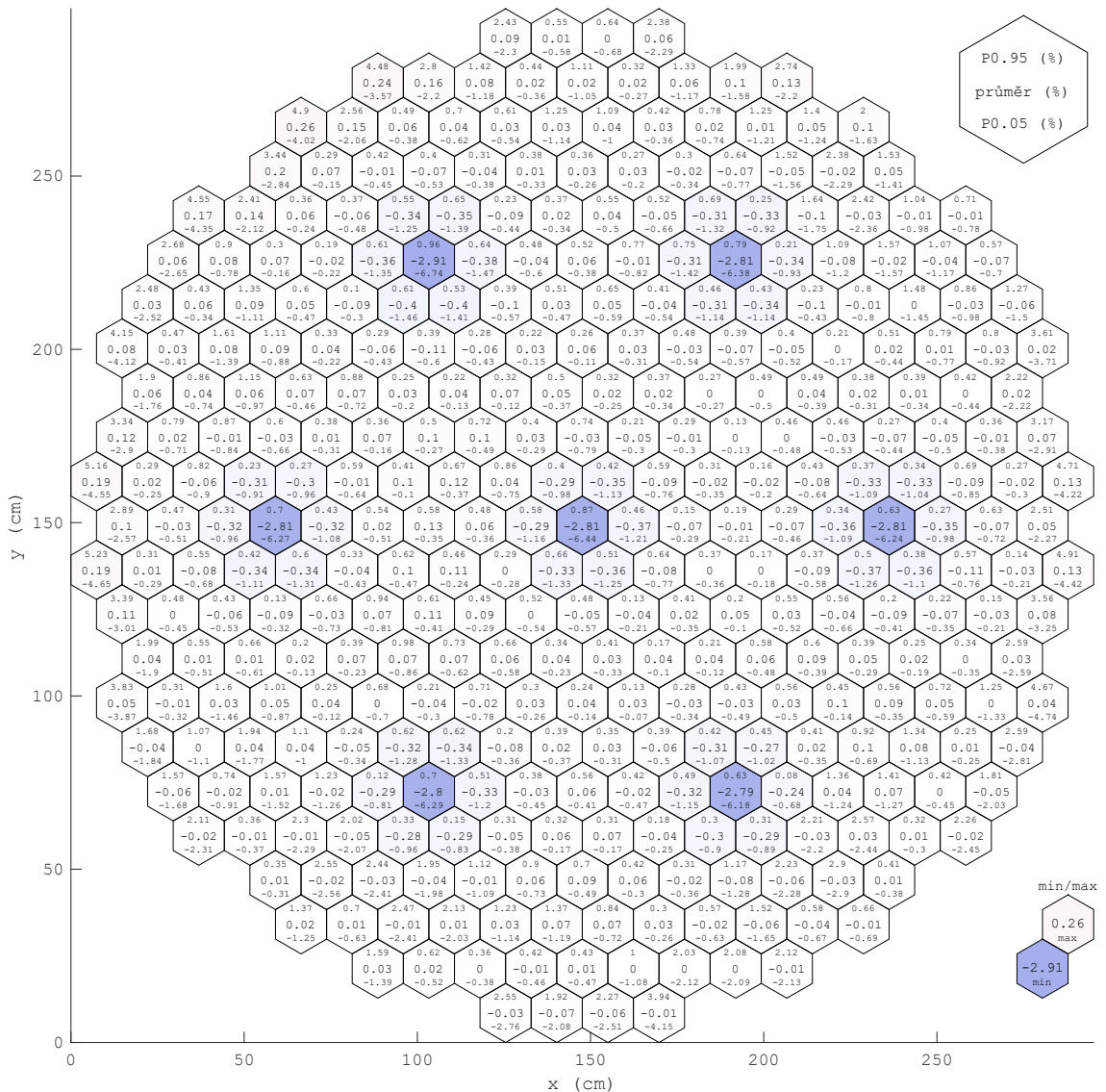
### **Vyhodnocení střední hodnoty asymetrie rekonstruovaného rozložení výkonu**

V rámci vyhodnocování střední hodnoty asymetrie je žádoucí, aby tato hodnota byla co nejnižší, jelikož postulované skutečné rozložení výkonu je symetrické. Nižší střední hodnoty asymetrie by tedy měly obecně indikovat vyšší věrohodnost rekonstrukce výkonu. Histogramy střední hodnoty asymetrie rekonstruovaného rozložení výkonu vykreslené na obr. 4.7 indikují:

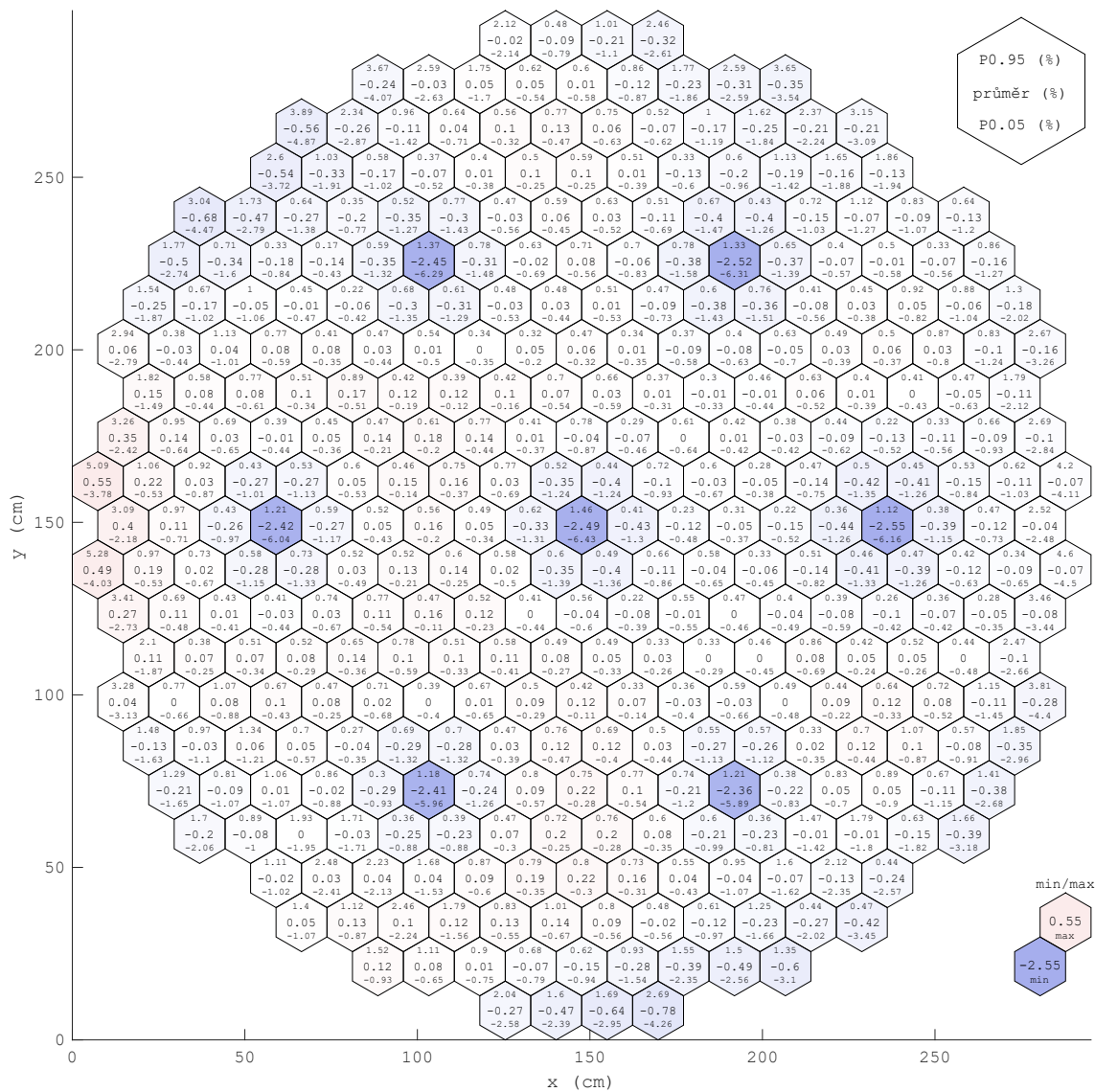
- nejvyšší míra asymetrie je pozorována v případě 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC,
- míra asymetrie v případě 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND a kombinované rekonstrukce výkonu je srovnatelná (zároveň je histogram těchto hodnot pro kombinovanou rekonstrukci výkonu užší).



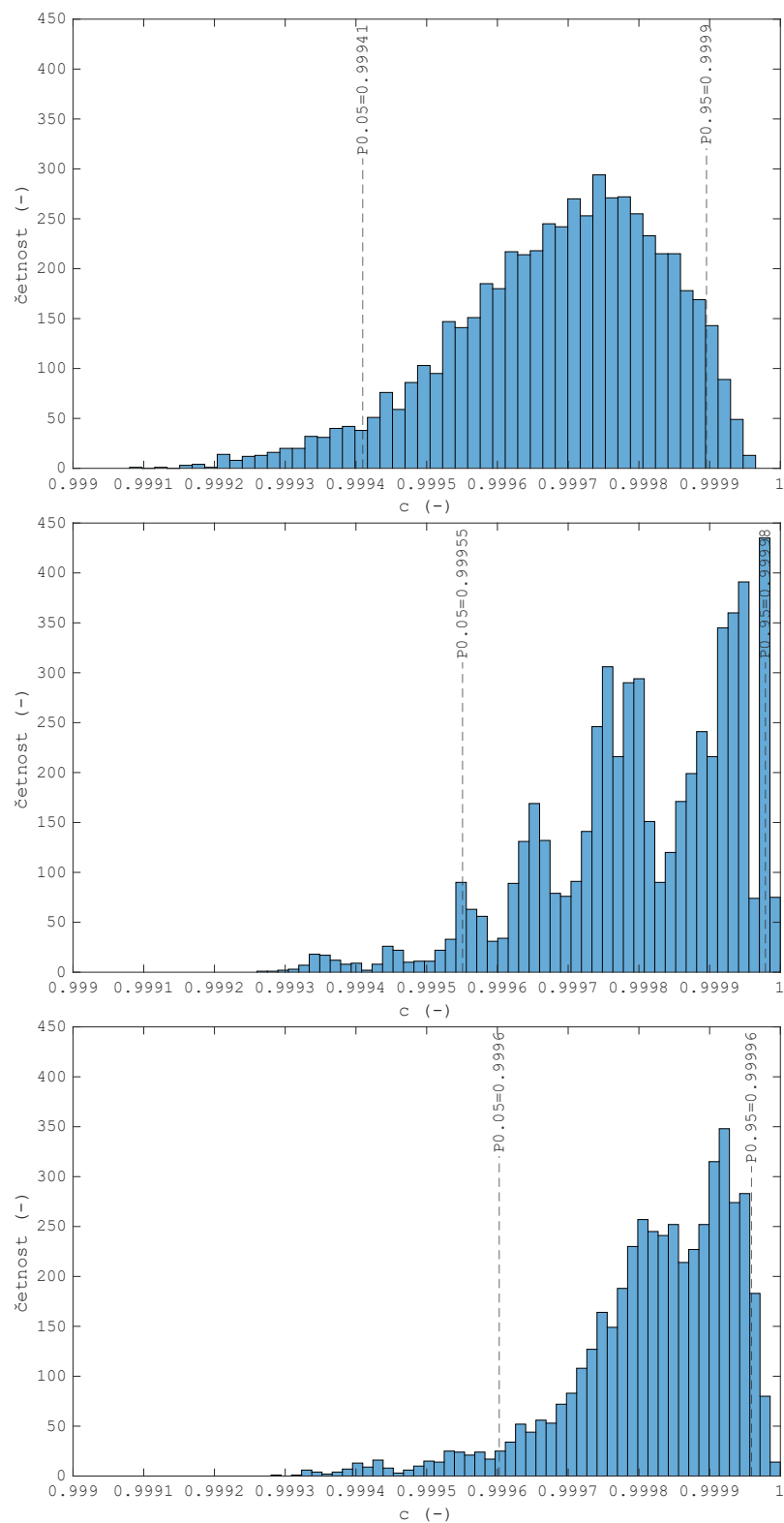
Obrázek 4.2: Mapa chyb optimální rekonstrukce pro 2D rekonstrukci výkonu na základě měření TC – hodnoty uprostřed PS udávají průměrnou hodnotu ze souboru relativních chyb rekonstruovaných rozložení výkonu, hodnoty v horní části PS udávají 95% percentil uvedených relativních chyb a hodnoty v dolní části PS udávají 5% percentil relativních chyb



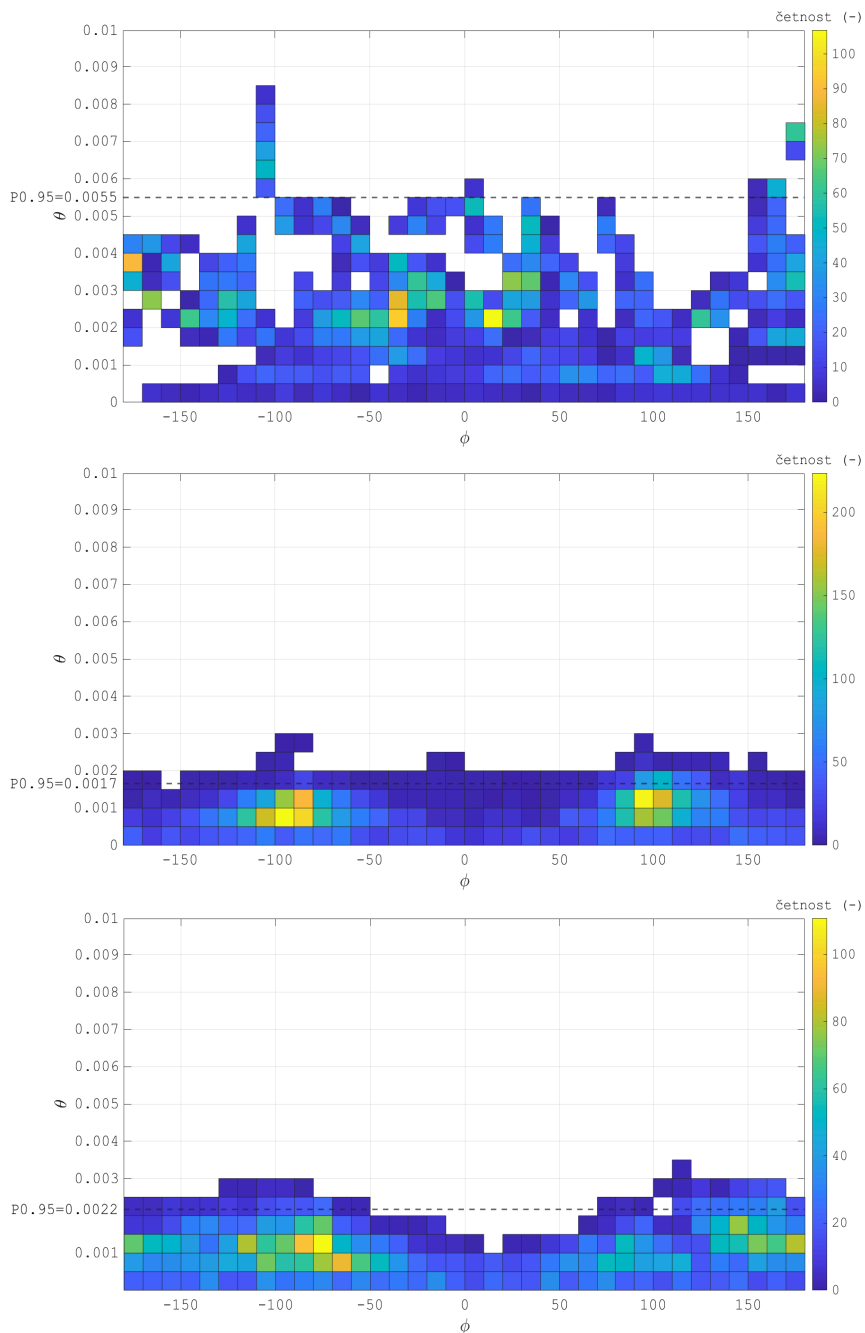
Obrázek 4.3: Mapa chyb optimální rekonstrukce pro 3D rekonstrukci výkonu na základě měření SPND – hodnoty uprostřed PS udávají průměrnou hodnotu ze souboru relativních chyb rekonstruovaných rozložení výkonu, hodnoty v horní části PS udávají 95% percentil uvedených relativních chyb a hodnoty v dolní části PS udávají 5% percentil relativních chyb



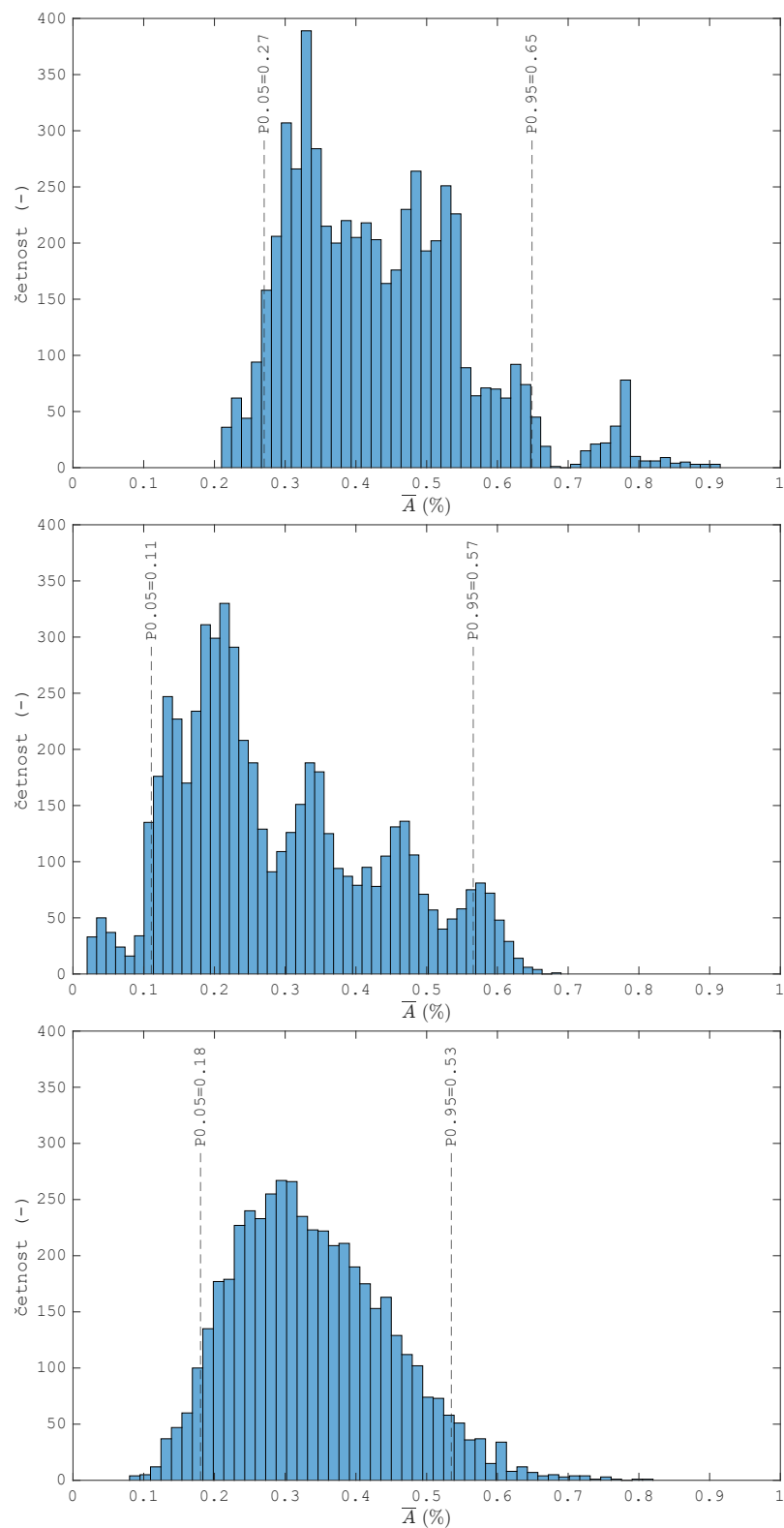
Obrázek 4.4: Mapa chyb optimální rekonstrukce kombinovanou rekonstrukcí výkonu – hodnoty uprostřed PS udávají průměrnou hodnotu ze souboru relativních chyb rekonstruovaných rozložení výkonu, hodnoty v horní části PS udávají 95% percentil uvedených relativních chyb a hodnoty v dolní části PS udávají 5% percentil relativních chyb



Obrázek 4.5: Histogramy korelace rekonstruovaného a skutečného rozložení výkonu – optimalizovaná rekonstrukce výkonu na základě měření TC (nahore), optimalizovaná rekonstrukce výkonu na základě měření SPND (uprostřed), optimalizovaná kombinovaná rekonstrukce výkonu (dole), přerušovanou čarou jsou vyznačeny 5% a 95% percentily hodnot korelačního koeficientu



Obrázek 4.6: Histogramy náklonu výkonu – dvoudimenzionální histogramy pro azimut a náklon – optimalizovaná rekonstrukce výkonu na základě měření TC (nahore), optimalizovaná rekonstrukce výkonu na základě měření SPND (uprostřed), optimalizovaná kombinovaná rekonstrukce výkonu (dole), přerušovanou čarou je vyznačen 95% percentil hodnot elevace



Obrázek 4.7: Histogramy střední hodnoty asymetrie rekonstruovaného rozložení výkonu – optimalizovaná rekonstrukce výkonu na základě měření TC (nahore), optimalizovaná rekonstrukce výkonu na základě měření SPND (uprostřed), optimalizovaná kombinovaná rekonstrukce výkonu (dole), přerušovanou čarou jsou vyznačeny 5% a 95% percentily středních hodnot asymetrie rekonstruovaného rozložení výkonu





# Závěr

Předkládaná práce ve svém úvodu podtrhuje důležitost rekonstrukce výkonu jako prostředku pro on-line stanovování rozložení výkonu v AZ, na základě kterého monitorovací systém AZ musí bezpečně vyhodnotit rezervy do limitujících parametrů provozu jaderného reaktoru.

Využití aproximační metody radiálních bázových funkcí pro rekonstrukci výkonu tak, jak je popsáno v kap. 1.2 přitom ukazuje možnost využití výpočtu simulátoru AZ a měření vnitroreaktorové instrumentace pro věrohodné stanovení rozložení výkonu v AZ. Klíčovým prvkem rekonstrukce výkonu touto metodou je analýza a ohodnocení neurčitostí měření jednotlivých čidel vnitroreaktorové instrumentace, které umožňuje metoda radiálních bázových funkcí zohlednit do procesu rekonstrukce výkonu a které popisuje kap. 2. Tato práce popisuje tři různé typy rekonstrukce výkonu odlišující se využitím vnitroreaktorové instrumentace – jedná se o 2D rekonstrukci výkonu na základě měření TC, 3D rekonstrukci výkonu na základě měření SPND a kombinovanou rekonstrukci výkonu využívající měření TC i SPND.

Jak ukazuje kap. 1.3.1, uvedená aproximační metoda disponuje řadou řídicích parametrů, které mají významný vliv na charakter aproximace a tím i na věrohodnost rekonstruovaného rozložení výkonu. Právě volbě těchto parametrů se na základě procesu optimalizace uvedeného v kap. 1.3.2 věnuje kap. 3. Navržený proces spočívá v postulování skutečného stavu a rozložení výkonu AZ, záměrném zavedení chyb výpočtu simulátoru AZ a měření vnitroreaktorové instrumentace a následné analýze schopnosti eliminace těchto chyb rekonstrukcí výkonu a to v závislosti právě na hodnotách řídicích parametrů uvedené metody.

Na základě takto navrženého procesu bylo hlavním cílem této práce kvantitativně analyzovat chování rekonstrukce výkonu na výše popsaných simulovaných vstupních datech, které poskytují známé postulované skutečné rozložení výkonu, které v praxi není dostupné. V kap. 3 jsou tak za pomoci definovaných metrik určeny takové hodnoty parametrů metody RBF, pro které je v největší míře zajištěna schopnost metody eliminovat nepřesnosti výpočtu simulátoru AZ i nepřesnosti měření vnitroreaktorové instrumentace. Tím lze dosáhnout nejlepší možné shody rekonstruovaného rozložení výkonu s postulovaným skutečným rozložením výkonu.

Mimo typ radiální bázové funkce zvolené pro aproximaci a konstantu  $C$ , která specifikuje tvar těchto funkcí se na základě stanovených metrik ukázal být nejvýznamnějším řídicím parametrem tzv. toleranční faktor – tedy člen vystupující v aproximační metodě, kterým je řízeno, zda se rekonstruované rozložení výkonu blíží spíše výpočtu simulátoru AZ, nebo měření vnitroreaktorové instrumentace. Uvedený toleranční faktor je dán jednak svým tvarem (předpisem) a pak také škálovacím parametrem neurčitosti měření  $\alpha$ . Kapitola 3 jako nejvhodnější tvar tolerančního faktoru určuje ten s označením *dělený výkonem* a pro jednotlivé typy rekonstrukce výkonu a typy radiálních bázových funkcí v tab. 3.1, 3.2 a 3.5

určuje optimální hodnoty tohoto parametru. Optimální hodnoty parametrů jednotlivých typů rekonstrukce výkonu pak shrnuje tab. 3.6.

Pro takto určené optimální parametry metody RBF následně kap. 4 zavádí a vyhodnocuje alternativní metriky, jejichž účelem je porovnání jednotlivých typů rekonstrukce výkonu. Zvolenými metrikami jsou mapa chyby optimální rekonstrukce, náklon výkonu, korelace rekonstruovaného a skutečného rozložení výkonu a dále asymetrie rekonstruovaného rozložení výkonu. Vyhodnocení těchto metrik se věnuje kap. 4.2.2. Toto vyhodnocení indikuje nižší míru věrohodnosti 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC oproti zbylým dvěma typům rekonstrukce výkonu, které se ukazují být srovnatelné.

Popsaná analýza a optimalizace parametrů metody RBF pro rekonstrukci výkonu byla realizována pomocí frameworku speciálně vytvořeného pro tuto práci, který je popsán v kap. 3. Tento framework pomocí grafického uživatelského rozhraní umožňuje kvalitativně zkoumat jednotlivé rekonstrukce výkonu, rekonstruovaná rozložení výkonu a charakteristiky vstupních dat při interaktivní volbě parametrů metody RBF. Významnou součástí frameworku je i systém tvorby výpočetních front pro časově náročné analýzy zahrnující vyšší množství vstupních dat.

I přes jednoznačně definované postupy pro optimalizaci uvedených parametrů je nutné zohlednit, že platnost optimalizovaných hodnot těchto parametrů je podmíněna mírou simulovaných chyb simulátoru AZ a měření vnitroreaktorové instrumentace. Platnost stanovených optimální hodnot parametru  $\alpha$  je rovněž podmíněna použitím jednotek neurčitosti měření a jednotek vzdálenosti v AZ. Právě výše zmíněný framework je konstruován tak, aby umožňoval opakovatelnost stanovených závěrů a provádění analýz pro různá vstupní data.

Kromě rekonstrukce výkonu metodou RBF byla v rámci přílohy A analyzována alternativní metoda rekonstrukce výkonu pomocí skládání separátních hustot pravděpodobnosti vstupních dat. Příloha A tak prostřednictvím zvolených metrik ukazuje větší věrohodnost rekonstrukce výkonu metodou RBF oproti alternativní metodě spočívající ve skládání hustot pravděpodobnosti.



# Bibliografie

1. MOLNAR, Jozef; VOČKA, Radim. The SCORPIO-VVER Core Monitoring and Surveillance System for VVER Type of Reactors. In: [online]. 2014 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z DOI: 10.1115/ICONE22-30431. V001T01A006.
2. PENG, Xingjie; WU, Qu; CAI, Yun; LOU, Lei; YU, Yingrui; LI, Qing. The application of radial basis function interpolation in reactor core power distribution on-line monitoring. *Annals of Nuclear Energy* [online]. 2019, roč. 132, s. 752–762 [cit. 2021-05-31]. ISSN 03064549. Dostupné z DOI: 10.1016/j.anucene.2019.06.059.
3. LI, Wenhui; DING, Peng; DUAN, Chengjie; QIU, RuoXiang; LIN, Jiming; SHI, Xiuan. Comparison of spatial interpolation approaches for in-core power distribution reconstruction. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2018, roč. 337, s. 66–73 [cit. 2021-05-31]. ISSN 00295493. Dostupné z DOI: 10.1016/j.nucengdes.2018.06.016.
4. KREMPASKÝ, Robin. *Rekonstrukce výkonu AZ metodou RBF pro monitorování reaktorů VVER*. Praha, 2020. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
5. KREMPASKÝ, Robin. *Analýza vlivu parametrů aproximační metody RBF na rekonstrukci výkonu aktivní zóny jaderného reaktoru*. Praha, 2021. Výzkumný úkol. České vysoké učení technické v Praze.
6. VOČKA, Radim. *User Guide for program ANDREA, version 2.3.2*. 2020. Technická zpráva. ÚJV Řež, a.s.
7. DE MARCHI, Stefano; PERRACCHIONE. *Lectures on Radial Basis Functions*. University of Padua, Italy, 2018.
8. TOIT, Wilna du. *Radial Basis Function Interpolation*. Private Bag, X1, 7602 Matieland, South Africa, 2008. Disertační práce. University of Stellenbosch.
9. *Interní dokumentace monitorovacího systému BEACON*. 2008. Technická zpráva. Westinghouse.
10. CARR, Jonathan C.; BEATSON, R. K.; CHERRIE, J. B.; MITCHELL, T. J.; FRIGHT, W. R.; MCCALLUM, B. C.; EVANS, T. R. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions. In: *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '01* [online]. Not Known: ACM Press, 2001, s. 67–76 [cit. 2022-04-09]. ISBN 978-1-58113-374-5. Dostupné z DOI: 10.1145/383259.383266.
11. JEŽEK, Josef. *Geostatistika a prostorová interpolace* [online]. Praha: Univerzita Karlova v Praze, Nakladatelství Karolinum, 2016 [cit. 2022-01-17]. ISBN 978-80-246-3104-2. OCLC: 1105484985.

12. GREN, Milan. *Rekonstrukce výkonů pomocí RBF interpolace*. ÚJV Řež, a. s., 2020.
13. VOČKA, Radim. *Návrh postupu stanovení neurčitostí rozložení výkonu v AZ pro systém SCORPIO-VVER*. 2013. Technická zpráva. ÚJV Řež, a.s.
14. ŽÁK, Milan; VOČKA, Radim; KVASNIČKA, Michal. *Neurčitost rekonstrukce výkonu*. 2017. Technická zpráva. ÚJV Řež, a.s.
15. ROMSY, Tomas; ZACHA, Pavel. Coolant Mixing in the VVER-440 Fuel Assembly Head. In: *Volume 4: Radiation Protection and Nuclear Technology Applications; Fuel Cycle, Radioactive Waste Management and Decommissioning; Computational Fluid Dynamics (CFD) and Coupled Codes; Reactor Physics and Transport Theory* [online]. Prague, Czech Republic: American Society of Mechanical Engineers, 2014 [cit. 2022-04-02]. ISBN 978-0-7918-4594-3. Dostupné z DOI: 10.1115/ICONE22-30823.
16. ASZÓDI, Attila; TÓTH, Sándor; FARKAS, István; MYLLYMAKI, Karoliina; KODL, Petr; MUHLBAUER, Petr; POSYSAEV, Dmitry; REMIS, Jan. Summary of Results of VVER-440 Fuel Assembly Head Benchmark. In: Hanasaari, Espoo, Finland: Atomic Energy Research, 2010. Dostupné také z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/41/131/41131431.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/131/41131431.pdf).
17. DOSTÁL, Martin; KLOUZAL, Jan; KVASNIČKA, Michal; VOČKA, Radim. *Časová odezva teploty termočlánku na skokovou změnu teploty chladiva na výstupu palivových kazet VVER-440 (EDU), ÚJV-ORF-2015-039*. 2015.
18. KVASNIČKA, Michal. *Prototyp modulu diagnostiky signálu*. ÚJV Řež, a. s., 2022.
19. KVASNIČKA, Michal. *Ústní sdělení*. 2022.
20. HEZOUČKÝ, František; ŠTĚCH, Svatobor. *Základy teorie normálních a abnormálních provozních režimů energetických bloků s tlakovodními reaktory*. 2015. ISBN 978-80-261-0548-0. OCLC: 934900592.
21. ROUSSEEUW, Peter J.; HUBERT, Mia. Anomaly detection by robust statistics. *WIRES Data Mining and Knowledge Discovery* [online]. 2018, roč. 8, č. 2 [cit. 2022-04-20]. ISSN 1942-4787, 1942-4795. ISSN 1942-4787, 1942-4795. Dostupné z DOI: 10.1002/widm.1236.
22. SHEESE, P. E.; BOONE, C. D.; WALKER, K. A. Detecting physically unrealistic outliers in ACE-FTS atmospheric measurements. *Atmospheric Measurement Techniques* [online]. 2015, roč. 8, č. 2, s. 741–750 [cit. 2022-04-28]. ISSN 1867-8548. Dostupné z DOI: 10.5194/amt-8-741-2015.
23. MAKAI, Mihály; VÉGH, János. *Reactor Core Monitoring: Background, Theory and Practical Applications*. 1st ed. 2017. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2017. Lecture Notes in Energy, č. 58. ISBN 978-3-319-54576-9. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-319-54576-9.
24. HEJZLAR, Jonatan; VOČKA, Radim; HAVLŮJ, František. *Kvalifikace výpočetního programu ANDREA, verze 2.3*. 2019. Technická zpráva. ÚJV Řež, a.s.
25. CHIROKOV, Alex. *Scattered Data Interpolation and Approximation using Radial Base Functions*. 2006. Dostupné také z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10056-scattered-data-interpolation-and-approximation-using-radial-base-functions>.
26. HOGG, Robert V.; MCKEAN, Joseph W.; CRAIG, Allen T. *Introduction to mathematical statistics*. 6. ed., internat. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005. Pearson education international. ISBN 978-0-13-122605-0.

27. RODGERS, Joe; NICEWANDER, Alan. Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient. *The American Statistician*. 1988. Dostupné z DOI: 10.1080/00031305.1988.10475524.

## Příloha A

# Alternativní metoda rekonstrukce výkonu pomocí skládání hustot pravděpodobnosti

Kromě aproximační metody RBF je v [12] prezentován alternativní přístup pro rekonstrukci výkonu založený na skládání hustot pravděpodobnosti vstupních dat – vypočteného a měřeného rozložení výkonu. Produktem tohoto skládání jsou výsledné (rekonstruované) hodnoty výkonu v instrumentovaných pozicích a k nim příslušné hustoty pravděpodobnosti, které mají vymezovat neurčitost takto rekonstruovaného výkonu. Pro neinstrumentované pozice se pak rozložení výkonu stanovuje *interpolací* metodou RBF. Uvedený proces je v analogii s kap. 1.2 pro případ 2D rekonstrukce výkonu na základě měření TC definován v následujících krocích (postup by byl analogický i pro případ 3D rekonstrukce výkonu na základě měření SPND).

1. Formálně jsou předpokládány následující vstupní údaje:
  - $f_{P_M}(i, j)$  – hustoty pravděpodobnosti pro měřené výkony pro PS v pozicích  $(i, j)$ , kde tyto hustoty pravděpodobnosti jsou uvažovány jako normální rozdělení se směrodatnou odchylkou odpovídající neurčitosti měření TC  $\sigma_{tc,tot}(i, j)$  a střední hodnotou  $P_{M,tc}(i, j)$ ,
  - $f_{P_C}(i, j)$ , – hustoty pravděpodobnosti pro vypočtené výkony pro PS v pozicích  $(i, j)$ , kde tyto hustoty pravděpodobnosti jsou uvažovány jako normální rozdělení se směrodatnou odchylkou odpovídající neurčitosti výpočtu simulátoru AZ (viz obr. 2.12 pro neurčitosti na pokazetové úrovni) a střední hodnotou  $P_C(i, j)$ .
2. Pro vstupní hustoty pravděpodobnosti se pro každou pozici instrumentovanou pozici  $(i, j)$  kde  $i \in I_{2,tc}$  a  $j \in J_{2,tc}$  provede složení těchto distribucí podle vztahu

$$f_{\text{mean}}(i, j) = \frac{1}{I(i, j)} \sqrt{f_{P_M}(i, j)} \sqrt{f_{P_C}(i, j)}, \quad (\text{A.1})$$

kde  $I(i, j)$  značí normovací konstantu, tj.

$$I(i, j) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{\text{mean}}(i, j) dP. \quad (\text{A.2})$$

Nejpravděpodobnější hodnota výkonu v dané pozici je pak dána vztahem

$$P_{\text{mean}}(i, j) = \int_{-\infty}^{+\infty} P \cdot f_{\text{mean}}(i, j) dP. \quad (\text{A.3})$$

Složená hustota pravděpodobnosti  $f_{\text{mean}}(i, j)$  vymezuje neurčitost rekonstruovaného rozložení výkonu.

Hodnoty  $P_{\text{mean}}(i, j)$  v instrumentovaných pozicích jsou považovány za reprezentativní hodnoty výkonu a tedy za rekonstruované hodnoty výkonu. Pro stanovení rozložení výkonu v celé AZ je pak v analogii s kap. 1.2 provedena interpolace metodou RBF podle následujícího postupu.

3. Pro instrumentované pozice jsou vypočteny relativní odchylky mezi nejpravděpodobnějšími hodnotami výkonu  $P_{\text{mean}}(i, j)$  a vypočtenými hodnotami výkonu  $P_C(i, j)$ :

$$w_{\text{mC}}(i, j) = \frac{P_{\text{mean}}(i, j) - P_C(i, j)}{P_{\text{mean}}(i, j)} \quad (\text{A.4})$$

4. Je řešena interpolace metodou RBF – oproti (1.7) je volen nulový toleranční faktor pro všechny pozice a soustava má tvar

$$\begin{pmatrix} \phi_{1,1} & \dots & \phi_{1,N_{\text{tc}}} & 1 & x_{\text{cm},1} & y_{\text{cm},1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{N_{\text{tc}},1} & \dots & \phi_{N_{\text{tc}},N_{\text{tc}}} & 1 & x_{\text{cm},N_{\text{tc}}} & y_{\text{cm},N_{\text{tc}}} \\ 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_{\text{cm},1} & \dots & x_{\text{cm},N_{\text{tc}}} & 0 & 0 & 0 \\ y_{\text{cm},1} & \dots & y_{\text{cm},N_{\text{tc}}} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_{N_{\text{tc}}} \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{\text{mC},1} \\ \vdots \\ w_{\text{mC},N_{\text{tc}}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (\text{A.5})$$

5. Na základě řešení soustavy (A.5) je sestaven interpolační faktor:

$$W(x_{\text{cm}}, y_{\text{cm}}) = b_1 + b_2 x_{\text{cm}} + b_3 y_{\text{cm}} + \sum_{k=1}^{N_{\text{tc}}} c_k \phi(\|(x_{\text{cm}}, y_{\text{cm}}) - (x_{\text{cm},k}, y_{\text{cm},k})\|). \quad (\text{A.6})$$

6. Pro všechny PS je stanoveno rekonstruované rozložení výkonu  $P_{\text{rec}}(i, j)$

$$P_{\text{rec}}(i, j) = \frac{P_C(i, j)}{1 - W(i, j)}. \quad (\text{A.7})$$

Tento přístup se od aproximačního přístupu v kap. 1.2 liší tím, že neurčitost vstupních dat je zohledněna při skládání hustot pravděpodobnosti (viz 2. krok postupu) a nikoliv v úloze aproximace metodou RBF.

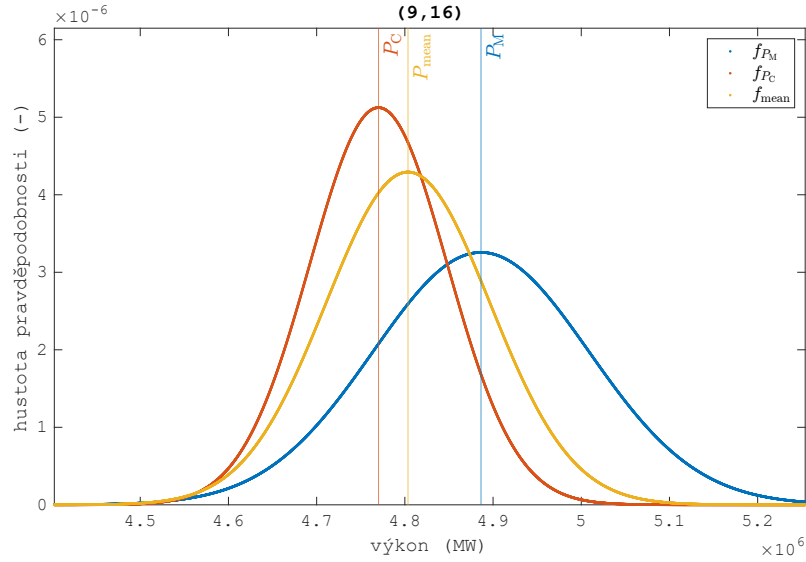
Zřejmé omezení této metody rekonstrukce výkonu spočívá v tom, že v instrumentovaných pozicích vždy stanovuje výsledný výkon mezi hodnotami z výpočtu a měření.

V rámci této práce bylo provedeno hodnocení tohoto typu rekonstrukce výkonu pomocí metodiky uvedené v kap. 1.3.2. Pro porovnání tak byla využita celková chybová funkce parametru  $\alpha$ . Tato metrika je pro případ 2D rekonstrukce na základě měření TC a lineární funkci znázorněna na obr. A.2, ze kterého vyplývá schopnost aproximační metody RBF lépe minimalizovat chyby vstupních dat<sup>(15)</sup>. Tato schopnost je přitom podmíněna správnou volbou parametru  $\alpha$ .

Další metrikou zvolenou pro porovnání uvedených dvou typů rekonstrukce výkonu je mapa chyb optimální rekonstrukce, která je pro případ 2D rekonstrukce výkonu pomocí skládání hustot pravděpodobnosti znázorněna na obr. A.3. Z tohoto obrázku lze oproti standardní

<sup>(15)</sup>Stejný výsledek byl pozorován pro všechny typy funkcí.

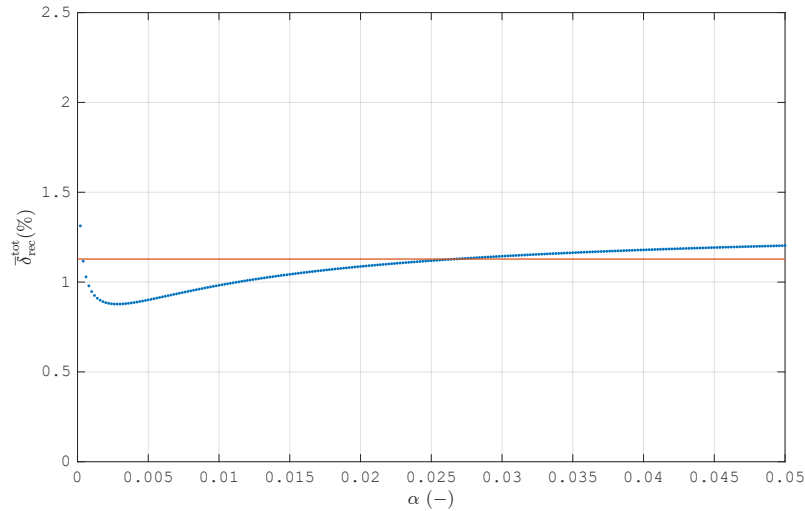




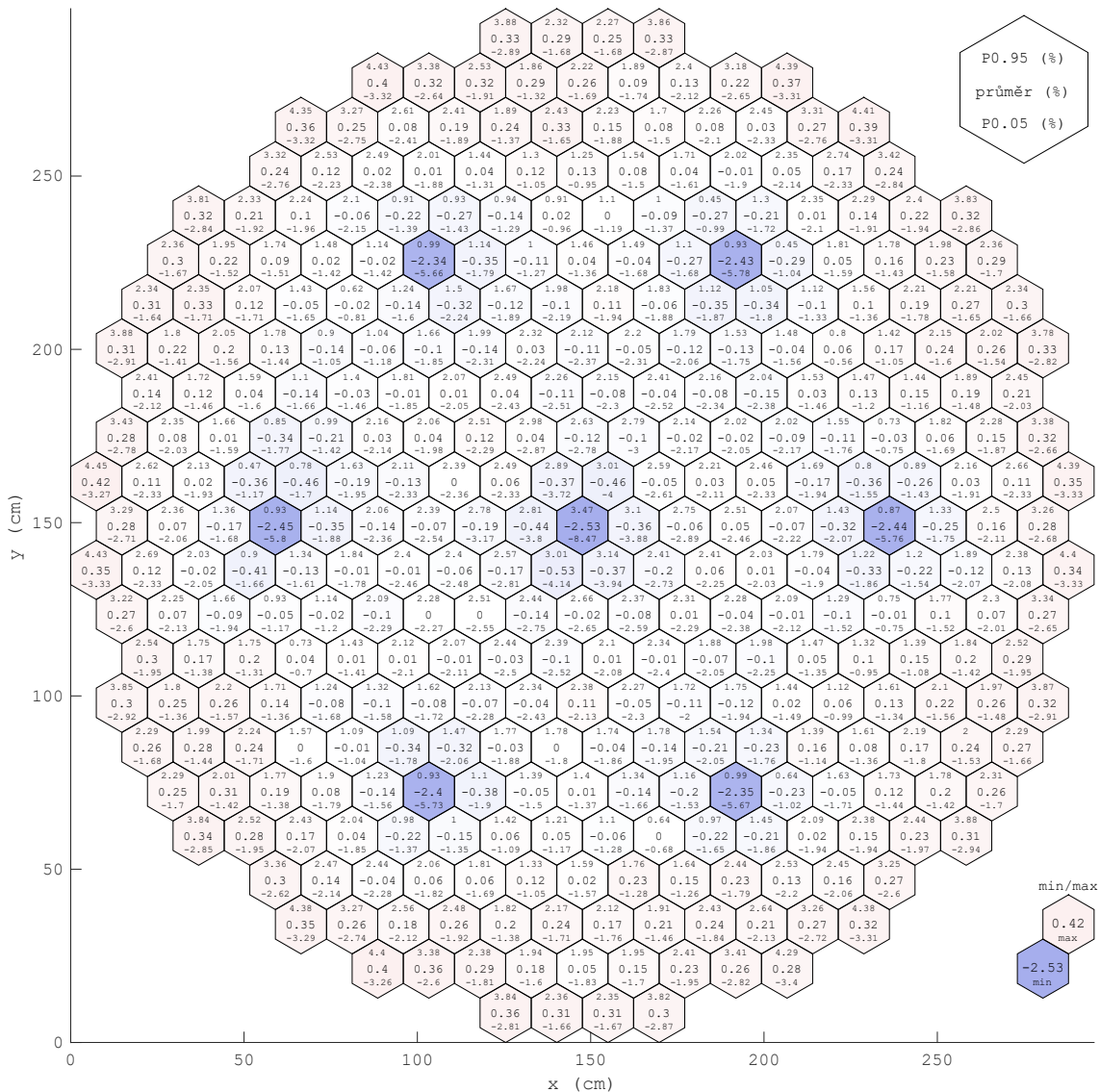
Obrázek A.1: Znázornění skládání hustot pravděpodobnosti pro stanovení nejpravděpodobnější hodnoty výkonu pro PS v pozici (9,16) – žlutá přímka značí nejpravděpodobnější hodnotu výkonu  $P_{mean}$  spolu se žlutě znázorněnou složenou hustotou pravděpodobnosti  $f_{mean}$ , červená svislá čára značí hodnotu vypočteného výkonu  $P_C$  spolu s červeně znázorněnou hustotou pravděpodobnosti  $f_{P_C}$  a modrá svislá čára značí hodnotu měřeného výkonu  $P_M$  spolu s modře znázorněnou hustotou pravděpodobnosti  $f_{P_M}$

aproximační rekonstrukci (viz obr. 4.2) pozorovat, že vyšších velikostí percentilů je dosažováno v centrální části AZ, což je nežádoucí vzhledem k tomu, že se jedná o výkonově více zatíženou část AZ, ve které jsou obecně hodnoty výkonu blíže limitům.

Z výše uvedených důvodů byla pro rekonstrukci výkonu preferována metoda RBF.



Obrázek A.2: Celková chybová funkce parametru  $\alpha$  pro 2D rekonstrukci výkonu na základě měření TC pro lineární funkci – modrou barvou jsou znázorněny hodnoty  $\bar{\delta}_{rec}^{tot}$  pro rekonstrukci výkonu metodou RBF a červenou čarou je znázorněna hodnota  $\bar{\delta}_{rec}^{tot}$  pro rekonstrukci výkonu pomocí skládání hustot pravděpodobnosti a interpolace



Obrázek A.3: Mapa chyb optimální rekonstrukce pro 2D rekonstrukci výkonu na základě měření TC pomocí skládání hustot pravděpodobnosti – hodnoty uprostřed PS udávají průměrnou hodnotu ze souboru relativních chyb rekonstruovaných rozložení výkonu, hodnoty v horní části PS udávají 95% percentil uvedených relativních chyb a hodnoty v dolní části PS udávají 5% percentil relativních chyb