

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH
Fakulta BERG

Ústav riadenia a informatizácie výrobných procesov

**Výskum nepriameho merania teploty a uhlíka v procese
skujňovania**

(zmluva o dielo č. P-101-0030/17)

Riešiteľský kolektív:

Za zhotoviteľa:

doc. Ing. Marek Laciak, PhD.

(vedúci riešiteľ projektu)

prof. Ing. Ivo Petráš, DrSc.

prof. Ing. Ján Terpák, CSc.

doc. Ing. Ján Kačur, PhD.

doc. Ing. Patrik Flegner, PhD.

doc. Ing. Milan Durdán, PhD.

Za objednávateľa:

Ing. Gabriel Tréfa, PhD., MBA

OBSAH:

Zoznam tabuliek:.....	4
Zoznam obrázkov:.....	5
Úvod.....	7
1. Citlivostná analýza pomocou statického bilančného modelu	8
2. Modely pre nepriame meranie uhlíka	13
2.1 Relatívna rýchlosť oduhličenia.....	13
2.1.1 Vstupy a výstupy	14
2.1.2 Algoritmus.....	14
2.1.3 Dosiahnuté výsledky	15
2.2 Gradient koncentrácie CO ₂	17
2.2.1 Vstupy a výstupy	18
2.2.2 Algoritmus.....	19
2.2.3 Dosiahnuté výsledky	19
2.3 Bilancia uhlíka z koncentrácie CO a CO ₂	20
2.3.1 Vstupy a výstupy	21
2.3.2 Algoritmus.....	21
2.3.3 Dosiahnuté výsledky	21
2.4 Metódy s použitím derivácií neceločíselného rádu	24
2.4.1 Vstupy a výstupy	27
2.4.2 Algoritmus.....	28
2.4.3 Dosiahnuté výsledky	28
3. Model pre nepriame meranie teploty	29
3.1 Vstupy a výstupy	29
3.2 Matematický model teploty taveniny.....	31
3.3 Algoritmus a procedúry modelu	33
3.4 Dosiahnuté výsledky	35
3.5 Analýza dosiahnutých výsledkov	40
4. Komplexný model pre nepriame meranie teploty a uhlíka so spätnou väzbou	44
4.1 Modelované procesy	44
4.1.1 Proces tavenia šrotu	44
4.1.2 Proces rozkladu troskotvorných prísad	45
4.1.3 Proces oxidácie prvkov v tekutom kove	46

4.1.4	Procesy prebiehajúce medzi troskou a tekutým kovom.....	48
4.1.4.1	Tepelná bilancia	48
4.2	Vstupy a výstupy komplexného modelu.....	49
4.3	Implementácia	50
4.4	Dosiahnuté výsledky	51
5.	Model teploty a koncentrácie uhlíka s využitím metódy strojového učenia.....	55
	Záver	68
	Použitá literatúra	71

Zoznam tabuliek:

Tab. 1.	<i>Hodnoty parametrov pre referenčnú tavbu</i>
Tab. 2.	<i>Hodnoty parametrov pre simulácie tavieb v bilančnom modeli</i>
Tab. 3.	<i>Výsledky vplyvu parametrov na $T_{\text{oceľ}}$ po simulácií v bilančnom modeli</i>
Tab. 4.	<i>Jednotlivé typy šrotu a ich obsah uhlíka</i>
Tab. 5.	<i>Výsledky modelu pre nulové straty (priemerná relatívna odchýlka 11.05%)</i>
Tab. 6.	<i>Výsledky modelu pre 10% a 20% straty tepla</i>
Tab. 7.	<i>Početnosť tavieb v jednotlivých triedach presnosti</i>
Tab. 8.	<i>Koeficient strát pre jednotlivé tavby</i>
Tab. 9.	<i>Výsledky modelu pre $\text{koef_Qstraty} = 18.98\%$</i>
Tab. 10.	<i>Početnosť tavieb v jednotlivých triedach presnosti</i>
Tab. 11.	<i>Výsledky modelu po vylúčení tavieb 43601 a 43644 pre $\text{koef_Qstraty} = 19\%$</i>
Tab. 12.	<i>Početnosť tavieb v jednotlivých triedach presnosti</i>
Tab. 13.	<i>Analýza výsledkov modelu pre NM teploty</i>
Tab. 14.	<i>Výsledky modelu pre NM teploty pre koeficient strát ako funkciu</i>
Tab. 15.	<i>Početnosť tavieb v jednotlivých triedach presnosti</i>
Tab. 16.	<i>Výsledky simulácií</i>
Tab. 17.	<i>Optimalizácia počtu vstupov a data-mining procesu pre SVM regresiu jednej tavby a predikciu teploty</i>
Tab. 18.	<i>Optimalizácia počtu vstupov a data-mining procesu pre SVM regresiu jednej tavby a predikciu teploty</i>
Tab. 19.	<i>Optimalizácia počtu vstupov a data-mining procesu pre SVM regresiu jednej tavby a predikciu koncentrácie uhlíka</i>
Tab. 20.	<i>Sumár výsledkov z predikcie teploty a uhlíka pri rôznych nastavených ofsetoch</i>
Tab. 21.	<i>Výsledky simulácií s SVR modelom na predikciu teploty taveniny (Ofsety 100:100)</i>
Tab. 22.	<i>Výsledky simulácií s SVR modelom na predikciu koncentrácie uhlíka v tavenine</i>
Tab. 23.	<i>Porovnanie výsledkov modelov pre teplotu</i>
Tab. 24.	<i>Početnosť tavieb v jednotlivých triedach presnosti teplotných modelov</i>

Zoznam obrázkov:

- Obr. 1. Zobrazenie teplôt po simuláciách pri zmene hodnôt parametra a) T_{SUZE} , b) HM_{SUZE}
- Obr. 2. Zobrazenie teplôt po simuláciách pri zmene hodnôt parametra a) C_{SUZE} , b) HM_{SROT}
- Obr. 3. Zobrazenie teplôt po simuláciách pri zmene hodnôt parametra a) Si_{SUZE} , b) Fe_{SUZE}
- Obr. 4. Zobrazenie teplôt po simuláciách pri zmene hodnôt parametra a) MN_{SUZE} , b) P_{SUZE} , c) S_{SUZE}
- Obr. 5. Zobrazenie teplôt po simuláciách pri zmene hodnôt parametra T_{SROT}
- Obr. 6. Koncentrácia CO, CO₂ a relatívna rýchlosť oduhličenia pre tavbu číslo 43601
- Obr. 7. Algoritmus realizácie metódy relatívnej rýchlosti oduhličenia
- Obr. 8. Relatívna rýchlosť oduhličenia
- Obr. 9. Relatívna rýchlosť oduhličenia v poslednej štvrtine fúkania
- Obr. 10. Pribeh koncentrácie CO₂ pre vybrané tavby
- Obr. 11. Pribeh koncentrácie CO₂ pre tavbu číslo 43653
- Obr. 12. Algoritmus realizácie metódy relatívnej rýchlosti oduhličenia
- Obr. 13. Pribeh gradientov koncentrácie CO₂ pre vybrané tavby
- Obr. 14. Pribeh gradientov koncentrácie CO₂ na konci fúkania
- Obr. 15. Pribeh koncentrácie CO+CO₂ a odpovedajúca plocha
- Obr. 16. Algoritmus realizácie metódy bilancie uhlíka z koncentrácie CO a CO₂
- Obr. 17. Závislosť plochy a hmotnosti uhlíka
- Obr. 18. Pribeh koncentrácie uhlíka pre tavbu č. 43608
- Obr. 19. Pribeh paraboly a jej 0.25, 0.5, 0.75 a 1.0 derivácie
- Obr. 20. Pribeh paraboly a jej 0.05, 0.15, 0.20, 0.25 a 0.50 derivácie
- Obr. 21. Detail priebehu paraboly a jej 0.05, 0.15, 0.20, 0.25 a 0.50 derivácie
- Obr. 22. Časový pribeh CO+CO₂ a jeho 0.25, 0.50, 0.75 a 1.00 derivácia
- Obr. 23. Detail časového priebehu CO+CO₂ a jeho 0.25, 0.3, 0.35, 0.5 a 1.00 derivácia
- Obr. 24. Principiálna schéma modelu pre nepriame meranie teploty
- Obr. 25. Aproximovaný pribeh uhlíka
- Obr. 26. Aproximovaný pribeh kremíka
- Obr. 27. Algoritmus modelu teploty
- Obr. 28. Objemový prietok spalín PROMECON
- Obr. 29. Algoritmus komplexného modelu
- Obr. 30. Pribeh teploty a uhlíka pre tavbu číslo 43619
- Obr. 31. Citlivosť vplyvu vstupov na výslednú zmenu teploty ocele
- Obr. 32. Závislosť koncovej teploty taveniny od celkového množstva nafúkaného kyslíka (tavba 47105)
- Obr. 33. Závislosť koncovej meranej koncentrácie uhlíka v tavenine od celkového množstva nafúkaného kyslíka
- Obr. 34. Merateľné pozorovania resp. dynamické dáta tavby 47105 – vstupy do SVR modelu na predikciu
- Obr. 35. Merateľné pozorovania resp. dynamické dáta tavby 47105 – vstupy do SVR modelu na predikciu

- Obr. 36. *Priebeh simulovanej resp. predpovedanej teploty taveniny počas tavby 47105 (Gaussov kernel, 200:200, 4 vstupy, 4. riadok s dátami v Tab. 18)*
- Obr. 37. *Priebeh simulovanej resp. predpovedanej teploty taveniny počas tavby 47105 (polynomický kernel, 200:200, 4 vstupy, 3. riadok s dátami v Tab. 18)*
- Obr. 38. *Priebeh simulovanej resp. predpovedanej teploty taveniny počas tavby 47105 (polynomický kernel, 4 vstupy, 100:100, 9. riadok s dátami v Tab. 18)*
- Obr. 39. *Priebeh simulovanej resp. predpovedanej koncentrácie uhlíka v tavenine počas tavby 47105 (Gaussov kernel, 4 vstupy, 100:200, 8. riadok s dátami v Tab. 19)*
- Obr. 40. *Priebeh simulovanej resp. predpovedanej koncentrácie uhlíka v tavenine počas tavby 47105 (polynomický kernel, 4 vstupy, 100:200, 7. riadok s dátami v Tab. 19)*
- Obr. 41. *Priebeh simulovanej resp. predpovedanej koncentrácie uhlíka v tavenine počas tavby 47105 (polynomický kernel, 4 vstupy, 100:100, 9. riadok v Tab. 19)*
- Obr. 42. *Priebeh simulovanej teploty taveniny počas tavby 43611 – predikcia s Gaussovým kernelom (viď riadok 7 v Tab. 21, s priem. abs. chybou 8,37 °C)*
- Obr. 43. *Priebeh simulovanej teploty taveniny počas tavby 43611 – predikcia s Polynomickým kernelom (viď riadok 8 v Tab. 21, s priem. abs. chybou 23,01 °C)*
- Obr. 44. *Priebeh simulovanej teploty taveniny počas tavby 43608 – predikcia s Polynomickým kernelom (viď riadok 6 v Tab. 21, s priem. abs. chybou 17,72 °C)*
- Obr. 45. *Priebeh simulovanej koncentrácie uhlíka v tavenine (tavba 43601) – predikcia s Polynomickým kernelom (viď riadok 2 v Tab. 22s priem. abs. chybou 0,09)*
- Obr. 46. *Priebeh simulovanej koncentrácie uhlíka v tavenine (tavba 43619) – predikcia s Polynomickým kernelom (viď riadok 12 v Tab. 22s priem. abs. chybou 0,05)*
- Obr. 47. *Priebeh simulovanej koncentrácie uhlíka v tavenine (tavba 43619) – predikcia s Gaussovým kernelom (viď riadok 11 v Tab. 22s priem. abs. chybou 0,48)*
- Obr. 48. *Priebeh simulovanej koncentrácie uhlíka v tavenine – predikcia s Gaussovým kernelom (pri nastavenom ofsete 100:200)*

Úvod

Predložená správa zahŕňa návrh matematického modelu, resp. modelov pre nepriame meranie teploty taveniny a obsahu uhlíka v tavenine v priebehu tavby. Je výstupom 2.etapy riešenia projektu s názvom „*Výskum nepriameho merania teploty a uhlíka v procese skujňovania*“. V rámci tejto etapy boli navrhnuté nasledovné matematické modely nepriameho merania:

- Model, resp. modely pre nepriame meranie uhlíka
- Model pre nepriame meranie teploty taveniny
- Komplexný matematický model pre nepriame meranie teploty a uhlíka so spätnou väzbou

1. Citlivostná analýza pomocou statického bilančného modelu

Z reálnych nameraných statických dát parametrov (C_SUZE, Si_SUZE, MN_SUZE, P_SUZE, S_SUZE, Ti_SUZE, Fe_SUZE, HM_SUZE, T_SUZE, HM_SROT, T_SROT) jednotlivých tavieb boli vypočítané priemerné hodnoty. Vypočítané hodnoty slúžili ako vstupné dáta pre simuláciu referenčnej tavby (Tab. 1).

Tab. 1. Hodnoty parametrov pre referenčnú tavbu

1.	C_SUZE	4,408	7.	Fe_SUZE	94,496
2.	Si_SUZE	0,613	8.	HM_SUZE	148,938
3.	MN_SUZE	0,401	9.	T_SUZE	1313,17
4.	P_SUZE	0,056	10.	HM_SROT	40,595
5.	S_SUZE	0,006	11.	T_SROT	25,000
6.	Ti_SUZE	0,021			

Aby sa zistila citlivosť vstupných dát u bilančného modelu, tak sa k hodnotám parametrov referenčnej tavby pripočítalo 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% z vypočítanej hodnoty parametra pre simuláciu tavby (Tab. 2).

Vypočítané hodnoty boli dosadzované do bilančného modelu [1], v ktorom prebehla simulácia tavby. Pri každej simulácii tavby bola zmenená len jedna vstupná hodnota parametra simulovanej tavby bilančného modelu. V bilančnom modeli sa sledoval vplyv zmeny hodnoty parametra tavby na koncovú teplotu ocele, resp. teplotu ocele na konci tavby. Následne sa hľadal parameter, ktorý v najväčšej miere má vplyv na citlivosť bilančného modelu pri zmene hodnoty parametra tavby.

Tab. 2. Hodnoty parametrov pre simulácie tavieb v bilančnom modeli

		Hodnoty parametrov tavby pre simuláciu v bilančnom modeli					
P. č.	Parametre	5%	10%	15%	20%	25%	30%
1.	C_SUZE	4,629	4,849	5,069	5,290	5,510	5,731
2.	Si_SUZE	0,644	0,674	0,705	0,736	0,766	0,797
3.	MN_SUZE	0,421	0,441	0,461	0,481	0,501	0,521
4.	P_SUZE	0,058	0,061	0,064	0,067	0,069	0,072
5.	S_SUZE	0,006	0,006	0,007	0,007	0,007	0,008
6.	Ti_SUZE	0,022	0,023	0,024	0,025	0,026	0,027
7.	Fe_SUZE	94,221	93,946	93,670	93,395	93,120	92,845
8.	HM_SUZE	156,384	163,831	171,278	178,725	186,172	193,619
9.	T_SUZE	1378,82	1444,48	1510,14	1575,80	1641,46	1707,12
10.	HM_SROT	42,625	44,655	46,684	48,714	50,744	52,774
11.	T_SROT	26,3	27,5	28,8	30,0	31,3	32,5

Simulácia v bilančnom modeli pri zadaní vstupných referenčných hodnôt tavby ukázala, že referenčná teplota ocele (T_{oce}) je 1608°C. Na tomto základe bolo možné uskutočniť ďalšie simulácie v bilančnom modeli. Výsledné teploty ocele na konci tavby pri simuláciách v bilančnom modeli sú v (Tab. 3).

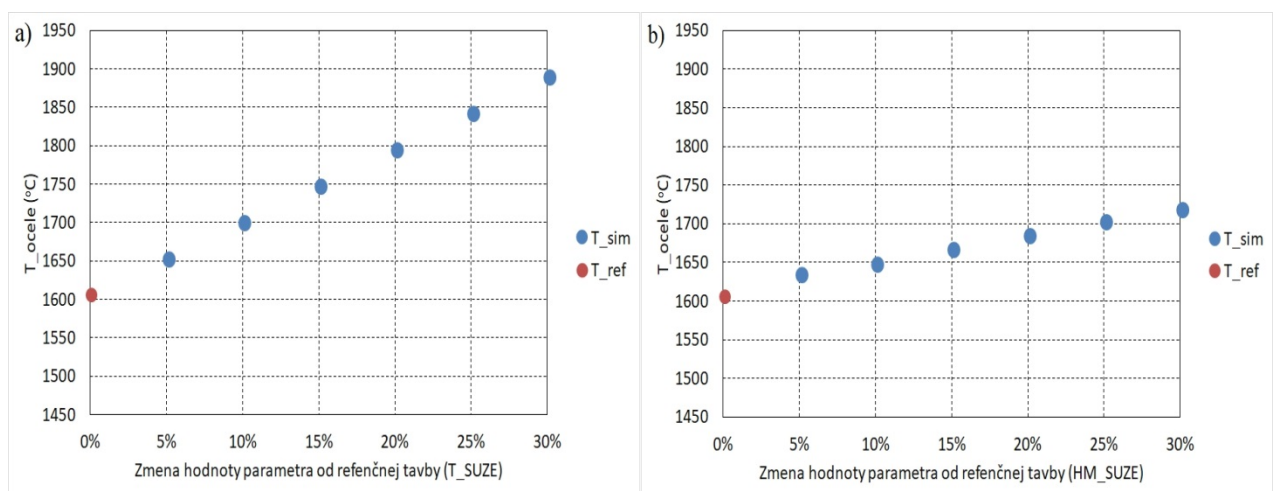
Tab. 3. Výsledky vplyvu parametrov na T_{oce} po simuláciách v bilančnom modeli

Parameter		5%	10%	15%	20%	25%	30%
1. C_SUZE	T_{oce} (°C)	1621,89	1635,7	1649,44	1663,17	1676,77	1698,37
	abs_odchýlka(°C)	13,95	27,76	41,5	55,23	68,83	90,43
	rel_odchýlka(%)	0,86	1,70	2,52	3,32	4,10	5,32
Parameter		5%	10%	15%	20%	25%	30%
2. Si_SUZE	T_{oce} (°C)	1615,56	1622,94	1630,55	1638,16	1645,52	1653,12
	abs_odchýlka(°C)	7,62	15	22,61	30,22	37,58	45,18
	rel_odchýlka(%)	0,47	0,92	1,39	1,84	2,28	2,73
Parameter		5%	10%	15%	20%	25%	30%
3. MN_SUZE	T_{oce} (°C)	1608,59	1609,24	1609,89	1610,54	1611,19	1611,84
	abs_odchýlka(°C)	0,65	1,3	1,95	2,6	3,25	3,9
	rel_odchýlka(%)	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24
Parameter		5%	10%	15%	20%	25%	30%
4. P_SUZE	T_{oce} (°C)	1608,42	1609,13	1609,84	1610,56	1611,03	1611,74
	abs_odchýlka(°C)	0,48	1,19	1,9	2,62	3,09	3,8
	rel_odchýlka(%)	0,03	0,07	0,12	0,16	0,19	0,24
Parameter		5%	10%	15%	20%	25%	30%
5. S_SUZE	T_{oce} (°C)	1607,94	1607,94	1607,94	1607,93	1607,93	1609,91
	abs_odchýlka(°C)	0	0	0	-0,01	-0,01	1,97
	rel_odchýlka(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12
Parameter		5%	10%	15%	20%	25%	30%
6. Ti_SUZE	T_{oce} (°C)	1607,93	1607,92	1607,91	1607,89	1607,88	1607,87
	abs_odchýlka(°C)	-0,01	-0,02	-0,03	-0,05	-0,06	-0,07
	rel_odchýlka(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Parameter		5%	10%	15%	20%	25%	30%
7. Fe_SUZE	T_{oce} (°C)	1611,27	1614,61	1617,97	1621,33	1624,71	1628,09
	abs_odchýlka(°C)	3,33	6,67	10,03	13,39	16,77	20,15
	rel_odchýlka(%)	0,21	0,41	0,62	0,83	1,03	1,24
Parameter		5%	10%	15%	20%	25%	30%
8. HM_SUZE	T_{oce} (°C)	1638,01	1650,69	1670,08	1688,3	1705,45	1721,63
	abs_odchýlka(°C)	30,07	42,75	62,14	80,36	97,51	113,69

	rel_odchýlka(%)	1,84	2,59	3,72	4,76	5,72	6,60
Parameter		5%	10%	15%	20%	25%	30%
9. T_SUZE	T_ocene (°C)	1655,34	1702,78	1750,23	1797,69	1845,15	1892,61
	abs_odchýlka(°C)	47,4	94,84	142,29	189,75	237,21	284,67
	rel_odchýlka(%)	2,86	5,57	8,13	10,56	12,86	15,04
Parameter		5%	10%	15%	20%	25%	30%
10. HM_SROT	T_ocene (°C)	1595,98	1584,23	1572,7	1561,37	1550,23	1539,44
	abs_odchýlka(°C)	-11,96	-23,71	-35,24	-46,57	-57,71	-68,5
	rel_odchýlka(%)	-0,75	-1,50	-2,24	-2,98	-3,72	-4,45
Parameter		5%	10%	15%	20%	25%	30%
11. T_SROT	T_ocene (°C)	1608,13	1608,3	1608,49	1608,66	1608,85	1609,03
	abs_odchýlka(°C)	0,19	0,36	0,55	0,72	0,91	1,09
	rel_odchýlka(%)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07

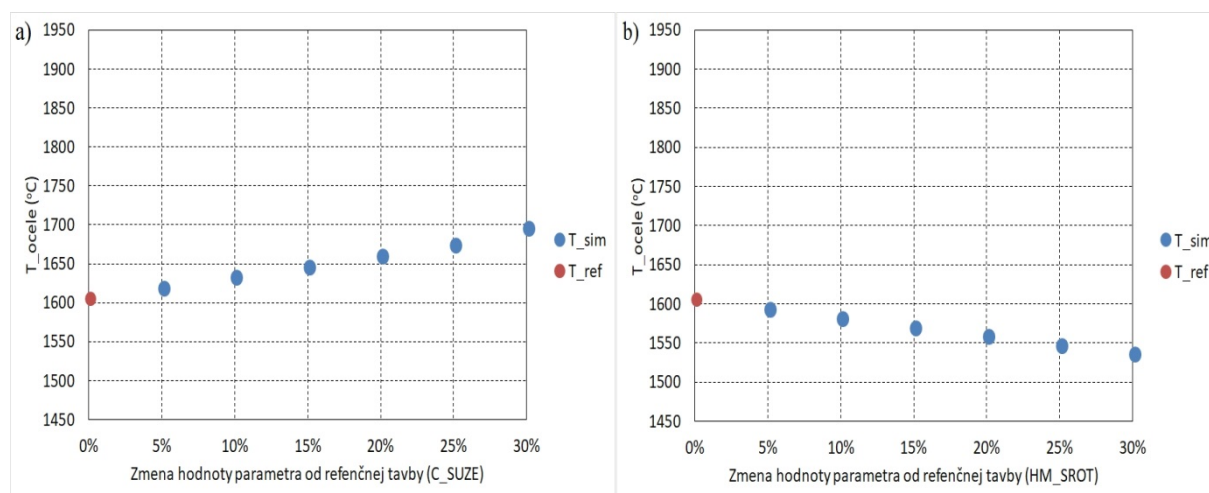
Z výsledkov simulácií bilančného modelu je zrejmé, že model je silno citlivý na hodnoty v parametri T_{SUZE} . Dokumentuje to graf na obrázku (Obr. 1a). Pri zvýšení T_{SUZE} o 30% sa teplota ocele (T_{ocene}) v bilančnom modeli na konci tavby zvýšila o 15,04%. Z jednotlivých simulácií môžeme konštatovať, že zvyšovaním T_{SUZE} v bilančnom modeli prudko vzrastá aj sledovaná teplota ocele (T_{ocene}).

Druhým dôležitým a silným parametrom je HM_{SUZE} (Obr. 1b). Pri zvýšení HM_{SUZE} o 30% sa teplota ocele (T_{ocene}) v bilančnom modeli zvýšila o 6,60%. Zvýšenie teploty ocele (T_{ocene}) nebolo v porovnaní s parametrom T_{SUZE} razantné.



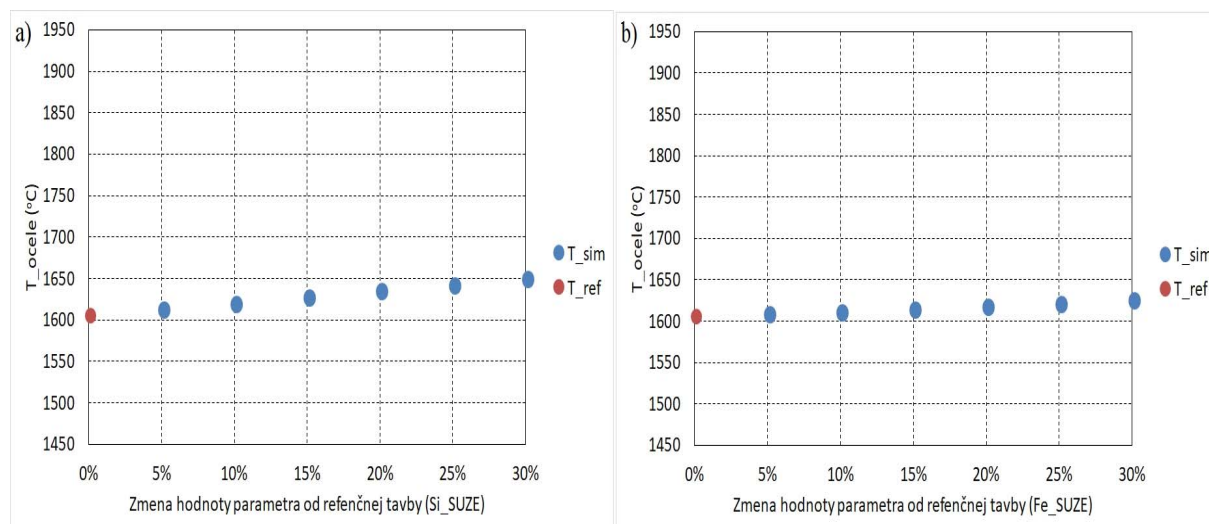
Obr. 1. Zobrazenie teplôt po simuláciách pri zmene hodnôt parametra a) T_{SUZE} , b) HM_{SUZE}

Nasledujú parametre, ktorých zmeny v bilančnom modeli pri zvýšení o 30% mali rozdielny vplyv na sledovanú teplotu ocele. Pri parametri C_SUZE (Obr. 2a) teplota (T_{ocle}) mierne stúpala a pri zvýšení hodnoty parametra o 30% bola v simulačnom modeli dosiahnutá teplota oproti referenčnej teplote o 5,32% vyššia. Pri parametre HM_SROT (Obr. 2b) je možné pozorovať, že pridávaním väčšieho množstva kovového šrotu ako je v referenčnej tavbe spôsobuje zníženie teploty ocele na konci tavby v bilančnom modeli.



Obr. 2. Zobrazenie teplôt po simuláciách pri zmene hodnôt parametra a) C_SUZE , b) HM_SROT

Mierne zvýšenie teploty (T_{ocle}) pri 30% navýšení hodnoty parametra bolo zistené u Si_SUZE a Fe_SUZE . Je zrejmé, že bilančný model po analýze je málo citlivý na tieto parametre. Výsledky sú prezentované v grafoch na obrázku (Obr. 3 a, b)

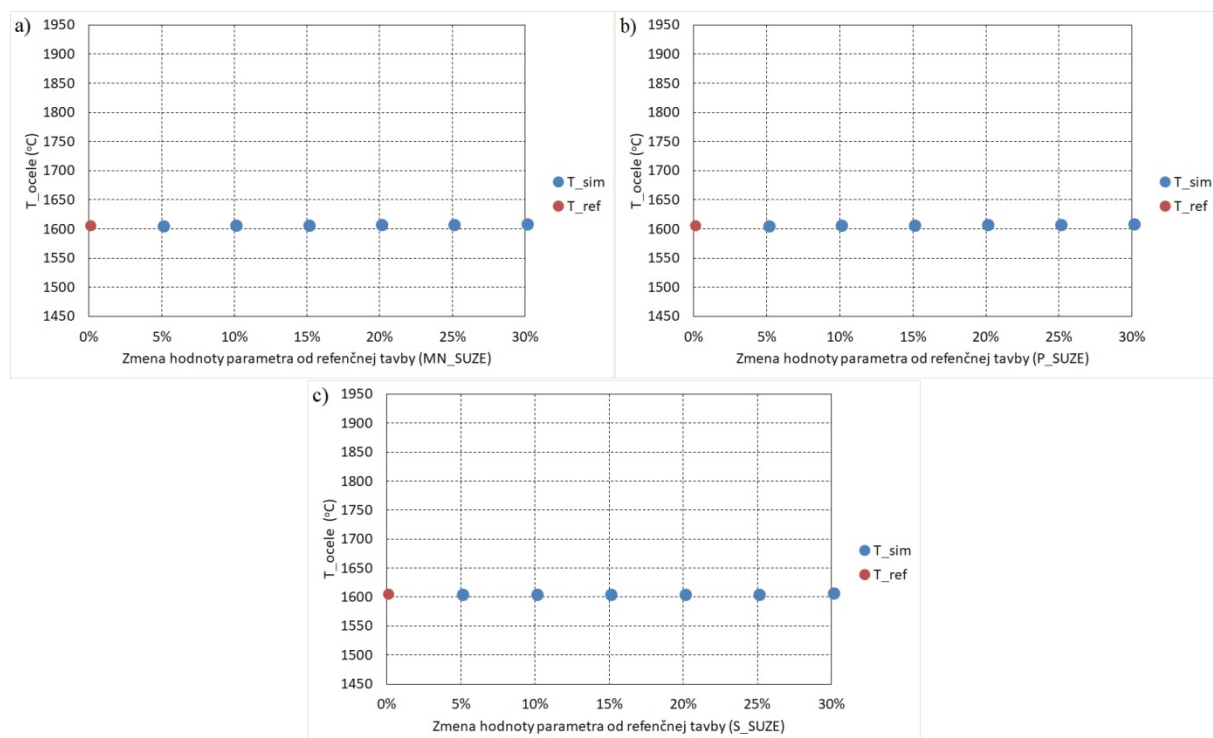


Obr. 3. Zobrazenie teplôt po simuláciách pri zmene hodnôt parametra a) Si_SUZE , b) Fe_SUZE

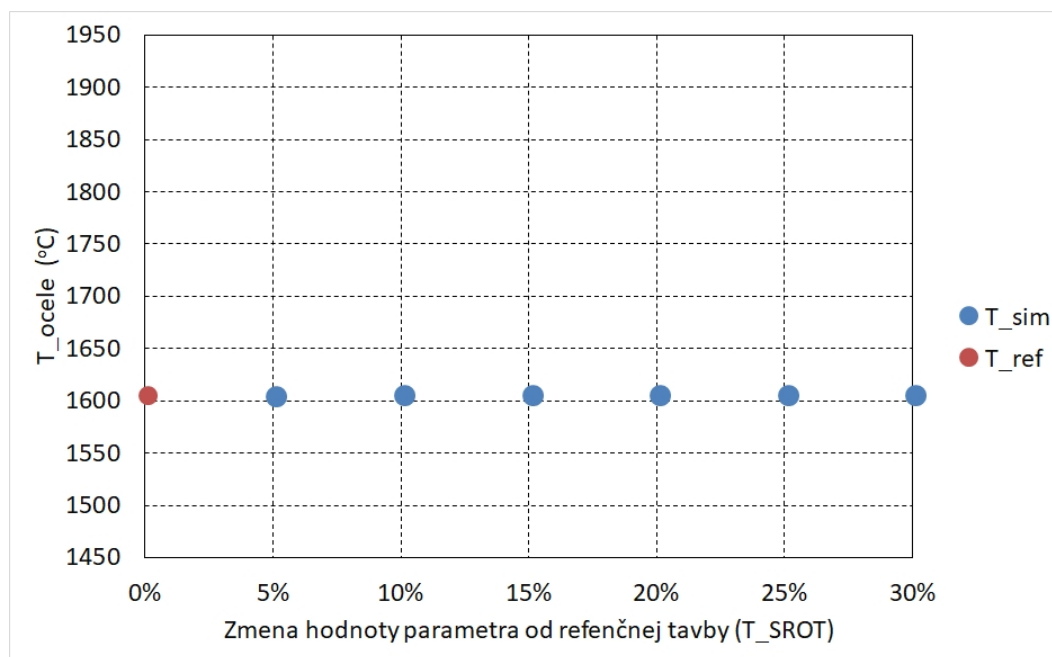
Referenčná teplota ocele a teplota (T_{ocle}) pri simuláciách v bilančnom modeli sú navzájom konštantné pre nasledujúce parametre MN_SUZE , P_SUZE , S_SUZE . Bilančný

model je málo citlivý na vymenované parametre. Dokazujú to nasledujúce grafy (Obr. 4 a, b, c).

Citlivosť bilančného modelu na parameter T_SROT sa nepotvrdila (Obr. 5).



Obr. 4. Zobrazenie teplôt po simuláciách pri zmene hodnôt parametra a) MN_SUZE , b) P_SUZE , c) S_SUZE



Obr. 5. Zobrazenie teplôt po simuláciách pri zmene hodnôt parametra T_SROT

2. Modely pre nepriame meranie uhlíka

Pre nepriame meranie uhlíka bol navrhnutý a v predchádzajúcej správe [1] je popísaný bilančný model uhlíka, ktorý vychádza z merania koncentrácie CO_2 a CO v spalínach, a taktiež z merania pretoku, teploty a tlaku spalín. Vzhľadom na pretrvávajúce problémy s meraním prietoku spalín sú navrhnuté ďalšie metódy, na základe ktorých je možné stanoviť koniec procesu skujňovania vychádzajúc z nepriameho merania uhlíka, t.j. ide o metódy, ktoré vychádzajú z:

- Relatívnej rýchlosti oduhličenia,
- Gradientu koncentrácie CO_2 ,
- Bilancie uhlíka z koncentrácie CO a CO_2 ,
- Využitia derivácií neceločíselného rádu.

2.1 Relatívna rýchlosť oduhličenia

Základom tejto metódy riadenia procesu skujňovania je priebežný výpočet rýchlosti oduhličenia, ktorá je daná vzťahom

$$v_C = - dm_C/d\tau = V_{KP} (x_{CO,KP} + x_{CO_2,KP}) Ah_C / (100 V_M) \quad (2.1)$$

kde V_{KP} – objemový prietok konvertorového plynu (Nm^3/s), $x_{CO,KP}$ – objemové percento CO v konvertorovom plyne (%), $x_{CO_2,KP}$ – objemové percento CO_2 v konvertorovom plyne (%), Ah_C – atómová hmotnosť uhlíka (kg/kmol), V_M – molový objem plynu (m^3/kmol).

Vzhľadom na rýchlosť oduhličenia danú vzťahom (1) je maximálna možná rýchlosť pri tom istom prietoku daná hodnotou kedy spaliny budú obsahovať iba CO a CO_2 , resp. súčet $x_{CO,KP} + x_{CO_2,KP}$ je rovný 100%, t.j.

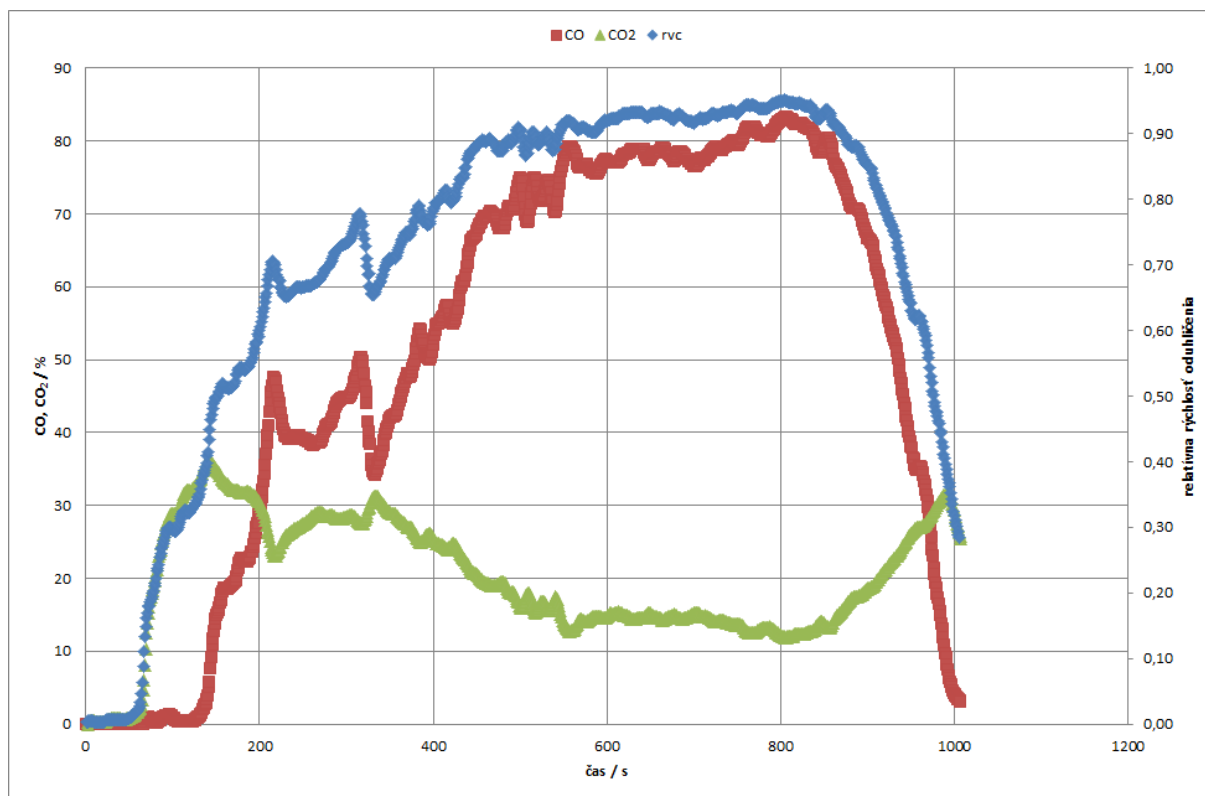
$$v_{Cmax} = V_{KP} 100 Ah_C / (100 V_M) \quad (2.2)$$

Relatívna rýchlosť oduhličenia bude teda daná pomerom danej a maximálnej rýchlosti oduhličenia

$$rv_C = v_C / v_{Cmax} = (x_{CO,KP} + x_{CO_2,KP}) / 100 \quad (2.3)$$

pričom jej hodnoty sa pohybujú v intervale od 0 po 1.

Na Obr. 6 je znázornený priebeh koncentrácie CO , CO_2 a relatívna rýchlosť oduhličenia pre tavbu číslo 43601. Z grafu vyplýva, že tvar priebehu relatívnej rýchlosti predstavuje takzvanú obrátenú „U“ krivku, čiže relatívna rýchlosť spoiatku narastá, potom je rýchlosť konštantná a v závere procesu fúkania rýchlosť klesá. Uvedené priebehy sú typické pre väčšinu tavieb, resp. mimo tavieb s prerušením.



Obr. 6. Koncentrácia CO, CO₂ a relatívna rýchlosť oduhličenia pre tavbu číslo 43601

2.1.1 Vstupy a výstupy

Pre realizáciu metódy využívajúcej relatívnu rýchlosť oduhličenia sú potrebné nasledovné vstupy z dynamických dát:

- príznak fúkania kyslíka (OC2_COMM1_K4_FUKANIE, 0/1) – PrF,
- koncentrácia oxidu uhoľnatého (K4_CO, obj.%) – CO,
- koncentrácia oxidu uhličitého (K4_CO2, obj.%) – CO2.

V porovnaní s modelom bilancie uhlíka nie je potrebný prietok spalín, resp. ich teplota a tlak, čo značne zjednodušuje realizáciu metódy využívajúcej relatívnu rýchlosť oduhličenia.

Výstupom je:

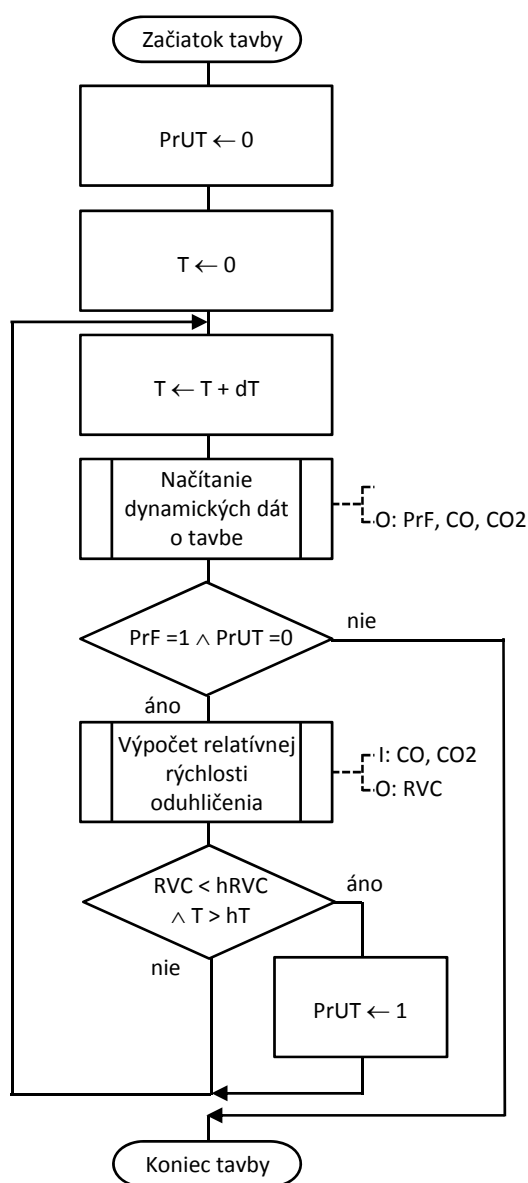
- príznak ukončenia tavby (0/1) – PrUT,

ktorý nadobúda hodnoty 0 – nie je koniec fúkania, resp. 1 – koniec fúkania.

2.1.2 Algoritmus

Algoritmus pre realizáciu metódy relatívnej rýchlosti oduhličenia je znázornený na Obr. 7. Vychádza z načítania dynamických dát, t.j. príznak fúkania (PrF), koncentrácie CO (CO) a CO₂ (CO2). Pokiaľ prebieha fúkanie, tak sa vypočíta relatívna rýchlosť oduhličenia (RVC) podľa vzťahu (3). Následne sa testuje relatívna rýchlosť voči hraničnej hodnote (hRVC) a výsledkom je príznak pre ukončenie tavby (PrUT). Vzhľadom k tomu, že hraničná hodnota relatívnej rýchlosti sa môže vyskytovať aj na začiatku fúkania je potrebné

testovať aj čas fúkania (T), t.j. zaujíma nás predovšetkým relatívna rýchlosť v poslednej štvrtine fúkania (hT).

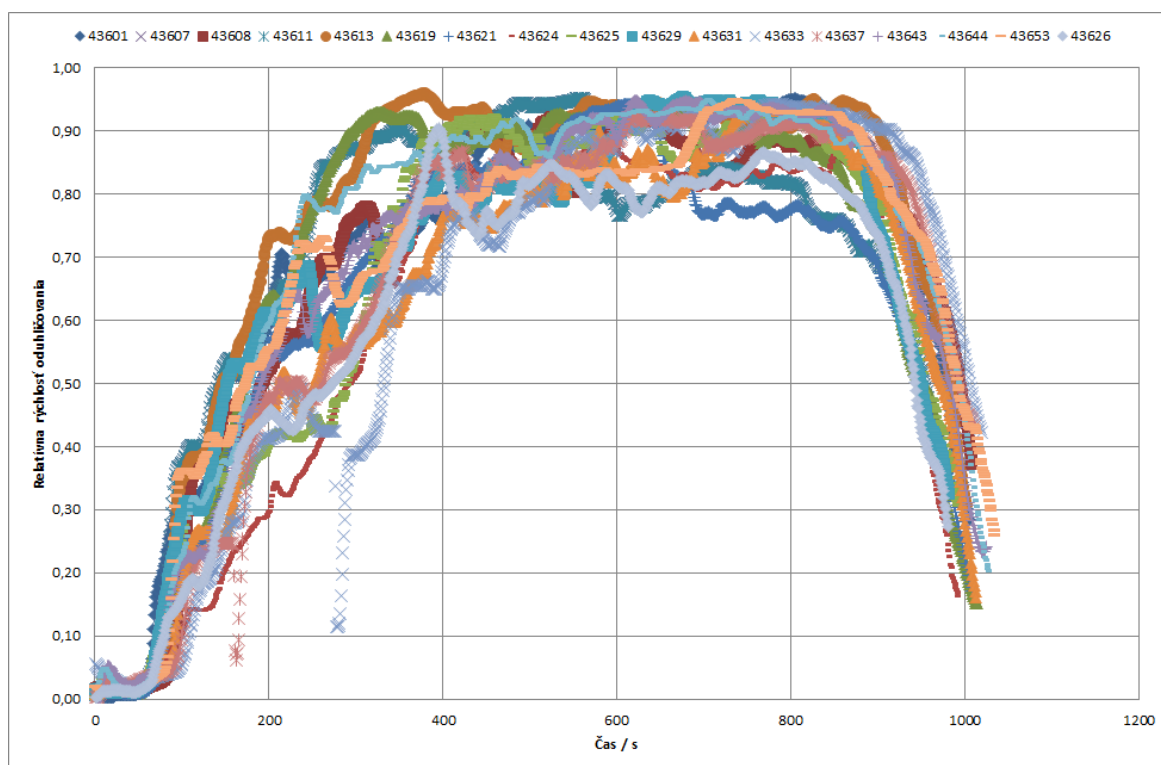


Obr. 7. Algoritmus realizácie metódy relatívnej rýchlosti oduhličenia

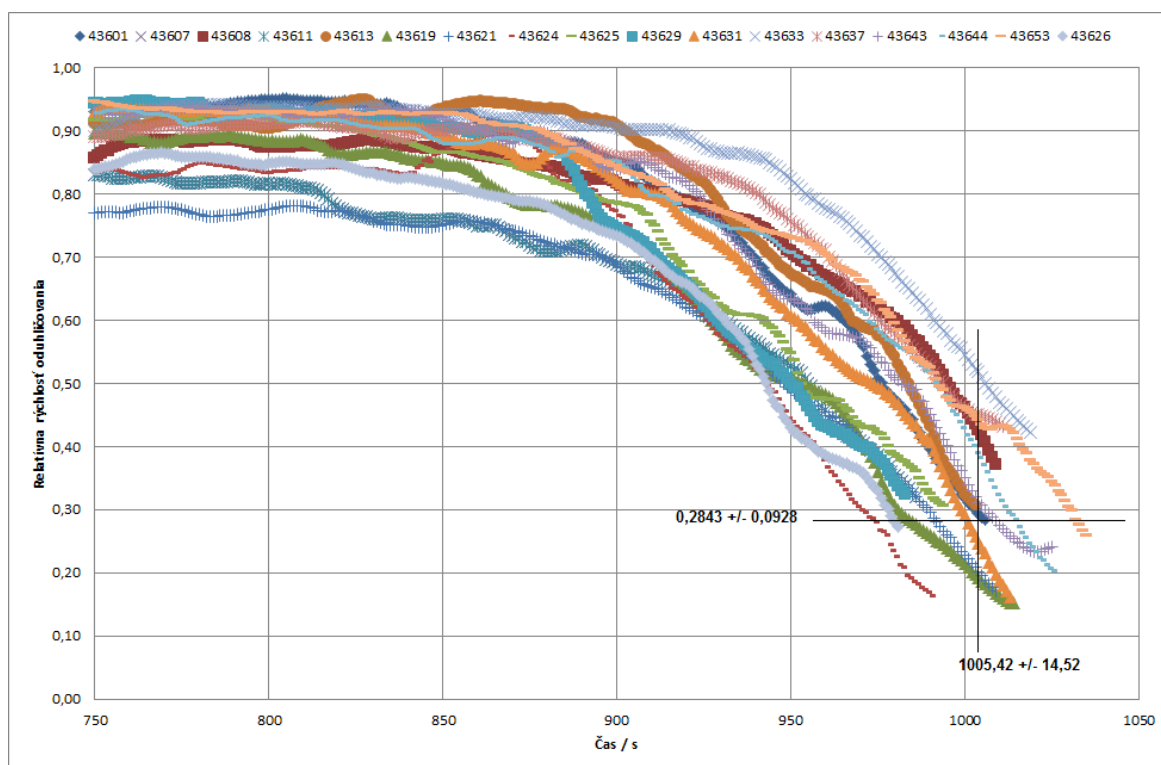
2.1.3 Dosiahnuté výsledky

Navrhnutá metóda bola testovaná na 19 vybraných tavbách číslo 43601, -07, -08, -11, -13, -19, -21, -24, -25, -26, -28, -29, -31, -33, -37, -40, -43, -44, -53. Po vylúčení extrémnych hodnôt ukončenia tavby (43628, 43640) je relatívna rýchlosť oduhličenia rovná pri ukončení fúkania 0,2843 a smerodajná odchýlka $\pm 0,0928$ (32,64%). Čo sa týka času ukončenia, tak je to 1005,42 s a smerodajná odchýlka je $\pm 14,52$ s (1,44%). Na Obr. 8 sú znázornené priebehy relatívnej rýchlosti pre testované tavby mimo extrémov. Z priebehov vyplýva, že v čase ukončenia sú priebehy v pomerne úzkej oblasti oproti ostatným časom. Na Obr. 9 sú

znázornené tie isté tavby v poslednej štvrtine fúkania s vyznačením priemeru a odchýlky relatívnej rýchlosti a času ukončenia fúkania.



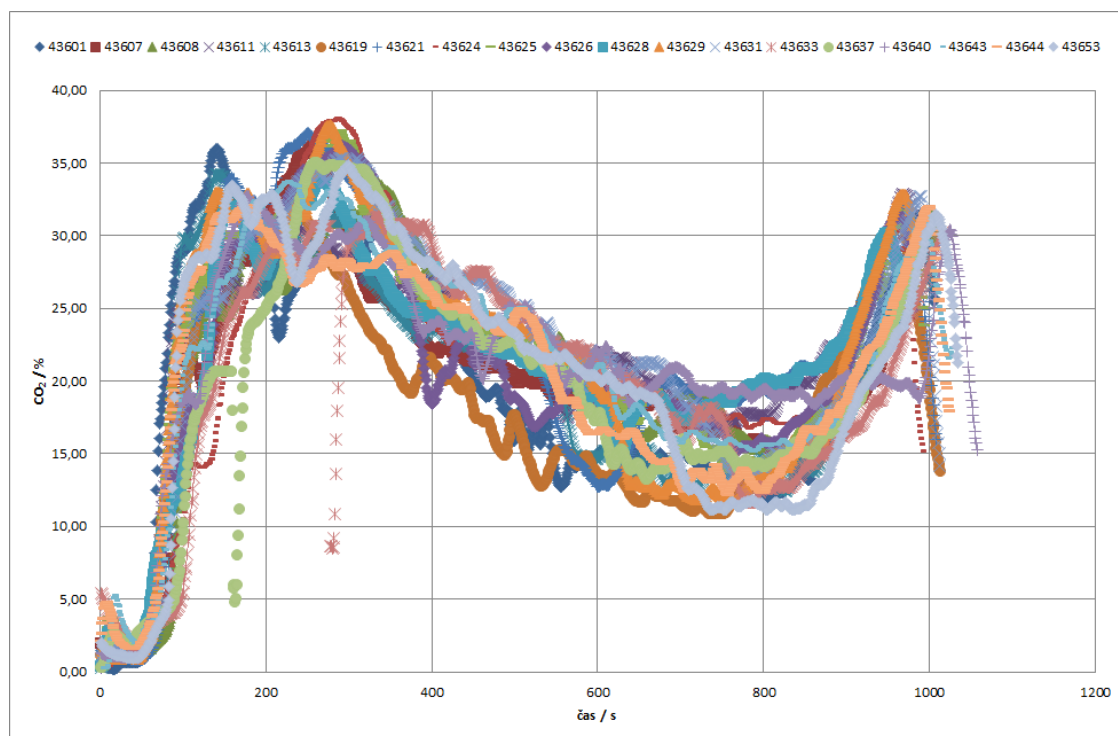
Obr. 8. Relatívna rýchlosť oduhličovania



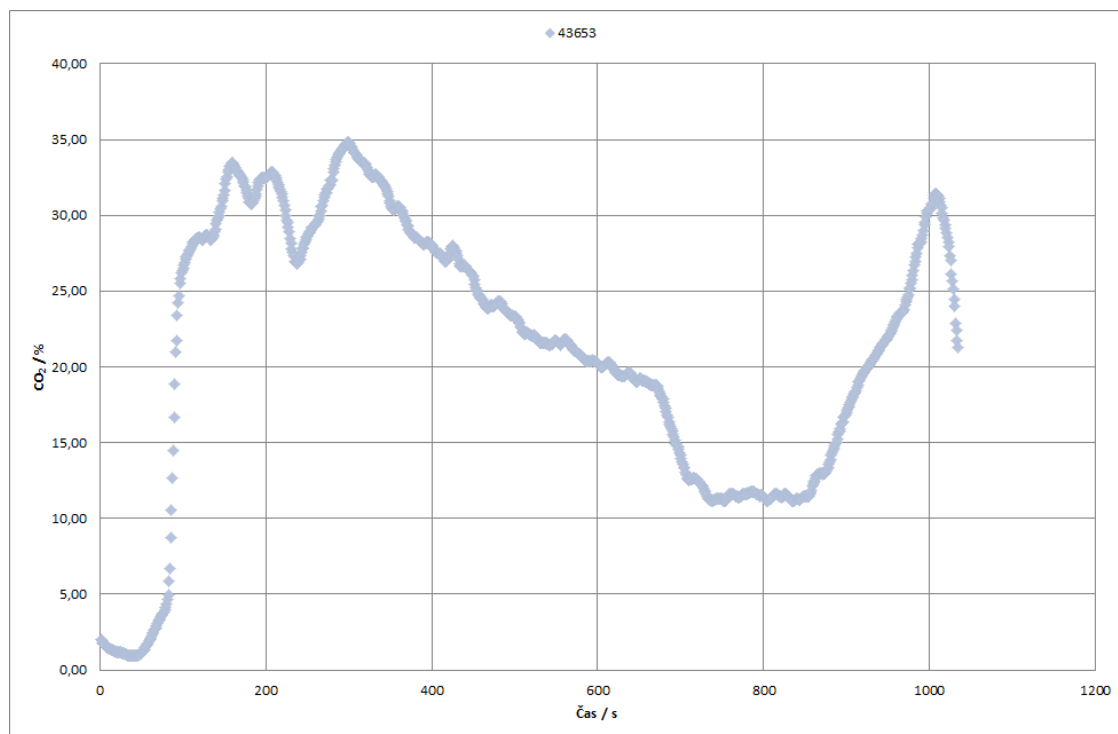
Obr. 9. Relatívna rýchlosť oduhličovania v poslednej štvrtine fúkania

2.2 Gradient koncentrácie CO₂

Metóda vychádza z poznatku, že v priebehoch koncentrácie CO₂ je v závere fúkania prudký nárast a následne pokles. Na Obr. 10 sú znázornené priebehy pre vybrané tavby, resp. na Obr. 11 je priebeh pre tavbu číslo 43653.

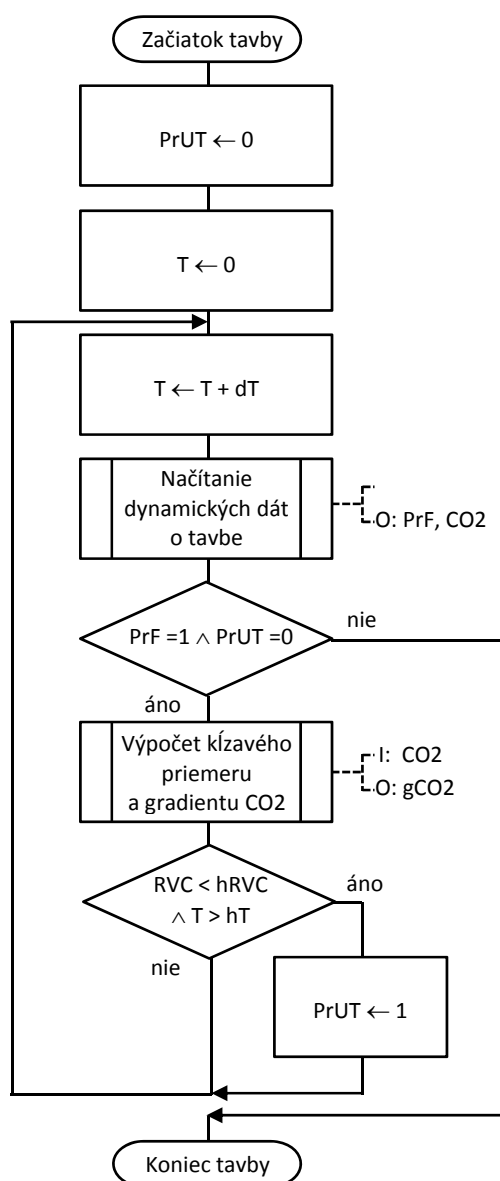


Obr. 10. Priebeh koncentrácie CO₂ pre vybrané tavby



Obr. 11. Priebeh koncentrácie CO₂ pre tavbu číslo 43653

Vzhľadom na priebehy koncentrácie CO_2 , ak by sme sledovali gradient koncentrácie, tak by v závere fúkania hodnota gradientu mala nadobúdať kladné hodnoty a mala by sa zvyšovať. Potom by sa hodnota gradientu mala zmeniť na klesajúce záporné hodnoty.



Obr. 12. Algoritmus realizácie metódy relatívnej rýchlosti oduhličenia

2.2.1 Vstupy a výstupy

Pre realizáciu metódy využívajúcej gradient koncentrácie CO_2 sú potrebné nasledovné vstupy z dynamických dát:

- príznak fúkania kyslíka (OC2_COMM1_K4_FUKANIE, 0/1) – PrF,
- koncentrácia oxidu uhličitého (K4_CO2, obj.%) – CO2.

Výstupom je príznak ukončenia tavby (0/1) – PrUT, ktorý nadobúda hodnoty 0 – nie je koniec fúkania, resp. 1 – koniec fúkania.

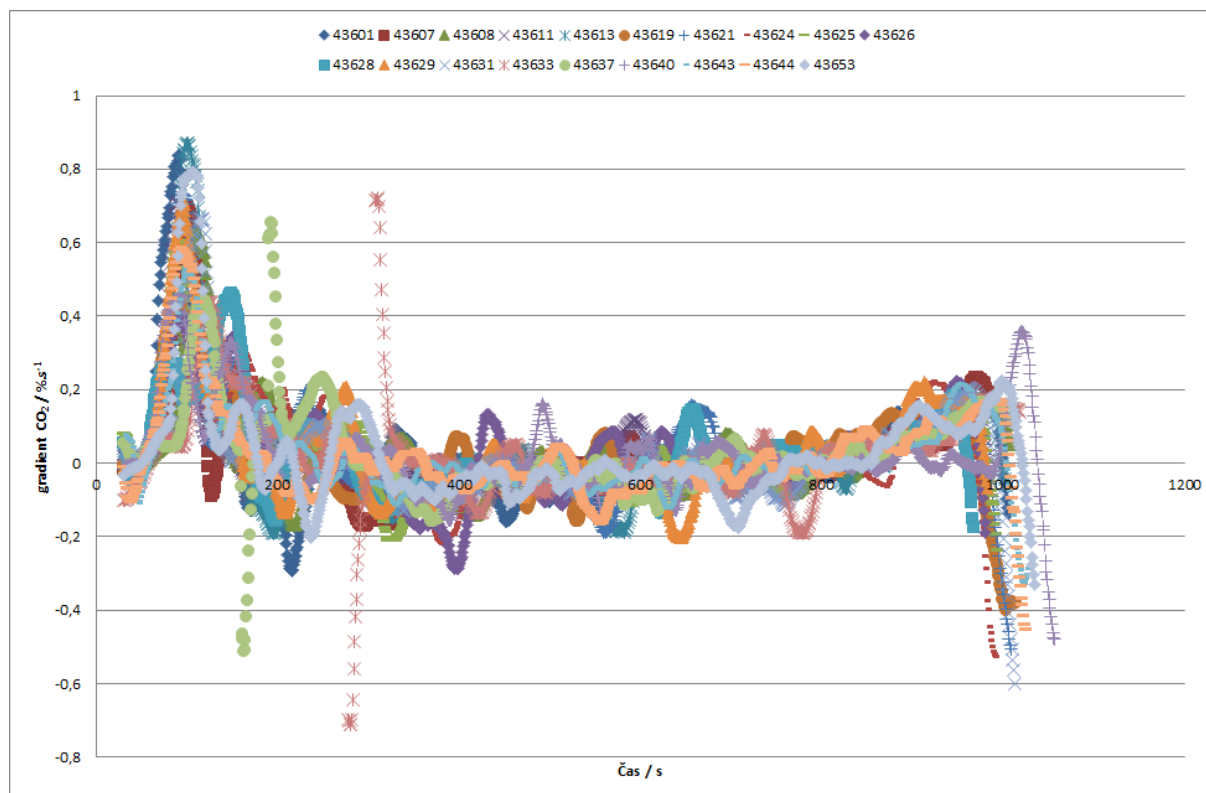
2.2.2 Algoritmus

Algoritmus pre realizáciu metódy využívajúcej gradient CO_2 je znázornený na Obr. 12. Vychádza z načítania dynamických dát, t.j. príznak fúkania (PrF) a koncentráciu CO_2 (CO_2). Pokiaľ prebieha fúkanie, tak sa vypočíta kľzavý priemer koncentrácie CO_2 a následne gradient koncentrácie CO_2 (gCO_2). Potom sa testuje gradient (gCO_2) voči hraničnej hodnote gradientu (hgCO_2) a výsledkom je príznak pre ukončenie tavby (PrUT). Vzhľadom k tomu, že hraničná hodnota gradientu koncentrácie CO_2 by sa mohla vyskytovať aj počas fúkania je potrebné testovať aj čas fúkania (T), t.j. zaujíma nás predovšetkým gradient koncentrácie v poslednej štvrtine fúkania (hT).

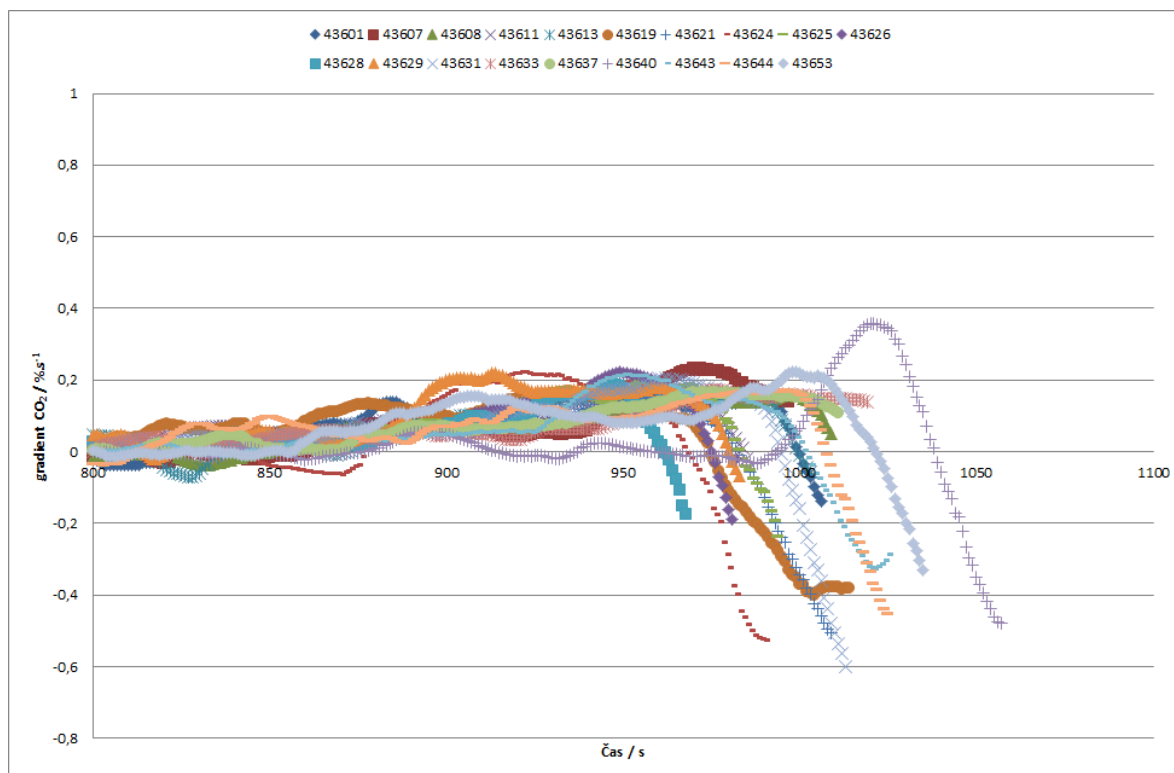
2.2.3 Dosiahnuté výsledky

Navrhnutá metóda bola testovaná na 19 vybraných tavbách číslo 43601, -07, -08, -11, -13, -19, -21, -24, -25, -26, -28, -29, -31, -33, -37, -40, -43, -44, -53. Boli testované rôzne hodnoty pre kľzavý priemer a najvhodnejšia hodnota je z posledných 30 sekúnd. Priemerná hodnota gradientov koncentrácie CO_2 , pri ktorých bolo reálne ukončené fúkanie je -0,2019. Môžeme teda konštatovať, že hraničná hodnota gradientu je -0,2. Podľa tejto hodnoty vyhodnotené časy ukončenia tavieb poukazujú na skoršie, resp. neskoršie ukončenie. V priemere je to iba hodnota -0,68 sekúnd t.j. iba necelú sekundu v priemere by mali končiť testované tavby skôr.

Na Obr. 13 sú znázornené priebehy gradientov u všetkých vybraných tavieb, resp. na Obr. 14 je priebeh gradientov v závere fúkania. Z priebehov je zrejme, že v časoch nad 800 sekúnd hodnoty gradientu klesajú pod hodnotu -0,2 tesne v závere fúkania.



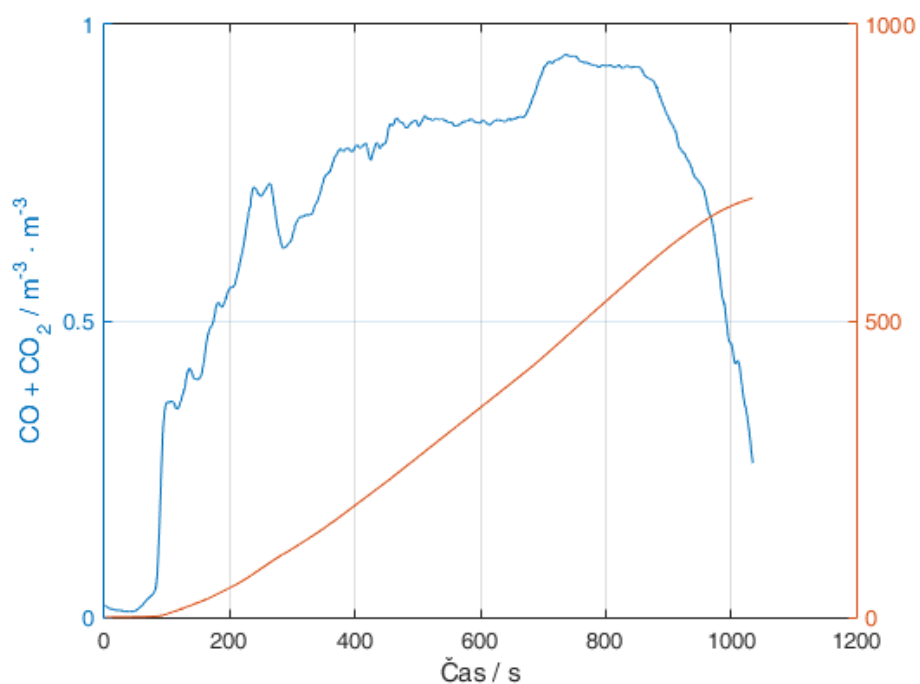
Obr. 13. Priebeh gradientov koncentrácie CO_2 pre vybrané tavby



Obr. 14. Pribeh gradientov koncentrácie CO_2 na konci fúkania

2.3 Bilancia uhlíka z koncentrácie CO a CO_2

Metóda vychádza z predpokladu, že plocha pod krivkou koncentrácie $\text{CO} + \text{CO}_2$ je priamo úmerná uhlíku, ktorý sa priviedol v surovom železe a šrote a následne spálil na CO a CO_2 .



Obr. 15. Pribeh koncentrácie $\text{CO} + \text{CO}_2$ a odpovedajúca plocha

V prípade tavby číslo 43653 je konkrétne hodnota plochy rovná $706.8406 \text{ m}^3\text{m}^{-3}\text{s}$ a množstvo uhlíka na začiatku tavby je 7069.82 kg (Obr. 15). Po skončení tavby vieme stále stanoviť aká bola plocha a aké množstvo uhlíka bolo na začiatku a pre väčšie množstvo vybraných tavieb vieme stanoviť závislosť medzi plochou a množstvom uhlíka. Metóda potom vychádza z predpokladu, že na základe hmotnosti uhlíka na začiatku a známej závislosti určíme plochu na konci tavby. Následne potom počítame plochu priebežne a s nárastom plochy potom úmerne ubúda uhlík. Problém je v stanovení koncentrácie uhlíka, resp. k akej hmotnosti ocele máme vzťahovať hmotnosť uhlíka, aby sme dostali percento uhlíka v oceli. Problém je možné riešiť tak, že dlhodobo sledujeme výťažnosť kovonosnej vsádzky a tým vieme určiť predpokladanú hmotnosť ocele.

2.3.1 Vstupy a výstupy

Pre realizáciu metódy sú potrebné statické a dynamické dáta. V prípade statických sú potrebné nasledujúce vstupy:

- percento C v oceli nastavené operátorom (C_SET , hm.%) – C_{no} ,
- hmotnosť šrotu ($SROT_VAHA$, kg) – H_{sr} ,
- hmotnosť surového železa ($HMOTN_SUZE$, kg) – H_{sz} ,
- percento C v surovom železe (C_SUZE , hm.%) – C_{sz} ,
- výťažnosť ($VYTAZOK$, hm.%) – V_{oc} .

V prípade dynamických dát sú potrebné dáta:

- príznak fúkania kyslíka ($OC2_COMM1_K4_FUKANIE$, 0/1) – PrF ,
- koncentrácia oxidu uhoľnatého ($K4_CO$, obj.%) – CO .
- koncentrácia oxidu uhličitého ($K4_CO2$, obj.%) – $CO2$.

Výstupom je:

- hmotnosť uhlíka (kg) – HmC , resp.
- koncentrácia uhlíka (%) – KoC .

2.3.2 Algoritmus

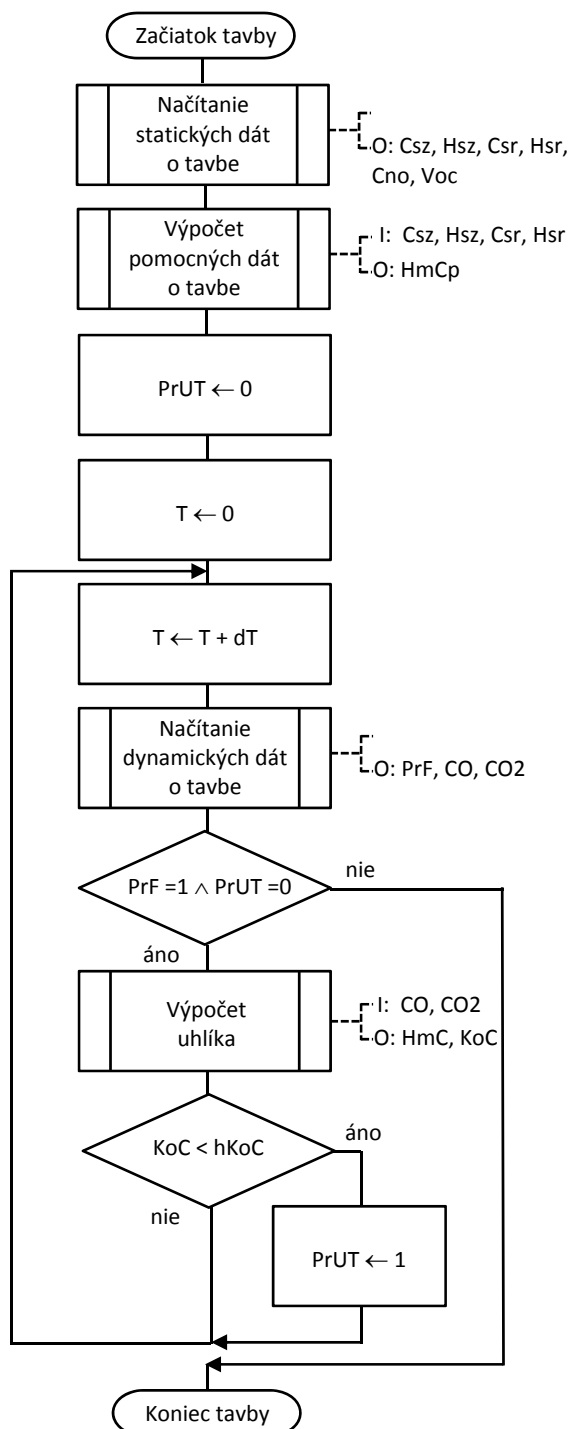
Algoritmus pre realizáciu metódy je znázornený na Obr. 16. Vychádza z načítania statických a dynamických dát, t.j. percento C v oceli nastavené operátorom (C_{no}), hmotnosť šrotu (H_{sr}), hmotnosť surového železa (H_{sz}), percento C v surovom železe (C_{sz}), výťažnosť (V_{oc}), príznak fúkania (PrF), koncentrácia CO (CO) a koncentrácia CO_2 ($CO2$).

2.3.3 Dosiahnuté výsledky

Navrhnutá metóda bola testovaná na vybranej skupine tavieb. Lineárnou aproximáciou bola stanovená závislosť medzi počiatočnou hodnotou uhlíka v kovonosnej vsádzke a plochou pod priebehom CO a CO_2 v tvare

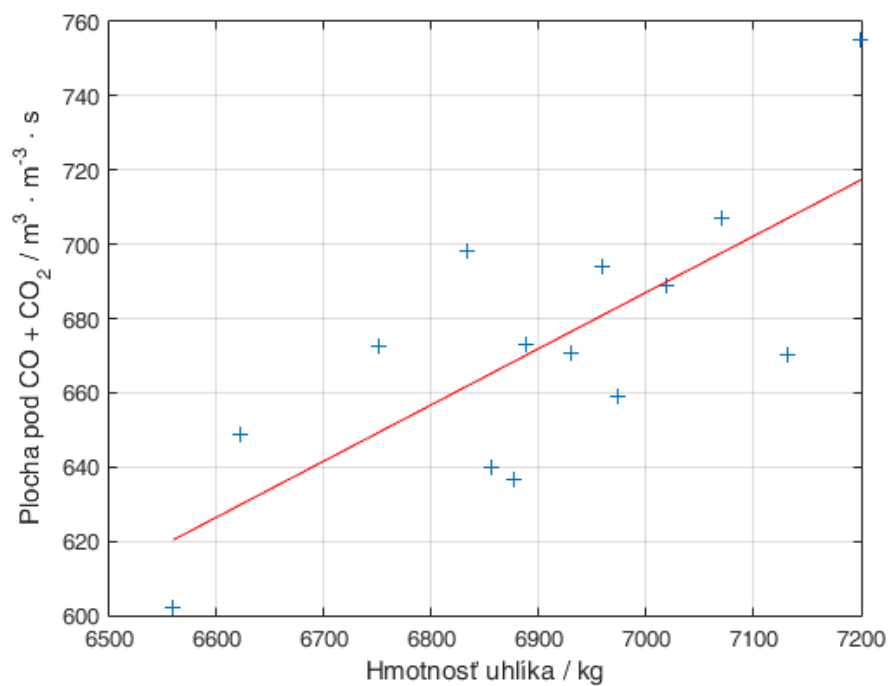
$$P_{CO_CO2} = 0.1515 HmC - 373.3945 \quad (2.4)$$

kde P_{CO_CO2} – plocha pod priebehom CO a CO_2 ($\text{m}^3\text{m}^{-3}\text{s}$), HmC – počiatočná hmotnosť uhlíka v kovonosnej vsádzke (kg).

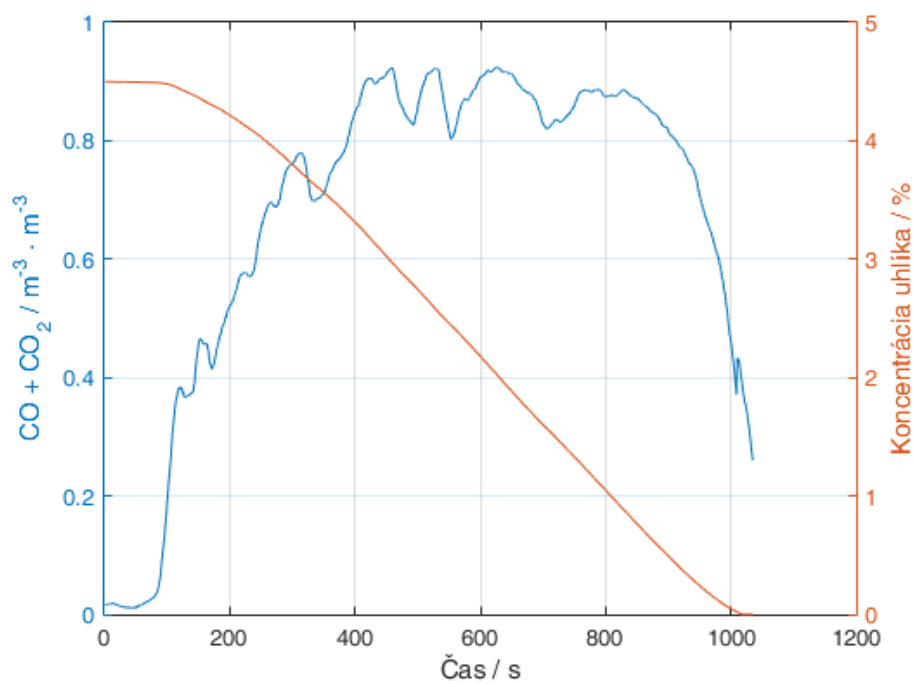


Obr. 16. Algoritmus realizácie metódy bilancie uhlíka z koncentrácie CO a CO₂

Na Obr. 17 je zobrazená závislosť podľa vzťahu (4). Testovanie algoritmu bolo realizované na viacerých tavbách, konkrétny priebeh pre tavbu číslo 43608 je znázornený na Obr. 18. Z priebehu vyplýva, že aj napriek rozkmitanému priebehu súčtu koncentrácie CO a CO₂ je priebeh koncentrácie uhlíka v oceli pomerne hladký a tento priebeh má charakter obrátenej „S“ krivky, t.j. na začiatku procesu je veľmi pomalý pokles uhlíka, nasleduje výrazný pokles, ktorý odpovedá maximálnym hodnotám oduhličenia a v závere sa pokles koncentrácie uhlíka spomalí a blíži sa k nule.



Obr. 17. Závislosť plochy a hmotnosti uhlíka



Obr. 18. Priebeh koncentrácie uhlíka pre tavbu č. 43608

2.4 Metódy s použitím derivácií neceločíselného rádu

Metódy založené na relatívnej rýchlosti, na gradiente koncentrácie CO_2 , resp. na ploche pod obsahom CO a CO_2 vychádzajú z aktuálnej, resp. predchádzajúcej hodnoty koncentrácie CO a CO_2 . Vzhľadom na rozkolísanie hodnôt je preto potrebné uvažovať napríklad kľzavý priemer z posledných napr. 30 sekundových dát. Z toho vyplýva, že na aktuálnu hodnotu nám vplyvajú aj dáta z minulosti, čiže uvažujeme vplyv minulosti, resp. uvažujeme, že prebiehajúci proces má pamäť. Z literárnych zdrojov [2],[3],[4] vieme, že adekvátnejší popis takýchto procesov je s využitím derivácií neceločíselného rádu, ktoré už v samotnej definícii vychádzajú z vplyvu dát z minulosti na súčasnú hodnotu derivácie.

Poznáme viaceré definície derivácie funkcie neceločíselného rádu. Pre naše nasledujúce potreby je vhodná Grünwald-Letnikova definícia, ktorá je daná nasledujúcim vzťahom

$$\frac{d^\alpha}{d\tau^\alpha} f(\tau) \equiv f^{(\alpha)}(\tau) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{\infty} b_j f(\tau - jh) \quad (2.5)$$

pričom koeficient $b_0 = 1$ a pre výpočet b_j je vhodné použiť nasledujúci vzorec

$$b_j = \left(1 - \frac{1+\alpha}{j}\right) b_{j-1} \quad (2.6)$$

V prípade prvej derivácie je koeficient $b_1 = -1$ a všetky nasledujúce b_j , t.j. $j=2, 3, 4 \dots$, sú rovné nule, teda dostávame známu definíciu prvej derivácie v tvare

$$\frac{d}{d\tau} f(\tau) \equiv f^{(1)}(\tau) \approx \frac{f(\tau) - f(\tau-h)}{h} \quad (2.7)$$

a podobne aj v prípade druhej derivácie, kde $b_1 = -2$ a $b_2 = 1$, t.j.

$$\frac{d^2}{d\tau^2} f(\tau) \equiv f^{(2)}(\tau) \approx \frac{f(\tau) - 2f(\tau-h) + f(\tau-2h)}{h^2} \quad (2.8)$$

Avšak napr. pri $1/2$ derivácii sú koeficienty b_j nasledujúce

j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...
b_j	1.0	-0.5	-0.125	-0.0625	-0.0391	-0.0273	-0.0205	-0.0161	-0.0131	...

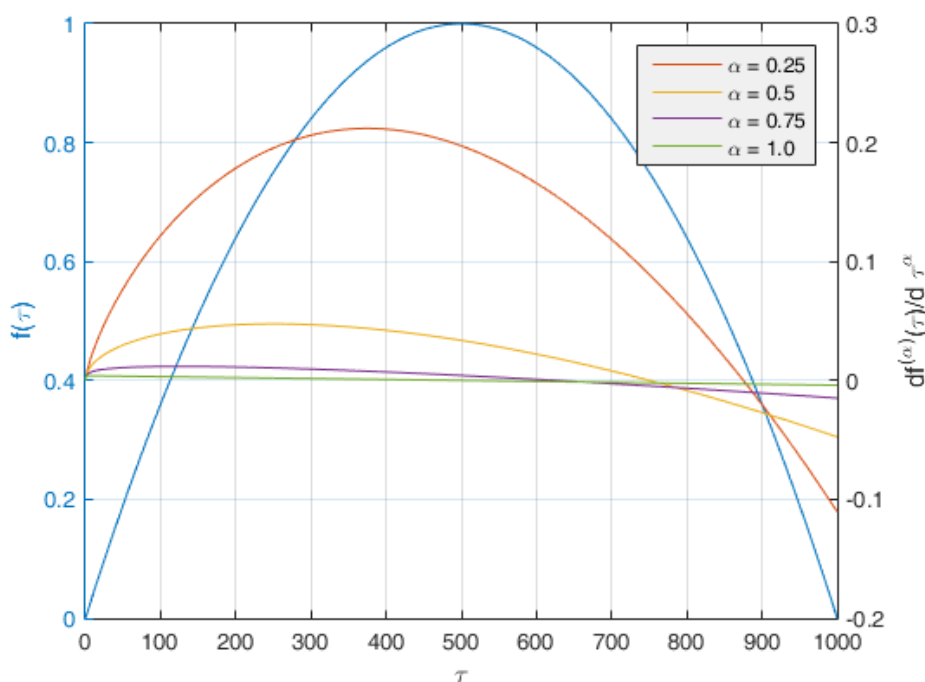
čo znamená, že na hodnotu derivácie nevlýva len hodnota v danom a predchádzajúcom čase (prvá derivácia), resp. v danom a predchádzajúcich dvoch časových krokoch (druhá derivácia), ale v prípade $1/2$ derivácie vplyva nie len hodnota funkcie v danom časovom kroku, ale aj všetky hodnoty v predchádzajúcich časových krokoch, pričom váha vplyvu je daná koeficientom b_j . Hodnoty koeficientov konkrétne pre $1/2$ deriváciu klesajú, teda vplyv minulých dát je menší, a ich súčet sa limitne blíži k hodnote -1 . Vzťah pre deriváciu α má potom nasledujúci tvar

$$\frac{d^\alpha}{d\tau^\alpha} f(\tau) \equiv f^{(\alpha)}(\tau) \approx \frac{f(\tau) + \sum_{j=1}^N b_j f(\tau - jh)}{h^\alpha} \quad (2.9)$$

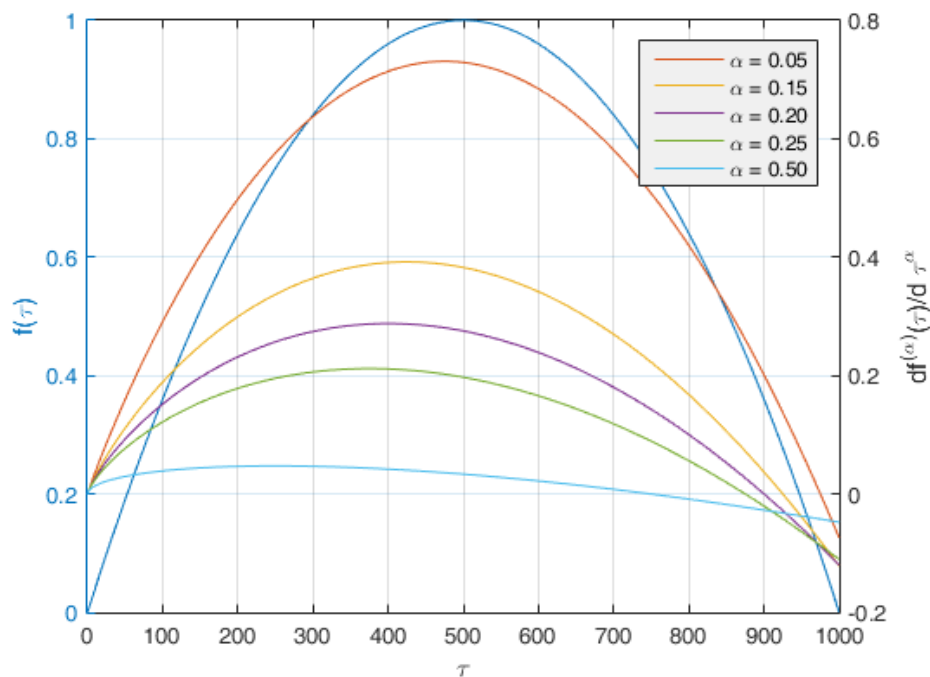
Ak do uvedeného vzťahu dosadíme hodnotu celého rádu, potom dostávame známe vyššie uvedené vzťahy. Okrem vzťahov je možné konštatovať, že aj geometrická interpretácia má

známu všeobecnú podobu, t.j. stále je to podiel rozdielu hodnoty funkcie v danom časovom kroku a sumy hodnôt funkcií v ostatných časových krokoch ku časovému kroku umocnenému na rád derivácie. Vzhľadom k tomu, že proces skujňovania má daný začiatok a trvá daný čas potom pri výpočte derivácie uvažujeme v sume nie nekonečno, ale hodnotu N , t.j. „dĺžku pamäte“, resp. všetky dáta prebiehajúceho procesu od počiatku.

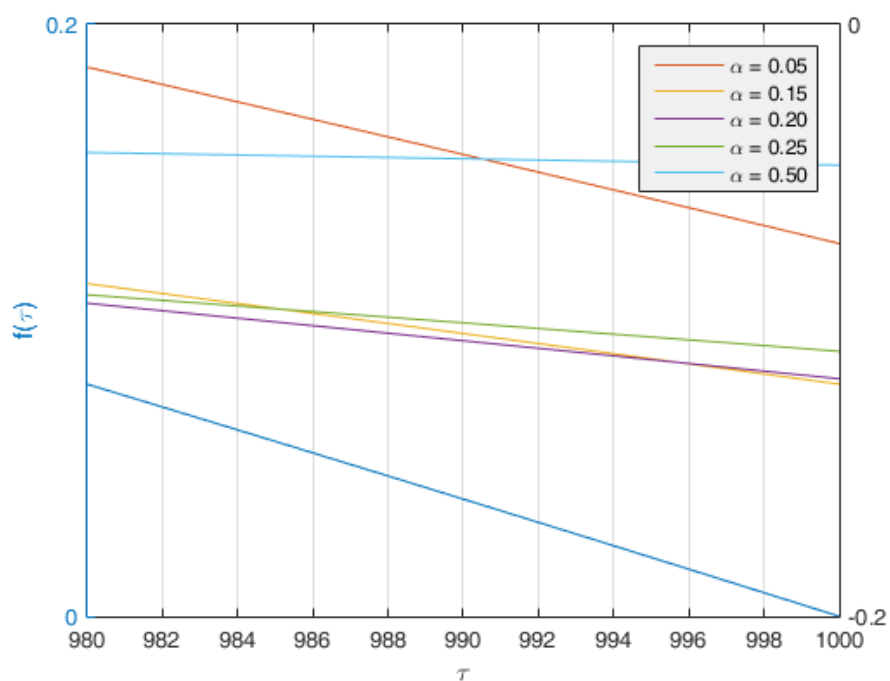
Ak by sme priebehy rýchlosti oduhličovania, relatívnej rýchlosti, alebo priebehu CO_2 v závere procesu zobrazili, tak hovoríme o obrátenej „U“ krivke, ktorú môžeme v ideálnom prípade zobraziť ako parabolu. Na Obr. 19 je zobrazený takýto priebeh a súčasne sú zobrazené derivácie 0.25, 0.5, 0.75 a 1.0. Z obrázku vyplýva, že parabola sa postupne mení s rastúcou hodnotou derivácie na priamku, ktorá je výsledkom prvej derivácie paraboly. Ďalej je vidieť, že v prípade paraboly je začiatok a koniec na hodnote 0, čo je vlastne aj v našom prípade koncentrácia, resp. rýchlosť, ale v prípade derivácií 0.25, 0.5 atď. sa rozdiel mení a je rôzny od 0. Môžeme teda nájsť rád derivácie kedy je rozdiel maximálny a využiť ho pre identifikáciu ukončenia procesu. Na Obr. 20 sú znázornené derivácie 0.05, 0.15, 0.20, 0.25 a 0.5, resp. na Obr. 21 je detailný pohľad na záverečný priebeh, kde vidíme, že maximálny rozdiel je medzi rádom 0.15 a 0.2 konkrétne pre parabolu.



Obr. 19. Priebeh paraboly a jej 0.25, 0.5, 0.75 a 1.0 derivácie

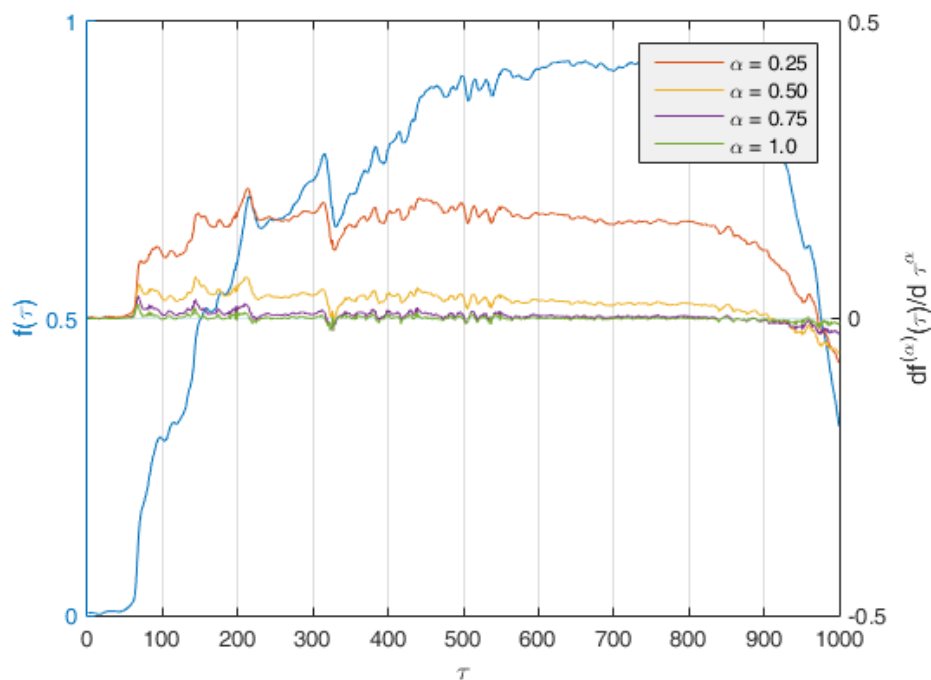


Obr. 20. Priebek paraboly a jej 0.05, 0.15, 0.20, 0.25 a 0.50 derivácie

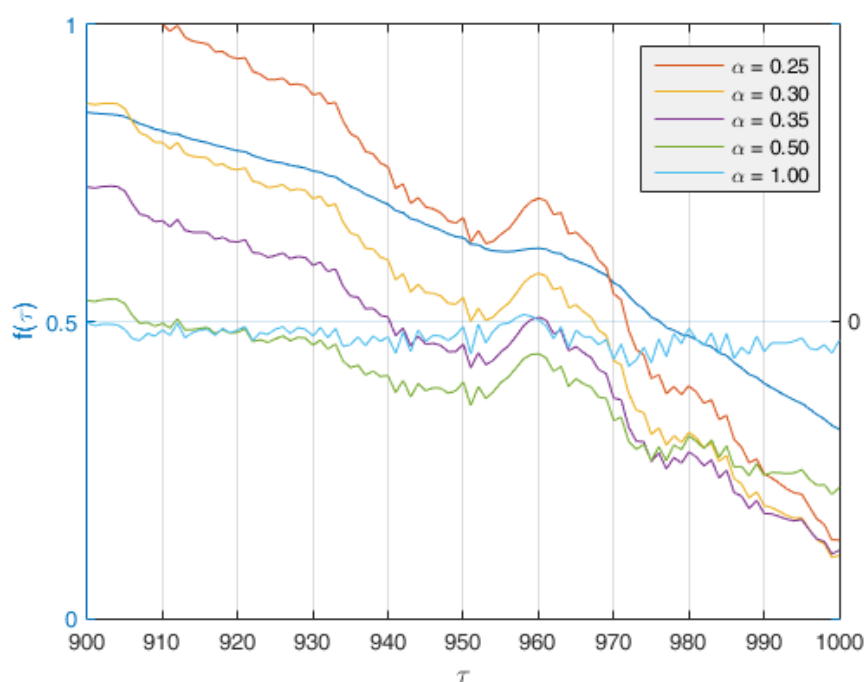


Obr. 21. Detail priebehu paraboly a jej 0.05, 0.15, 0.20, 0.25 a 0.50 derivácie

Podobne to platí aj pre reálne dáta napr. pre tavbu číslo 43601 a pre sumu koncentrácie CO a CO₂, t.j. CO+CO₂/100. Na Obr. 22 je znázornený priebeh a jeho 0.25, 0.5, 0.75 a 1.0 derivácia, resp. na Obr. 23 je jeho detail v závere tavby.



Obr. 22. Časový priebeh CO+CO₂ a jeho 0.25, 0.50, 0.75 a 1.00 derivácia



Obr. 23. Detail časového priebehu CO+CO₂ a jeho 0.25, 0.3, 0.35, 0.5 a 1.00 derivácia

2.4.1 Vstupy a výstupy

Pre realizáciu metódy sú potrebné nasledovné vstupy z dynamických dát:

- príznak fúkania kyslíka (OC2_COMM1_K4_FUKANIE, 0/1) – PrF,
- koncentrácia oxidu uhoľnatého (K4_CO, obj.%) – CO,

- koncentrácia oxidu uhličitého ($K4_CO_2$, obj.%) – CO_2 .

Výstupom je príznak ukončenia tavby (0/1) – PrUT, ktorý nadobúda hodnoty 0 – nie je koniec fúkania, resp. 1 – koniec fúkania.

2.4.2 Algoritmus

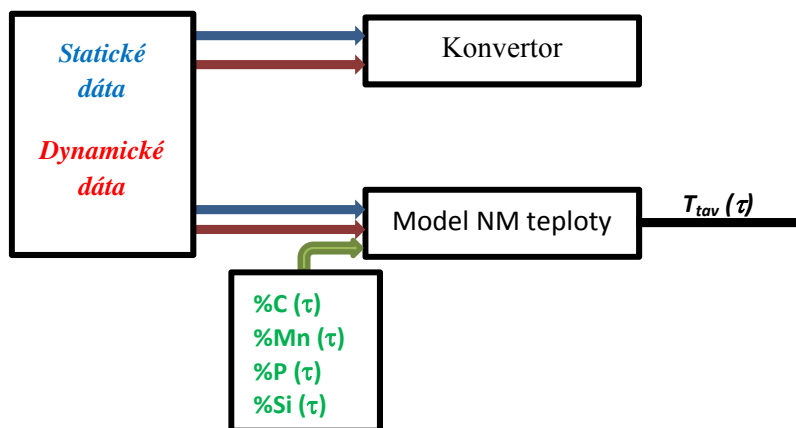
Algoritmus pre realizáciu metódy je obdobný ako v prípade predchádzajúcich metód. Rozdiel je len vo výpočte α derivácie koncentrácie CO_2 , resp. $CO+CO_2$.

2.4.3 Dosiahnuté výsledky

Navrhnutá metóda bola testovaná na 19 vybraných tavných pre sumu koncentrácie $CO+CO_2$. Po vylúčení extrémnych hodnôt v prípade prvej derivácie je priemerná hodnota koncentrácie pri ukončení procesu rovná -0.0052 ± 0.0031 , resp. $\pm 59.87\%$ a v prípade 0.3 derivácie je to hodnota -0.0741 ± 0.0193 , resp. 26.0%. Z uvedených hodnôt je evidentné, že prvá derivácia má nižšie hodnoty a väčší rozptyl. Ak by sme hľadali najmenší rozptyl tak je to pri hodnote derivácie 0.5, t.j. -0.0501 ± 0.0089 , resp. 17.74%. Z literatúry je známe, že 1/2 derivácia intenzívnej veličiny podľa času, napr. teploty, koncentrácie, napätia a pod., je tok extenzívnej veličiny, t.j. tepelný tok, hmotnostný tok, elektrický prúd apod., preto uvedený výsledok odpovedá zisteniam z nameraných dát [2],[4].

3. Model pre nepriame meranie teploty

Model pre nepriame meranie teploty taveniny v konvertore vychádza z deterministického prístupu. Výstupom z modelu je priebeh teploty taveniny v čase. Principiálna schéma modelu, jeho vstupov a výstupov je znázornená na Obr. 24.



Obr. 24. Principiálna schéma modelu pre nepriame meranie teploty

3.1 Vstupy a výstupy

Potrebné vstupy resp. vstupné dáta do modelu môžeme rozdeliť na tri skupiny:

- Statické dáta,
- Dynamické dáta,
- Priebeh koncentrácie uhlíka, mangánu a kremíka.

Statické dáta sú dáta, ktoré model dostáva v zásade na začiatku tavby (napr. číslo akosti, hmotnosť a zloženie surového železa, požadované percentuálne chem. zloženie v oceli, a pod.). Ich označenie, štruktúra a popis je uvedený v predchádzajúcej výskumnej správe [1]. Okrem celkovej hmotnosti šrotu (SROT_VAHA) model uvažuje aj s hmotnosťami pre jednotlivé typy šrotu s rôznym obsahom uhlíka v šrote (Tab. 4).

Medzi potrebné statické dáta (vstupy do modelu) patria:

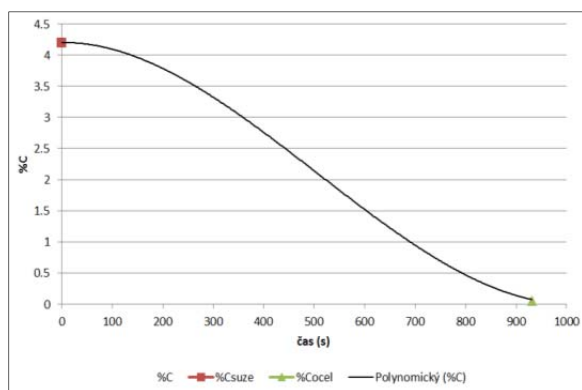
- požadovaná teplota a zloženie ocele,
- teplota a zloženie fúkaného kyslíka,
- hmotnosť, teplota a zloženie vápna,
- hmotnosť, teplota a zloženie dolomitického vápna,
- hmotnosť, teplota a zloženie šrotu,
- hmotnosť, teplota a zloženie surového železa.

Tab. 4. Jednotlivé typy šrotu a ich obsah uhlíka

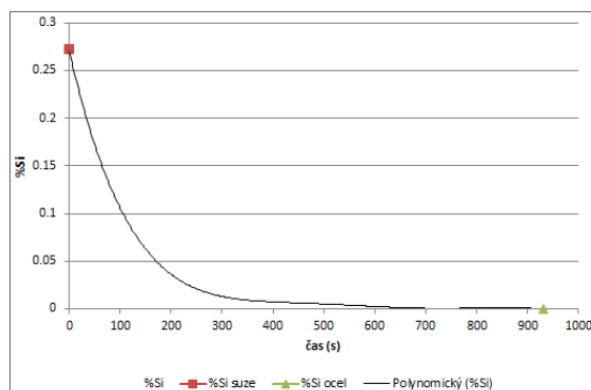
ID	Kód	Popis (EN)	Popis (SK)	C / hm. %
0				4,5
5	HSZ			0,15
6	HSB			0,15
7	HSC			0,005
8	HSK			4,455
9	HSD			0,25
10	HS	Home scrap	Komunálny šrot	0,15
11	PAS	Plate and structural	Šrot z plochej a konštrukčnej ocele	0,2
12	2HM	No.2 Heavy melting scrap	2.Trieda – ťažko taviteľný šrot	0,2
13	1HM	No.1 Heavy melting scrap	1.Trieda – ťažko taviteľný šrot	0,2
14	MCE	Mill crop ends	Šrot z valcovaných a oceľových odrezkov	
20				0
21	1BC	No.1 Baling clips	1.Trieda – Lisovateľný šrot nový	0,05
23	HST	Home scrap tin	Pocínovaný domáci šrot	0,05
24	TBS	Tin busheling scrap	Pocínovaný bušelový šrot	0,05
25	ZBS	Zinc busheling scrap	Pozinkovaný bušelový šrot	0,05
26	SBS	Silicon busheling scrap	Kremíkový bušelový šrot	0,05
27	2BC	No.2 Baling clips	2.Trieda – Lisovateľný šrot starý	0,2
31	1IB	No.1 Industrial bundles	1.Trieda – priemyselné balíky	0,05
33	1DB	No.1 Dealer bundles	1.Trieda – nové balíky	0,05
34	1TB	No.1 Tin bundles	1.Trieda – nové balíky pocínované	0,05
36	2DB	No.2 Dealer bundles	2.Trieda – staré balíky	0,2
41	1SH	No.1 Sheared material	1.Trieda – strihaný materiál	0,2
42	2SH	No.2 Sheared material	2.Trieda – strihaný materiál	0,2
44	1RR	No.1 Rail road scrap	1.Trieda – železničný šrot	0,2
45	TBC	Tin baling clips	Lisovateľný šrot nový – pocínovaný	0,05
46	1SR	No.1 Sheared rebars	1.Trieda – strihané roxory	0,425
51	STS	Steel turnings	Oceľové špony	0,1
59				0,05
60				0,2
61				0,05
63				0,15
74	1BS	No.1 Busheling scrap	1.Trieda – bušelový šrot	0,05
77	SHS	Shredded scrap	Trhaný šrot	0,35
80	TRM			0,2
91	DSI	Desulf station iron	Odsírené surové železo	3,5
92	SKI	Skimmer iron	Odlúčené surové železo	0,2
93	Pig Iron	Pig Iron	Surové železo	4,5
94	1PIT	No.1 Pit scrap	1.Trieda – šrot	0,3
95				0,3
96	2PIT	No.2 Pit scrap	2.Trieda – šrot	0,2
99				1,44

Dynamické dáta sú dáta, ktoré „prichádzajú“ resp. sú merané v priebehu tavby v časovom intervale 1s. Model využíva riadiace veličiny procesu a to výška trysky a objemový prietok fúkaného kyslíka.

Medzi ďalšie potrebné vstupné dáta modelu patria **koncentrácie jednotlivých prímiesí** (%C, %Si, %Mn, %P) v tavenine v priebehu tavby. Keďže model pre výpočet teploty vychádza z tepelnej bilancie, pri ktorej uvažujeme s exotermickými reakciami týchto prímiesí, sú tieto dáta veľmi dôležité. Môžeme ich získať z iného modelu napr. z komplexného modelu pre nepriame meranie teploty a uhlíka. Momentálne model využíva aproximované hodnoty týchto priebehov, ktoré dokáže model vypočítať na začiatku tavby, ak sú známe počiatočné (napr. obsah uhlíka v surovom železe) a konečné hodnoty týchto prímiesí (napr. požadovaný obsah uhlíka v oceli), prípadne ešte jeden bod približne v polovici tavby. Na Obr. 25 je znázornený priebeh aproximovaného uhlíka a na Obr. 26 je aproximovaný priebeh kremíka.



Obr. 25. Aproximovaný priebeh uhlíka



Obr. 26. Aproximovaný priebeh kremíka

3.2 Matematický model teploty taveniny

Rýchlosť zmeny teploty taveniny je počítaná z rýchlostí odstraňovania nežiaducich prímiesí, tavenia šrotu a tavenia vápna. Teplota taveniny sa zvyšuje prostredníctvom tepla uvoľneného pri exotermických reakciách kyslíka s prímiesami kovu. Z hľadiska tepelnej bilancie môžeme rozdeliť teplotu v rámci procesu skujňovania na dodané a spotrebované teplo [8],[9],[10].

Dodané teplo

Teplo uvoľnené pri oxidácii uhlíka

- na oxid uhoľnatý (CO):

$$\frac{dQ_{CO}}{d\tau} = - \left(\frac{\Delta H_{CO}}{M_{HC}} + \frac{M_{HCO}}{M_{HC}} \cdot DT \cdot \frac{C_{pCO}}{M_{HCO}} \right) \cdot \frac{m_{HK}}{100} \cdot \frac{p_{CO}}{p_{cel}} \cdot \left(- \frac{d(\%C)}{d\tau} \right) \quad (J \cdot s^{-1}) \quad (3.1)$$

- a na oxid uhličitý (CO₂):

$$\frac{dQ_{CO_2}}{d\tau} = - \left(\frac{\Delta H_{CO_2}}{M_{HC}} + \frac{M_{HCO_2}}{M_{HC}} \cdot DT \cdot \frac{C_{pCO_2}}{M_{HCO_2}} \right) \cdot \frac{m_{HK}}{100} \cdot \frac{p_{CO_2}}{p_{cel}} \cdot \left(- \frac{d(\%C)}{d\tau} \right) \quad (J \cdot s^{-1}) \quad (3.2)$$

Exotermické teplo z oxidácie kremíka:

$$\frac{dQ_{SiO_2}}{d\tau} = - \left(\frac{\Delta H_{SiO_2}}{MH_{Si}} + \frac{MH_{SiO_2}}{MH_{Si}} \cdot DT \cdot \frac{Cp_{SiO_2}}{MH_{SiO_2}} \right) \cdot \frac{m_{HK}}{100} \cdot \left(- \frac{d(\%Si)}{d\tau} \right) \quad (J \cdot s^{-1}) \quad (3.3)$$

$$\frac{dQ_{Ca_2SiO_4}}{d\tau} = - \left(\frac{\Delta H_{Ca_2SiO_4}}{MH_{Si}} + \frac{MH_{Ca_2SiO_4}}{MH_{Si}} \cdot DT \cdot \frac{Cp_{Ca_2SiO_4}}{MH_{Ca_2SiO_4}} \right) \cdot \frac{m_{HK}}{100} \cdot \left(- \frac{d(\%Si)}{d\tau} \right) \quad (J \cdot s^{-1}) \quad (3.4)$$

mangánu:

$$\frac{dQ_{MnO}}{d\tau} = - \left(\frac{\Delta H_{MnO}}{MH_{Mn}} + \frac{MH_{MnO}}{MH_{Mn}} \cdot DT \cdot \frac{Cp_{MnO}}{MH_{MnO}} \right) \cdot \frac{m_{HK}}{100} \cdot \left(- \frac{d(\%Mn)}{d\tau} \right) \quad (J \cdot s^{-1}) \quad (3.5)$$

fosforu:

$$\frac{dQ_{Ca_4P_2O_9}}{d\tau} = - \left(\frac{\Delta H_{Ca_4P_2O_9}}{MH_P} + \frac{MH_{Ca_4P_2O_9}}{MH_P} \cdot DT \cdot \frac{Cp_P}{MH_P} \right) \cdot \frac{m_{HK}}{100} \cdot \left(- \frac{d(\%P)}{d\tau} \right) \quad (J \cdot s^{-1}) \quad (3.6)$$

železa:

$$\frac{dQ_{FeO}}{d\tau} = - \left(\Delta H_{Fe-FeO} \cdot \frac{55.85}{MH_{FeO}} + Cp_{FeO} \cdot DT \right) \cdot \left(\frac{d(m_{FeO})}{d\tau} \right) \quad (J \cdot s^{-1}) \quad (3.7)$$

kde m_{HK} – hmotnosť horúceho kovu, DT - teplotný rozdiel medzi počiatočnou a momentálnou teplotou kúpeľa ($^{\circ}C$), ΔH - reakčné teplo ($J \cdot mol^{-1}$), M - molová hmotnosť ($g \cdot mol^{-1}$), Cp - priemerná špecifická tepelná kapacita ($J \cdot K^{-1}$), P - parciálny tlak (Pa).

Spotrebované teplo

Teplo na ohrev a tavenie šrotu:

$$\frac{dQ_{srot}}{d\tau} = \Delta m_{srot} \cdot Cp_{srot} \cdot (T_{tav_{srot}} - T_{0_{srot}}) + \Delta m_{srot} \cdot Q_{tav_{srot}} + \Delta m_{srot} \cdot Cp_{srot} \cdot (1650 + Tk - T_{tav_{srot}}) \quad (J \cdot s^{-1}) \quad (3.8)$$

Teplo na rozklad vápenca:

$$\frac{dQ_{vap}}{d\tau} = q_{vap} \cdot \Delta m_{vap} \quad (J \cdot s^{-1}) \quad (3.9)$$

Do spotrebovaného tepla je potrebné zahrnúť aj straty tepla (dQ_{straty}), ktoré nevieme jednoznačne vypočítať. Medzi straty tepla môžeme zaradiť napr. straty tepla v spaliniach, straty tepla do výmurovky a pod.

Potom celkové teplo:

$$\frac{d(CHK \cdot m_{HK} \cdot T_{HK})}{d\tau} = 0.96 \cdot \frac{dQ_{CO}}{d\tau} + 0.04 \cdot \frac{dQ_{CO_2}}{d\tau} + \frac{dQ_{SiO_2}}{d\tau} + \frac{dQ_{Ca_2SiO_4}}{d\tau} + \frac{dQ_{MnO}}{d\tau} + \frac{dQ_{Ca_4P_2O_9}}{d\tau} + \frac{dQ_{FeO}}{d\tau} + \frac{dQ_{plamen}}{d\tau} - \frac{dQ_{srot}}{d\tau} - \frac{dQ_{vap}}{d\tau} - \frac{dQ_{straty}}{d\tau} \quad (J \cdot s^{-1}) \quad (3.10)$$

Rýchlosť ohrievania tekutého kovu (taveniny):

$$v_T = \frac{Q^{dodané} - Q^{spotrebované}}{C_{HK} \cdot m_{HK} + C_{TR} \cdot m_{TR}} \quad (^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (3.11)$$

Teplota tekutého kovu sa potom vypočíta ako:

$$t_{HK} = t_{suze} + \int_0^\tau v_T d\tau \quad (^\circ\text{C}) \quad (3.12)$$

3.3 Algoritmus a procedúry modelu

Algoritmus modelu pre nepriame meranie teploty je rozdelený do troch nasledovných základných častí (blokov):

- Vstupná časť
- Cyklická časť
- Výstupná časť

Vstupná časť

Vo vstupnej časti sú načítané statické dáta pred tavbou resp. pred samotným výpočtom teploty taveniny. Táto časť pozostáva z nasledovných procedúr:

- Nacitanie_stat_dat_vstup – načítanie statických dát o surovom železe (teplota, hmotnosť, zloženie)
- Nacitanie_stat_dat_vystup – načítanie statických dát – žiadaných o oceli (teplota a zloženie)
- CitajZlozSrot - načítanie tabuľky so zložením jednotlivých šrotov podľa kódu
- CitajHmotSrot - načítanie kódov a hmotností šrotu použitých pre tavbu
- ZlozHmotSrotu - výpočet zloženia a hmotnosti výsledného šrotu pre tavbu
- Vsadzanie – načítanie hmotností troskotvorných prísad
- Pociatocny_stav – nastavenie počiatočných hodnôt veličín pred spustením výpočtu

Cyklická časť

V cyklickej časti sa procedúry opakujú v cykle. Časová hodnota pre jeden cyklus je nastavená na 1s (samozrejme je možné ju nastaviť aj na inú hodnotu). Ide o nasledovné procedúry:

- Rezim_fukania – načítanie dynamických riadiacich veličín (výška trysky a objemový tok fúkaného kyslíka), v súčasnosti sú tieto dáta načítané z textového súboru
- Hustota – výpočet hustoty taveniny a trosky v závislosti na teplote a zložení
- Uhlik – výpočet percentuálneho obsahu uhlíka v tavenine, v súčasnosti pomocou aproximácie

- Kremik – výpočet percentuálneho obsahu kremíka v tavenine, v súčasnosti pomocou aproximácie
- Mangan – výpočet percentuálneho obsahu mangánu v tavenine, v súčasnosti pomocou aproximácie
- Fosfor – výpočet percentuálneho obsahu fosforu v tavenine, v súčasnosti pomocou aproximácie
- Teplota – výpočet teploty taveniny na základe uvedeného matematického modelu

Výstupná časť

Výstupná časť algoritmu zabezpečuje výpočet odchýlky modelovej teploty od nameranej teploty na konci tavby. Táto odchýlka je vyjadrená pomocou absolútnej a relatívnej odchýlky.

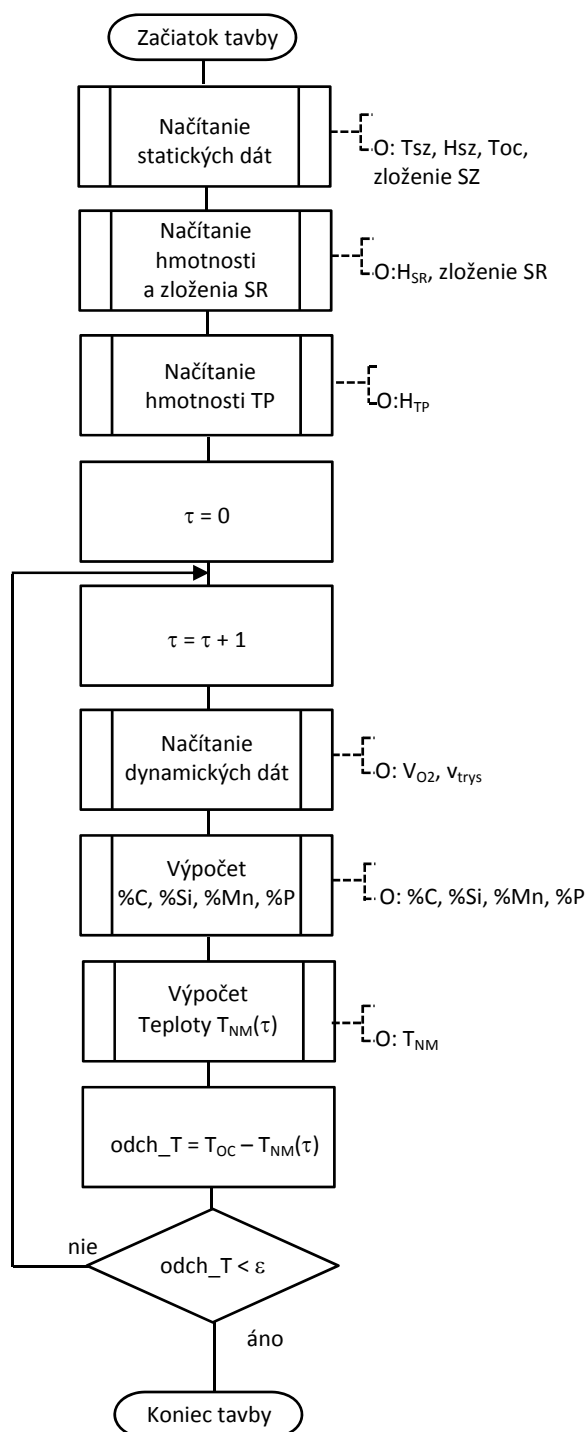
$$\Delta T_{abs} = abs(T^{NM} - T^{mer}) \quad (^\circ\text{C}) \quad (3.13)$$

$$\Delta T_{rel} = \frac{abs(T^{NM} - T^{mer})}{T^{mer}} 100 \quad (\%) \quad (3.14)$$

kde T^{NM} je teplota ocele na konci tavby podľa modelu, T^{mer} je meraná teplota ocele na konci tavby.

Taktiež v tejto časti algoritmu dochádza k zápisu vypočítaných dát do textových súborov a vykresleniu priebehu nepriamo meranej teploty.

Stručný modelu pre nepriame meranie teploty je zobrazený na Obr. 27.

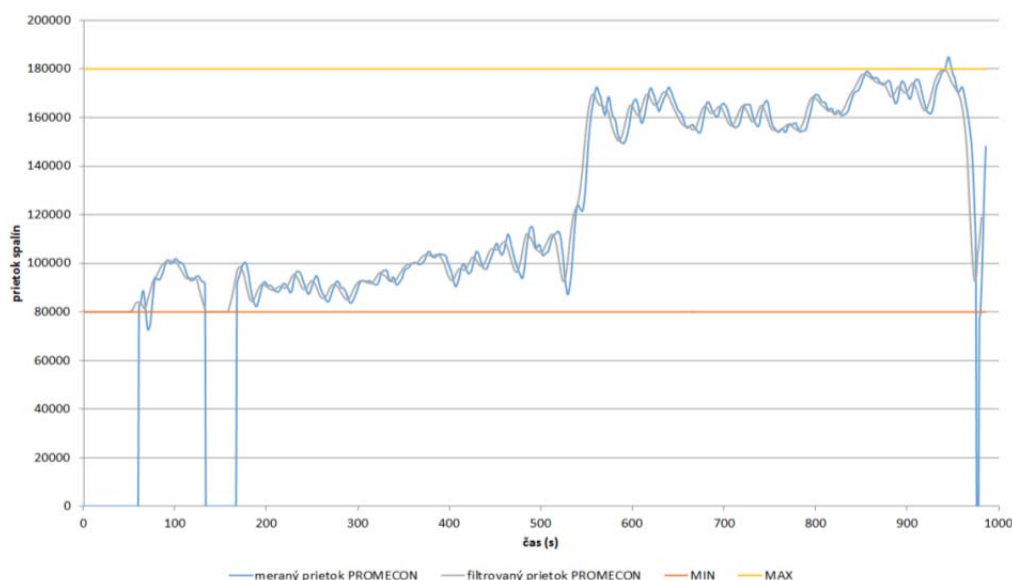


Obr. 27. Algoritmus modelu teploty

3.4 Dosiahnuté výsledky

Overenie modelu bolo realizované na vzorke 19 tavieb z obdobia 7/2018. Boli vybrané tavby bez prerušenia a zároveň bol u týchto tavieb nameraný (bez väčších výpadkov) objemový prietok spalín pomocou PROMECON. Uvedený model pre nepriame meranie teploty nepotrebuje ako vstup objemový prietok spalín, ale komplexný model áno. Z toho dôvodu sme sa rozhodli pre výber tavieb s meraným prietokom spalín. Namerané dáta

prietoku spalín u vybraných tavieb boli filtrované na maximálnu a minimálnu hranicu a následne upravené kľzavým priemerom. Na Obr. 28 je uvedený nameraný a filtrovaný priebeh objemového prietoku spalín pre tavbu 43611.



Obr. 28. Objemový prietok spalín PROMECON

V Tab. 5 sú uvedené výsledky modelu pre nepriame meranie teploty pre prípad, keď sme uvažovali s nulovými tepelnými stratami ($koef_Qstraty = 0\%$). Priemerná relatívna odchýlka z 19-ich tavieb je 11.05%, čo predstavuje cca 180°C. Ako môžeme vidieť, u všetkých tavieb je nepriamo meraná teplota (vypočítaná modelom) vyššia ako nameraná teplota. Je zrejmé, že v tepelnej bilancii je vyššia hodnota na strane dodaného tepla, čo zodpovedá aj vyššej hodnote vypočítanej teploty

Tab. 5. Výsledky modelu pre nulové straty (priemerná relatívna odchýlka 11.05%)

tavba	T^{mer} (°C)	T^{NM} (°C)	ΔT_{abs} (°C)	ΔT_{rel} (%)
43601	1687.00	1959.20	-272.20	16.14
43607	1655.00	1861.77	-206.77	12.49
43608	1653.00	1810.00	-157.00	9.50
43611	1648.00	1822.92	-174.92	10.61
43613	1676.00	1836.64	-160.64	9.59
43619	1702.00	1957.90	-255.90	15.04
43621	1668.00	1871.15	-203.15	12.18
43624	1647.00	1850.11	-203.11	12.33
43625	1654.00	1824.31	-170.31	10.30
43626	1656.00	1848.24	-192.24	11.61
43628	1612.00	1774.06	-162.06	10.05
43629	1642.00	1768.46	-126.46	7.70
43631	1610.00	1808.29	-198.29	12.32
43633	1657.00	1848.51	-191.51	11.56

43637	1657.00	1851.33	-194.33	11.73
43640	1668.00	1883.04	-215.04	12.89
43643	1625.00	1742.82	-117.82	7.25
43644	1665.00	1757.95	-92.95	5.58
43653	1688.00	1876.02	-188.02	11.14

V Tab. 6 sú uvedené výsledky modelu pre nepriame meranie teploty pre 10 a 20% straty tepla. Pri 10% stratách tepla je priemerná relatívna odchýlka 5.28% (cca 87°C) a takmer všetky tavby (s výnimkou tavby 43644) dosiahli vyššiu nepriamo meranú teplotu ako bola nameraná. To svedčí o tom, že straty tepla sú stále malé. Z toho dôvodu sme zvýšili koeficient strát na 20% a dosiahli sme priemernú relatívnu odchýlku už len 2.02% (cca 33°C). Najväčšia odchýlka je u tavby 43644 a to 101°C a druhá najväčšia odchýlka u tavby 43643 a to 91°C. U oboch tavbách je nepriamo meraná teplota nižšia ako nameraná teplota. V Tab. 7 je uvedená početnosť tavieb v jednotlivých triedach presnosti pre koeficient strát 20%. 10 tavieb (52%) má absolútnu odchýlku do 24°C a 8 tavieb (42%) do 16°C.

Tab. 6. Výsledky modelu pre 10% a 20% straty tepla

tavba	T^{mer} (°C)	koef_Qstraty = 10%			koef_Qstraty = 20%		
		T^{NM} (°C)	ΔT_{abs} (°C)	ΔT_{rel} (%)	T^{NM} (°C)	ΔT_{abs} (°C)	ΔT_{rel} (%)
43601	1687.00	1862.92	-175.92	10.43	1765.05	-78.05	4.63
43607	1655.00	1769.30	-114.30	6.91	1675.90	-20.90	1.26
43608	1653.00	1713.60	-60.60	3.67	1615.23	37.77	2.29
43611	1648.00	1730.12	-82.12	4.98	1634.99	13.01	0.79
43613	1676.00	1742.98	-66.98	4.00	1647.55	28.45	1.70
43619	1702.00	1868.97	-166.97	9.81	1778.96	-76.96	4.52
43621	1668.00	1782.83	-114.83	6.88	1693.27	-25.27	1.52
43624	1647.00	1753.92	-106.92	6.49	1655.79	-8.79	0.53
43625	1654.00	1728.76	-74.76	4.52	1631.24	22.76	1.38
43626	1656.00	1755.02	-99.02	5.98	1659.39	-3.39	0.20
43628	1612.00	1678.51	-66.51	4.13	1580.85	31.15	1.93
43629	1642.00	1673.08	-31.08	1.89	1575.62	66.38	4.04
43631	1610.00	1707.36	-97.36	6.05	1604.10	5.90	0.37
43633	1657.00	1748.82	-91.82	5.54	1647.14	9.86	0.59
43637	1657.00	1753.45	-96.45	5.82	1653.52	3.48	0.21
43640	1668.00	1780.85	-112.85	6.77	1675.83	-7.83	0.47
43643	1625.00	1640.16	-15.16	0.93	1533.87	91.13	5.61
43644	1665.00	1662.38	2.62	0.16	1564.14	100.86	6.06
43653	1688.00	1779.95	-91.95	5.45	1682.16	5.84	0.35

Tab. 7. Početnosť tavieb v jednotlivých triedach presnosti

ΔT_{abs}	Počet	Cumulative %
8	5	26.32%
16	3	42.11%
24	2	52.63%
32	3	68.42%
40	1	73.68%
nad	5	100.00%

V nasledovnom kroku sme sa snažili nájsť na uvedených tavných najlepší koeficient strát (*koef_Qstraty*) tak, že pre každú tavbu sme nastavili tento koeficient tak, aby bola odchýlka medzi nepriamo meranou teplotou a nameranou teplotou minimálne (do 0.5%). V Tab. 8 sú uvedené dosiahnuté výsledky koeficientov spolu s relatívnou odchýlkou. Vidíme, že hodnota koeficientu strát sa pohybuje v intervale od 10 do 27% (dve najmenšie hodnoty koeficientu u tavieb 43643 a 43644). Priemerná hodnota koeficientu strát je 18.98%. V Tab. 9 sú uvedené výsledky modelu s koeficientom strát 18.98%. Dosiahnutá priemerná absolútna odchýlka je 32°C a u 11-ich tavieb (58%) je odchýlka teploty do 24°C a u 7-ich tavieb (37%) do 16°C (Tab. 10).

Tab. 8. Koeficient strát pre jednotlivé tavby

tavba	koef_Qstraty	ΔT_{rel} (%)
43601	27.75	0.02
43607	22.23	0.07
43608	16.21	0.01
43611	18.57	0.05
43613	17.07	0.02
43619	27.38	0.49
43621	23.03	0.19
43624	20.79	0.02
43625	17.67	0.00
43626	20.23	0.03
43628	16.83	0.03
43629	13.25	0.06
43631	19.67	0.19
43633	19.67	0.42
43637	19.67	0.04
43640	20.75	0.05
43643	10.85	0.37
43644	9.75	0.01
43653	19.19	0.10
priemer	18.98	

Tab. 9. Výsledky modelu pre koef_Qstraty = 18.98%

tavba	T^{mer} (°C)	T^{NM} (°C)	ΔT_{abs} (°C)	ΔT_{rel} (%)
43601	1687.00	1774.70	-87.70	5.20
43607	1655.00	1684.52	-29.52	1.78
43608	1653.00	1624.96	28.04	1.70
43611	1648.00	1644.88	3.12	0.19
43613	1676.00	1656.98	19.02	1.13
43619	1702.00	1787.76	-85.76	5.04
43621	1668.00	1701.51	-33.51	2.01
43624	1647.00	1665.50	-18.50	1.12
43625	1654.00	1640.90	13.10	0.79
43626	1656.00	1668.84	-12.84	0.78
43628	1612.00	1589.81	22.19	1.38
43629	1642.00	1584.63	57.37	3.49
43631	1610.00	1614.43	-4.43	0.28
43633	1657.00	1657.29	-0.29	0.02
43637	1657.00	1663.43	-6.43	0.39
43640	1668.00	1686.22	-18.22	1.09
43643	1625.00	1544.54	80.46	4.95
43644	1665.00	1573.86	91.14	5.47
43653	1688.00	1691.82	-3.82	0.23

Tab. 10. Početnosť tavieb v jednotlivých triedach presnosti

ΔT_{abs}	Počet	Cumulative %
8	5	26.32%
16	2	36.84%
24	4	57.89%
32	2	68.42%
40	1	73.68%
nad	5	100.00%

Po vylúčení dvoch tavieb s najhoršími výsledkami (43601 a 43644) sme dosiahli priemernú relatívnu odchýlku 1.55% a priemernú absolútnu odchýlku 25°C (Tab. 11) a 65% tavieb má odchýlku teploty do 24°C a 41% tavieb do 16°C (Tab. 12).

Tab. 11. Výsledky modelu po vylúčení tavieb 43601 a 43644 pre koef_Qstraty = 19%

tavba	T^{mer} (°C)	T^{NM} (°C)	ΔT_{abs} (°C)	ΔT_{rel} (%)
43607	1655.00	1684.52	-29.52	1.78
43608	1653.00	1624.96	28.04	1.70
43611	1648.00	1644.88	3.12	0.19
43613	1676.00	1656.98	19.02	1.13
43619	1702.00	1787.76	-85.76	5.04
43621	1668.00	1701.51	-33.51	2.01
43624	1647.00	1665.50	-18.50	1.12
43625	1654.00	1640.90	13.10	0.79
43626	1656.00	1668.84	-12.84	0.78
43628	1612.00	1589.81	22.19	1.38
43629	1642.00	1584.63	57.37	3.49
43631	1610.00	1614.43	-4.43	0.28
43633	1657.00	1657.29	-0.29	0.02
43637	1657.00	1663.43	-6.43	0.39
43640	1668.00	1686.22	-18.22	1.09
43643	1625.00	1544.54	80.46	4.95
43653	1688.00	1691.82	-3.82	0.23

Tab. 12. Početnosť tavieb v jednotlivých triedach presnosti

ΔT_{abs}	Počet	Cumulative %
8	5	29.41%
16	2	41.18%
24	4	64.71%
32	2	76.47%
40	1	82.35%
nad	3	100.00%

3.5 Analýza dosiahnutých výsledkov

Na základe dosiahnutých výsledkov modelu pre nepriame meranie teploty na vzorke 19-ich tavieb sme previedli analýzu výsledkov z hľadiska presnosti modelu. Presnosť modelu sme posudzovali na základe absolútnej (3.13) a relatívnej (3.14) odchýlky. V Tab. 13 sú uvedené nasledovné dáta potrebné pre analýzu:

- Číslo tavby,
- Nameraná teplota ocele (T^{mer}),
- Nepriamo meraná (modelová) teplota ocele (T^{NM}),
- Absolútna odchýlka ($T_{odch_{abs}}$),
- Dodané teplo (Q_{dod}),
- Spotrebované teplo (Q_{spotr}),

- Rozdiel dodaného a spotrebovaného tepla (ΔQ),
- Rozdiel teploty ocele a surového železa (ΔT),
- Pomer rozdielu tepla k rozdielu teploty ($\Delta Q/\Delta T$).

Prvé dve tavby (43633, 43637) sú považované z hľadiska výsledkov za dobré tavby, absolútna odchýlka medzi modelom a nameranou teplotou je 0.29 resp. 6.43°C. U týchto tavieb je pomer $\Delta Q/\Delta T$ cca 120 000 kJ/°C, tzn. že približne 120 000 kJ tepla potrebujeme a ohriatie tavby o 1°C. Ostatné tavby sú z hľadiska dosiahnutých výsledkov považované za zlé tavby, lebo dosiahli vysoké absolútne odchýlky. Dve z uvedených tavieb sú s modelovou teplotou (NM) nad nameranou teplotou a dve pod. U tavieb s modelovou teplotou nad nameranou je pomer $\Delta Q/\Delta T$ cca 150 000 kJ/°C (vysoký) a u tavieb pod nameranou teplotou je tento pomer malý cca 80 000 kJ/°C. Po tejto analýze sme porovnávali vstupy, ktoré vplývajú v rámci tepelnej bilancie na výsledky modelu. Pri porovnaní sme zistili nasledovné:

- U tavby 43601 je pomerne vysoká teplota surového železa (1367°C) a vysoký obsah kremíka v surovom železe (0.765%). V modeli sa to prejaví na strane dodaného tepla ako v podobe fyzikálneho tepla surového železa resp. tepla z exotermických reakcií.
- U tavby 43619 je malá hmotnosť šrotu (25 200 kg), čo sa v modeli prejaví na strane spotrebovaného tepla, ktorého je potrebné menej na ohriatie a tavenie menšieho množstva šrotu.
- U tavby 43643 je pomerne nízka teplota surového železa (1288°C) a zároveň nižšia hmotnosť surového železa, čo sa v modeli prejaví v podobe nižšieho fyzikálneho tepla získaného zo surového železa (Q_{dod}).
- U tavby 43644 je tiež pomerne nízka teplota surového železa (1267°C), čo sa taktiež prejaví v podobe nižšieho fyzikálneho tepla získaného zo surového železa (Q_{dod}).

Tab. 13. Analýza výsledkov modelu pre NM teploty

tavba	T^{mer} (°C)	T^{NM} (°C)	$T_{odch_{abs}}$ (°C)	Q_{dod}	Q_{spotr}	ΔQ	ΔT	$\Delta Q/\Delta T$	poznámka
43633	1657	1657.3	-0.29	120 279 487	87 186 661	33 092 826	280.2	118 101	
43637	1657	1663.4	-6.43	124 171 663	81 871 242	42 300 421	343.3	123 206	
43601	1687	1774.7	-87.70	124 287 107	74 375 050	49 912 057	319.4	156 257	vysoká T_{suze} (1367°C), vysoký obsah Si v suze (0.765%)
43619	1702	1787.8	-76.96	121 002 216	61 572 423	59 429 794	386.1	153 914	málo šrotu (25200 kg)
43643	1625	1544.5	80.46	118 468 806	91 183 520	27 285 285	336.2	81 169	nízka T_{suze} (1288°C), nižšia hm. suze (145600 kg)
43644	1665	1573.9	91.14	114 884 432	79 498 742	35 385 691	397.4	89 034	nízka T_{suze} (1267°C)

Na základe uvedenej analýzy je zrejmé, že u niektorých tavieb je potrebné, aby bol koeficient strát (*koef_Qstraty*) väčší a u niektorých menší. My sme doteraz uvažovali s konštantou hodnotou tohto koeficienta (pozri kap. Obr. 27). Ako je vidieť, najväčší vplyv na model zo statických dát, ktoré sú známe pred tavnou, majú:

- Teplota surového železa,
- Hmotnosť šrotu
- Hmotnosť surového železa.

Preto sme sa rozhodli zvoliť koeficient strát nie ako konštantu, ale ako lineárnu funkciu (model) na statických dátach. Postupne sme do tohto modelu dopĺňali uvedené statické dáta, čím vznikli tri modely pre výpočet koeficienta strát.

$$koef_{Qstraty} = a_0 + a_1 T_{suze} \quad (3.15)$$

$$koef_{Qstraty} = a_0 + a_1 T_{suze} + a_2 m_{srot} \quad (3.16)$$

$$koef_{Qstraty} = a_0 + a_1 T_{suze} + a_2 m_{srot} + a_3 m_{suze} \quad (3.17)$$

V Tab. 14 sú uvedené výsledky modelu pre nepriame meranie teploty po zavedení výpočtu koeficientu strát (*koef_Qstraty*) podľa lineárneho modelu. Tento koeficient bol určený pred simuláciou tavby. Pri porovnaní uvedených výsledkov s výsledkami dosiahnutými pri konštantnej hodnote koeficienta strát (Tab. 9) je vidieť zlepšenie modelu. Priemerná relatívna odchýlka modelu na vzorke tavieb je s modelom pre koeficient strát (3.17) 0.94%, čo predstavuje absolútnu odchýlku cca 15°C. Najväčšia odchýlka bola dosiahnutá u tavieb 43626, 43633 a 43644 a to na úrovni 35°C. Pri vyhodnotení početnosti tavieb v rámci presnosti je cca 80% tavieb s odchýlkou do 32°C, 74% tavieb do 24°C a cca 70% tavieb do 16°C (Tab. 15).

Tab. 14. Výsledky modelu pre NM teploty pre koeficient strát ako funkciu

tavba	T^{mer} (°C)	koef. Q_{straty} (3.15)			koef. Q_{straty} (3.16)			koef. Q_{straty} (3.17)		
		T^{NM} (°C)	ΔT_{abs} (°C)	ΔT_{rel} (%)	T^{NM} (°C)	ΔT_{abs} (°C)	ΔT_{rel} (%)	T^{NM} (°C)	ΔT_{abs} (°C)	ΔT_{rel} (%)
43601	1687.00	1723.12	-36.12	2.14	1692.04	-5.04	0.30	1689.62	-2.62	0.16
43607	1655.00	1654.05	0.95	0.06	1637.95	17.05	1.03	1639.40	15.60	0.94
43608	1653.00	1635.81	17.19	1.04	1636.23	16.77	1.01	1637.06	15.94	0.96
43611	1648.00	1658.20	-10.20	0.62	1649.18	-1.18	0.07	1650.50	-2.50	0.15
43613	1676.00	1675.96	0.04	0.00	1665.04	10.96	0.65	1665.88	10.12	0.60
43619	1702.00	1767.96	-65.96	3.88	1718.22	-16.22	0.95	1717.37	-15.37	0.90
43621	1668.00	1694.31	-26.31	1.58	1664.86	3.14	0.19	1665.95	2.05	0.12
43624	1647.00	1669.30	-22.30	1.35	1660.36	-13.36	0.81	1659.47	-12.47	0.76
43625	1654.00	1653.97	0.03	0.00	1648.81	5.19	0.31	1648.59	5.41	0.33
43626	1656.00	1632.85	23.15	1.40	1621.26	34.74	2.10	1621.36	34.64	2.09
43628	1612.00	1605.95	6.05	0.38	1611.74	0.26	0.02	1612.08	-0.08	0.00
43629	1642.00	1616.19	25.81	1.57	1620.72	21.28	1.30	1620.55	21.45	1.31
43631	1610.00	1630.24	-20.24	1.26	1642.21	-32.21	2.00	1642.04	-32.04	1.99
43633	1657.00	1619.38	37.62	2.27	1621.02	35.98	2.17	1620.71	36.29	2.19
43637	1657.00	1671.44	-14.44	0.87	1670.12	-13.12	0.79	1671.24	-14.24	0.86
43640	1668.00	1642.07	25.93	1.55	1643.92	24.08	1.44	1643.59	24.41	1.46
43643	1625.00	1597.07	27.93	1.72	1624.23	0.77	0.05	1624.13	0.87	0.05
43644	1665.00	1624.63	40.37	2.42	1630.54	34.46	2.07	1630.77	34.23	2.06
43653	1688.00	1686.75	1.25	0.07	1673.22	14.78	0.88	1673.55	14.45	0.86
priem.rel.odch.				1.27			0.96			0.94

Tab. 15. Početnosť taviieb v jednotlivých triedach presnosti

ΔT_{absl}	koef. Q_{straty} (3.15)		koef. Q_{straty} (3.16)		koef. Q_{straty} (3.17)	
	Počet taviieb	Cumulative %	Počet taviieb	Cumulative %	Počet taviieb	Cumulative %
8	5	26.32%	6	31.58%	6	31.58%
16	2	36.84%	4	52.63%	7	68.42%
24	4	57.89%	4	73.68%	1	73.68%
32	4	78.95%	1	78.95%	1	78.95%
40	2	89.47%	4	100.00%	4	100.00%
nad	2	100.00%	0	100.00%	0	100.00%

4. Komplexný model pre nepriame meranie teploty a uhlíka so spätnou väzbou

Tvorba komplexného modelu je pomerne náročný proces, pričom presnosť modelu je závislá predovšetkým na množstve parametrov, ktoré je potrebné stanoviť. V komplexnom modeli, ktorý je popísaný ďalej vychádzame z predpokladu, že je meraný prietok konvertorového plynu a jeho zloženie na CO, CO₂ a O₂, čo do značnej miery zjednodušuje popis jednotlivých čiastkových modelov.

4.1 Modelované procesy

Proces skujňovania je zložitý heterogénny vsádzkový proces s kontinuálnym vstupom kyslíka. Pri tvorbe komplexného modelu vychádzame z určitých zjednodušení vybraných procesov, ktoré predstavujú:

- Proces tavenia šrotu,
- Proces rozkladu troskotvorných prísad,
- Proces oxidácie prvkov C, Si, Fe, Mn, P v tekutom kove,
- Procesy prebiehajúce medzi troskou a tekutým kovom.

4.1.1 Proces tavenia šrotu

Proces tavenia šrotu je dôležitým procesom z hľadiska tepelnej bilancie, resp. výpočtu teploty kovu. Popis tohto procesu vychádza z tepelnej bilancie a bilancie uhlíka na rozhraní šrotu a roztaveného kovu, ktorý je daný nasledujúcimi rovnicami

$$h_{tc}(T_{me}-T_{sci}) = \frac{\lambda_{sc}}{\Delta x}(T_{sci}-T_{sc}) + \Delta H_{sc} \left(-\frac{dW_{sc}}{d\tau}\right) \quad (4.1)$$

$$S_{sc}\rho_{sc}k_x(C_{me}-C_{sci}) = (C_{me}-C_{sc}) \left(-\frac{dW_{sc}}{d\tau}\right) \quad (4.2)$$

kde T_{me} , T_{sc} sú teploty kovu a šrotu (°C), T_{sci} je teplota na rozhraní kov–šrot (°C), C_{me} , C_{sc} sú koncentrácie uhlíka v kove a v šrote (kg/kg), C_{sci} je koncentrácia uhlíka na rozhraní kov–šrot (kg/kg), W_{sc} je váha šrotu (kg), ΔH_{sc} je latentné teplo tavenia šrotu (kJ/kg), h_{tc} je súčiniteľ prenosu tepla (W/m²/K), λ_{sc} je tepelná vodivosť šrotu (W/m/K), k_x je koeficient prenosu hmoty (m/s), S_{sc} je povrch šrotu (m²), ρ_{sc} je hustota šrotu (kg/m³) [5].

Závislosť medzi teplotou a koncentráciou uhlíka v kove je daná čiarou liquidu vo fázovom diagrame železo–uhlík podľa nasledujúcej rovnice

$$T_{sci} = a_0 + a_1 C_{sci} \quad (4.3)$$

Vychádzajúc z vyššie uvedených rovníc je potom možné vypočítať rýchlosť tavenia šrotu a následne z rýchlosti množstvo roztaveného šrotu. Roztavený šrot je potrebné priradiť k tekutému kovu, čo vyžaduje prepočítanie zloženia, hmotnosti tekutého kovu a taktiež je potrebné vypočítať prírastok fyzikálneho tepla šrotu dQ_{fyzSr} podľa vzťahu

$$dQ_{fyzSr} = dM_{Sr}C_{pSr}T_{Sr} \quad (4.4)$$

kde dM_{Sr} je úbytok roztaveného šrotu (kg), C_{pSr} je merná tepelná kapacita šrotu (J/kg/K), T_{Sr} je teplota šrotu (K).

4.1.2 Proces rozkladu troskotvorných prísad

Proces rozkladu troskotvorných prísad vychádza z rozkladu uhličitanu vápenatého



t.j. úmerne rýchlosti rozkladu CaCO_3 uvažujeme aj rozklad ostatných troskotvorných prísad, ktoré prechádzajú do trosky.

Proces rozkladu uhličitanu sa začína iba vtedy, ak parciálny tlak oxidu uhličitého v plyne obklopujúcom uhličitan je menší ako rozkladný tlak. Rozkladný tlak p_{eq} a rýchlosť chemickej reakcie k_{ch} sú nasledujúce

$$p_{eq} = p_{eq0} e^{-\frac{E_{eq0}}{T}} \quad (4.6)$$

$$k_{ch} = k_D (p_{eq} - p_{\text{CO}_2}) \quad (4.7)$$

kde p_{CO_2} je parciálny tlak CO_2 na povrchu a

$$k_D = k_{D0} e^{-\frac{E_{D0}}{T}} \quad (4.8)$$

Na základe rovníc (4.4) a (4.6) má rovnica (4.7) nasledujúci tvar

$$k_{ch} = k_D p_{eq} - k_D p_{\text{CO}_2} \frac{S_{por}}{S_{geom}} \quad (4.9)$$

a na výslednú rýchlosť vplýva hlavne teplota, parciálny tlak CO_2 a zväčšený celkový povrch v dôsledku pórovitosti. Zväčšenie povrchu je modelované ako pomer povrchu pórov S_{por} ku geometrickému povrchu častice S_{geom} [6].

Vzhľadom na predchádzajúce rovnice je možné vypočítať rýchlosť rozkladu troskotvorných prísad a následne z rýchlosti rozkladu troskotvorných prísad prepočítať množstvo rozložených prísad. Zložky rozložených prísad je potrebné priradiť k roztavenému kovu a troske, čo vyžaduje prepočítanie zloženia, hmotnosti tekutého kovu a trosky a taktiež je potrebné vypočítať prírastok fyzikálneho tepla troskotvorných prísad dQ_{fyzTp} podľa vzťahu

$$dQ_{fyzTp} = dM_{Tp} C_{pTp} T_{Tp} \quad (4.10)$$

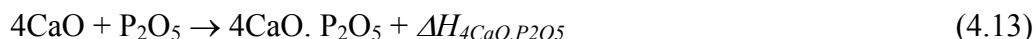
kde dM_{Tp} je úbytok troskotvorných prísad (kg), C_{pTp} je merná tepelná kapacita troskotvorných prísad (J/kg/K), T_{Tp} je teplota troskotvorných prísad (K).

Okrem fyzikálneho tepla je potrebné uvažovať aj z teplom potrebným na rozklad dQ_{rozVa} uhličitanu vápenatého, t.j.

$$dQ_{rozVa} = dM_{Tp} x_{\text{CO}_2} \Delta H_{\text{CaCO}_3} \quad (4.11)$$

kde x_{CO_2} je podiel hmotnosti prísad pripadajúci na CO_2 z vápenca (kg/kg), ΔH_{CaCO_3} je tepelné zafarbenie rozkladu vápenca (J/kg).

V prípade rozkladu vápenca vzniká CaO , ktoré môže v prípade dostupných zložiek SiO_2 (dM_{SiO_2}) a P_2O_5 ($dM_{P_2O_5}$) v troske reagovať podľa nasledujúcich reakcií



a množstvo tepla ako teplo z tvorby trosky dQ_{troTr} je dané vzťahom

$$dQ_{troTr} = dM_{SiO_2}\Delta H_{2CaO.SiO_2} + dM_{P_2O_5}\Delta H_{4CaO.P_2O_5} \quad (4.14)$$

4.1.3 Proces oxidácie prvkov v tekutom kove

Proces oxidácie prvkov C, Si, Fe, Mn, P popisujú nasledujúce chemické reakcie



Popis procesov vychádza z predpokladu známeho množstva a zloženia fúkaného kyslíka (N_2 , O_2) a množstva a zloženia (CO , CO_2 , O_2) odpadných plynov. Pre odpadné plyny sú vypočítané prietoky (V_{COex} , V_{CO_2ex} a V_{O_2ex}), ktoré sú určené súčinom meraného prietoku odpadných plynov a koncentrácie príslušnej zložky, napr. $V_{COex} = V_{wg} \cdot x_{COex}$, kde $V_{wg} = V_{wg}.K_{wg}$. Koeficient K_{wg} je po skončení každej tavby vyhodnotený ako pomer uhlíka privedeného v surovom železe a šrote ku uhlíku vo forme CO a CO_2 . Uvedený koeficient umožňuje realizovať hmotnostnú bilanciu v korektnom tvare.

Ďalej uvažujeme prisávanie vzduchu, ktorého prietok V_{air} je daný

$$V_{air} = (V_{N_2ex} - V_{N_2bl})/x_{N_2air} \quad (4.20)$$

kde V_{N_2ex} je prietok N_2 v odsávanom plyne (m^3/s), V_{N_2bl} je prietok N_2 vo fúkanom kyslíku (m^3/s), x_{N_2air} je koncentrácia N_2 vo vzduchu (m^3/m^3).

Taktiež uvažujeme vznik CO_2 z reakcie medzi CO z reakčnej zóny a O_2 z prisávaného vzduchu V_{CO_2s} , t.j.

$$V_{CO_2s} = (V_{air}x_{O_2air} - V_{O_2ex})2, \quad (4.21)$$

resp. prietok CO_2 z reakčnej zóny V_{CO_2f} je daný

$$V_{CO_2f} = V_{CO_2ex} - V_{CO_2s} \quad (4.22)$$

kde V_{O2ex} , V_{CO2ex} je prietok O_2 , resp. CO_2 v odsávanom plyne (m^3/s).

Prietok strát kyslíka V_{O2loss} je daný vzťahom

$$V_{O2loss} = V_{CO2f}/2 \quad (4.23)$$

a prietok efektívneho kyslíka V_{O2eff}

$$V_{O2eff} = V_{O2} - V_{O2loss} \quad (4.24)$$

Prietok CO z reakčnej zóny V_{COcav} je daný prietokom CO a CO_2 v odsávanom plyne $V_{COex} + V_{CO2ex}$ znížený o CO z troskotvorných prísad V_{COsub} , t.j.

$$V_{COcav} = V_{COex} + V_{CO2ex} - V_{COsub} \quad (4.25)$$

pričom prietok kyslíka V_{O2dec} na oduhličenie je daný rovnicou

$$V_{O2dec} = V_{COcav}/2 \quad (4.26)$$

Pomer objemu kyslíka na oduhličenie k celkovému objemu efektívneho kyslíka predstavuje podiel kyslíka použitého na oxidáciu uhlíka, teda

$$\sigma_C = \frac{V_{O2dec}}{V_{O2eff}} \quad (4.27)$$

Podiel kyslíka na oxidačné reakcie ďalších prvkov σ_i vychádza z rýchlosti príslušnej oxidačnej reakcie a koncentrácie oxidovaných prvkov

$$\sigma_i = \frac{k_i C_{im}}{\sum_j k_j C_{jm}} (1 - \sigma_C), \quad (4.28)$$

kde $i, j = Si, Fe, Mn, P$; k_i je rýchlostná konštanta oxidačnej reakcie i -teho prvku, C_{im} je koncentrácia i -teho prvku v kove (kg/kg).

Na základe distribúcie kyslíka medzi jednotlivé oxidačné reakcie je následne vypočítané množstvo a zloženie kovu a trosky [5].

Z hľadiska tepla je potrebné vypočítať množstvo tepla z exotermických dQ_{exoRe} oxidačných reakcií

$$Q_{exoRe} = dM_C \Delta H_{CO} + dM_{Si} \Delta H_{SiO2} + dM_{Fe} \Delta H_{FeO} + dM_{Mn} \Delta H_{MnO} + dM_P \Delta H_{P2O5} \quad (4.29)$$

a taktiež fyzikálne teplo prisávaného vzduchu dQ_{fyzVz} a fúkaného kyslíka dQ_{fyzOx}

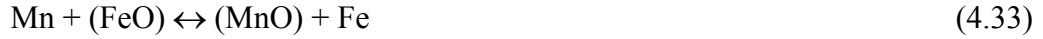
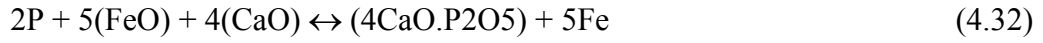
$$dQ_{fyzVz} = V_{air} C_{p,air} T_{air} \quad (4.30)$$

$$dQ_{fyzOx} = V_{ox} C_{p,ox} T_{ox} \quad (4.31)$$

kde V_{air} , V_{ox} je prietok prisávaného vzduchu a fúkaného kyslíka (m^3/s), $C_{p,air}$, $C_{p,ox}$ je merná tepelná kapacita vzduchu a fúkaného kyslíka ($J/m^3/K$), T_{air} , T_{ox} je teplota prisávaného vzduchu a fúkaného kyslíka (K).

4.1.4 Procesy prebiehajúce medzi troskou a tekutým kovom

V prípade procesov prebiehajúcich medzi troskou a kovom uvažujeme s tromi nasledujúcimi reakciami, ktoré prebiehajú medzi zložkami v troske a kove



Rovnovážne konštanty pre uvedené chemické reakcie sú dané vzťahmi

$$\frac{C_{(4CaO.P2O5)}}{C_P^2 C_{(FeO)}^5 C_{(CaO')}^4} = K_P \quad (4.35)$$

$$\frac{C_{(MnO)}}{C_{Mn} C_{(FeO)}} = K_{Mn} \quad (4.36)$$

$$\frac{C_{(O)}}{C_{(FeO)}} = K_{FeO} \quad (4.37)$$

Pričom rovnovážne konštanty vypočítame ako funkcie teploty kovu. Rýchlosť prenosu komponentov medzi troskou a kovom je daná rovnicami

$$\frac{d(W_m C_{jm})}{d\tau} = S_m k_m \rho_m (C_{ji} - C_{jm}), \quad (4.38)$$

$$\frac{d(W_s C_{ks})}{d\tau} = S_m k_s \rho_s (C_{ki} - C_{ks}), \quad (4.39)$$

kde $j = Mn, P, O$; $k = (FeO), (MnO), (4CaO.P2O5), (CaO')$; W_m, W_s je hmotnosť kovu a trosky (kg); C_{jm}, C_{ks} je koncentrácia j -teho prvku v kove, resp. k -teho prvku v troske (kg/kg); C_{ji}, C_{ki} je koncentrácia j -teho prvku, resp. k -teho prvku na rozhraní kov-troska (kg/kg); S_m je plocha rozhrania kov-troska (m²); k_m, k_s je koeficient prenosu komponentov v kove a troske (m/s); ρ_m, ρ_s je hustota kovu a trosky (kg/m³) [5].

4.1.4.1 Tepelná bilancia

Tepelná bilancia procesu skujňovania vychádza z privedeného tepla Q_{pri} , ktoré je dané vzťahom

$$Q_{pri} = Q_{surFe} + Q_{exoRe} + Q_{tvoTr} + Q_{fyzSr} + Q_{fyzOx} + Q_{fyzTp} + Q_{fyzVz} \quad (4.40)$$

kde Q_{surFe} je fyzikálne a latentné teplo vstupného surového železa (J), Q_{exoRe} je teplo z exotermických oxidačných reakcií prvkov C, Si, Fe, Mn, P (J), Q_{tvoTr} je teplo z reakcií pri tvorbe trosky, t.j. pri tvorbe $2CaO.SiO_2$ a $4CaO.P_2O_5$ (J), Q_{fyzSr} je fyzikálne teplo vstupného šrotu (J), Q_{fyzOx} je fyzikálne teplo fúkaného kyslíka (J), Q_{fyzTp} je fyzikálne teplo vstupných troskotvorných prísad (J), Q_{fyzVz} je fyzikálne teplo prisávaného vzduchu (J).

Na výstupe, resp. v prípade spotrebovaného tepla Q_{spo} uvažujeme nasledujúce položky

$$Q_{spo} = Q_{fyzMe} + Q_{fyzTr} + Q_{rozVa} + Q_{fyzKP} + Q_{fyzPr} + Q_{str} \quad (4.41)$$

kde Q_{fyzMe} je fyzikálne a latentné teplo tekutého kovu (J), Q_{fyzTr} je fyzikálne a latentné teplo trosky (J), Q_{rozVa} je teplo potrebné na rozklad vápenca (J), Q_{fyzKP} je fyzikálne teplo konvertorového plynu (J), Q_{fyzPr} je fyzikálne teplo prachu v konvertorovom plyne (J), Q_{str} sú ostatné straty tepla (J).

V prípade tepelnej bilancie, t.j. rovnosti tepla privedeného a spotrebovaného môžeme vyjadriť teplotu kovu T_{me} nasledovne

$$T_{me} = \frac{Q_{pri} - Q_{fyzTr} - Q_{rozVa} - Q_{fyzKP} - Q_{fyzPr} - Q_{str} - M_{me}(T_{me,sl}(c_{pme,s} - c_{pme,l}) + Q_{me,sl})}{M_{me}c_{pme,l}} \quad (4.42)$$

kde M_{me} je hmotnosť tekutého kovu (kg), $T_{me,sl}$ je teplota tavenia kovu (K), $c_{pme,s}$ je merná tepelná kapacita tuhého kovu (J/kg/K), $c_{pme,l}$ je merná tepelná kapacita tekutého kovu (J/kg/K), $Q_{me,sl}$ je skupenské teplo topenia kovu (J/kg).

Podľa predchádzajúcich vzťahov vieme všetky položky tepelnej bilancie vyjadriť a následne vypočítať teplotu kovu. Aby sme vedeli korektne realizovať tepelnú bilanciu, potrebujeme vyjadriť tepelné straty Q_{str} a to v tvare $Q_{str} = x_{str} \cdot Q_{pri}$, teda potrebujeme vedieť podiel privedeného tepla na ostatné nešpecifikované straty. Po skončení tavby je preto potrebné na základe meranej teploty kovu určiť hodnotu x_{str} a následne ju určitou váhou zohľadniť pre nasledujúcu tavbu.

4.2 Vstupy a výstupy komplexného modelu

Vstupy komplexného modelu tvoria parametre, statické a dynamické dáta. Parametre zahŕňajú

- podiel strát z privedeného tepla (x_{str}) a váha podielu pre nasledujúcu tavbu,
- podiel uhlíka privedeného a odvedeného (K_{wg}) a váha podielu pre nasledujúcu tavbu.

Medzi statické dáta patria:

- požadovaná teplota a zloženie ocele,
- teplota a zloženie fúkaného kyslíka,
- hmotnosť, teplota a zloženie pelet,
- hmotnosť, teplota a zloženie brikiet,
- hmotnosť, teplota a zloženie TC mag,
- hmotnosť, teplota a zloženie vápna,
- hmotnosť, teplota a zloženie dolomitického vápna,
- hmotnosť, teplota a zloženie magnezitu,
- hmotnosť, teplota a zloženie FeSi,
- hmotnosť, teplota a zloženie FeSi75,
- hmotnosť, teplota a zloženie FeMn,
- hmotnosť, teplota a zloženie šrotu,
- hmotnosť, teplota a zloženie surového železa,
- spotreba a zloženie výmurovky,
- teplota a zloženie prisávaného vzduchu.

Z vyššie uvedených vstupov sa na základe zoskupenia, resp. miešania vytvoria kumulované vstupy pre samotný model, t.j.

- Pre stanovenie zloženia šrotu je potrebný vstup v podobe tabuľky zložení jednotlivých druhov šrotov a hmotnosti jednotlivých šrotov, pričom k šrotu sa taktiež pridáva FeSi, FeSi75 a FeMn.
- Troskotvorné prísady sú vytvorené zmiešaním TC mag, vápna, dolomitického vápna, magnezitu, pelet, brikiet a opotrebovanej výmurovky.

Medzi dynamické dáta poskytované v sekundových intervaloch patria:

- príznak fúkania,
- prietok fúkaného kyslíka,
- koncentrácia CO v spalínach,
- koncentrácia CO₂ v spalínach,
- koncentrácia H₂ v spalínach,
- koncentrácia O₂ v spalínach,
- prietok, teplota a tlak spalín.

K základným výstupom z modelu patrí hmotnosť, teplota a zloženie ocele.

4.3 Implementácia

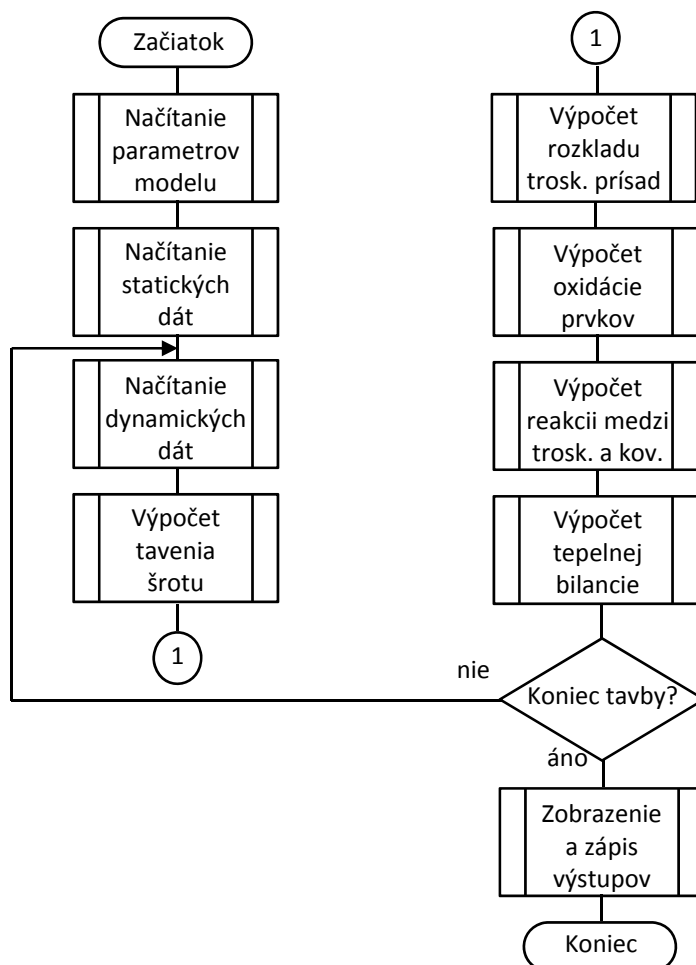
Bilančný model bol implementovaný v jazyku PASCAL.

Hlavný program je uložený v súbore „main.pas“, programová jednotka pre podporu jednotlivých čiastkových modelov je v súbore „u_support.pas“ a programová jednotka pre podporu práce so súbormi je v súbore „u_files.pas“.

Vstupy do modelu sú uložené a načítané z textových súborov. Textový súbor „parameters.txt“ obsahuje dva základné parametre pre nastavenie modelu. Ďalšie vstupy predstavujúce statické dáta pre danú tavbu, napr. pre tavbu číslo 43601, sú uložené v textovom súbore „43601stat.txt“ a dynamické dáta sú v súbore „43601dyn.txt“. Okrem týchto súborov je ešte vytvorený súbor „43601scrap.txt“, ktorý obsahuje kód a hmotnosť jednotlivých šrotov pre danú tavbu a súbor „scrap_comp.txt“, ktorý obsahuje kód a zloženie jednotlivých šrotov.

Vstupy a získané výstupy z bilančného modelu sú uložené do výstupného textového súboru „outputs.txt“. Práca s textovými súbormi umožňuje realizovať model v režime off-line, resp. nahradzuje prepojenie na databázu statických a dynamických dát, resp. zloženie a hmotnosti jednotlivých šrotov a pod..

Stručný algoritmus je zobrazený na Obr. 29.



Obr. 29. Algoritmus komplexného modelu

4.4 Dosiahnuté výsledky

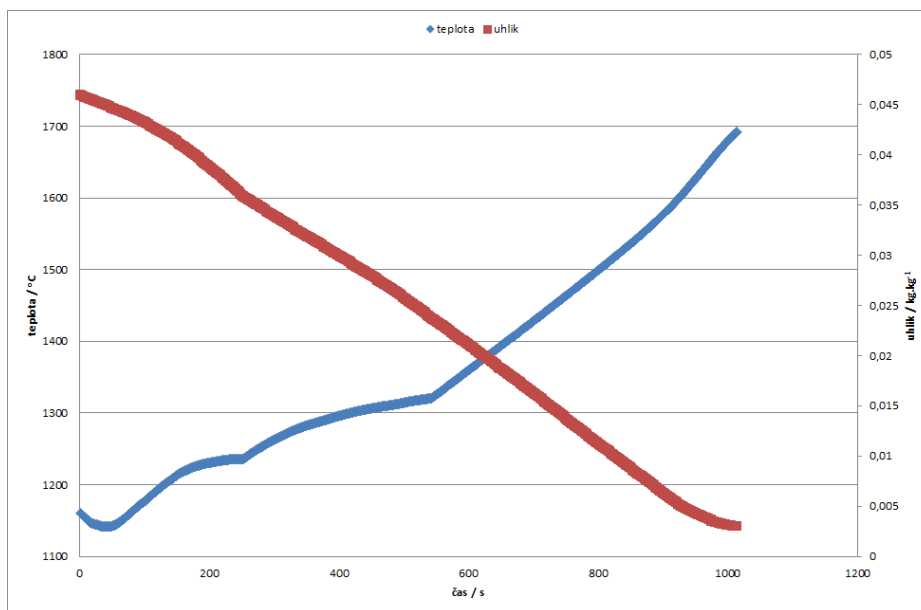
Komplexný model bol testovaný na 19 vybraných tavrách. V tabuľke Tab. 16 sú uvedené výsledky simulácií, resp. teploty merané a modelované. Významný vplyv na hodnotu teploty taveniny má koeficient strát (k_{str}) a preto boli realizované simulácie s jeho konštantnou hodnotou, resp. ako závislosť od teploty surového železa (T_{suFe}), hmotnosti šrotu (m_{srot}) a hmotnosti surového železa (m_{suFe}). Z výsledkov (Tab. 16) vyplýva, že v prípade konštantnej hodnoty je priemerná absolútna chyba rovná hodnote 35,31°C; ak uvažujeme vplyv teploty surového železa, tak je to 30,31°C, čo je zhruba rovnaká hodnota aj v prípade uvažovania vplyvu hmotnosti šrotu. Najnižšia priemerná absolútna chyba 28,36 °C bola zaznamenaná v prípade ak uvažujeme aj vplyv hmotnosti surového železa na koeficient strát. Obdobné zlepšenie výsledkov môžeme vidieť aj z pohľadu početnosti, resp. z pohľadu kumulatívneho percenta taviieb, ktoré spadajú do intervalov absolútnej chyby, t.j. do 8, 16, 24, 32, 40 °C a viac. Môžeme to ilustrovať na hodnote kumulatívneho percenta 52,63%,

ktoré sa postupne presúva z intervalu 32 až 40°C, do 24°C a nakoniec pri zohľadnení všetkých uvedených vplyvov na koeficient strát do 16°C.

Tab. 16. Výsledky simulácií

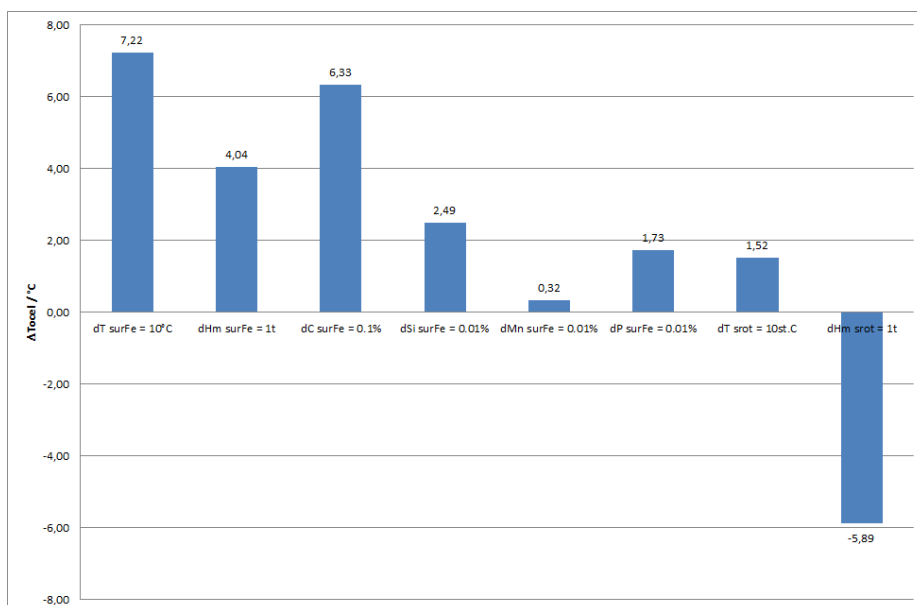
Tavba č.	T _{mer} / °C	k _{str} = 0,157496			k _{str} = a ₀ + a ₁ T _{suFe}			k _{str} = a ₀ + a ₁ T _{suFe} + a ₂ m _{srot}			k _{str} = a ₀ + a ₁ T _{suFe} + a ₂ m _{srot} + a ₃ m _{suFe}		
		T _{model} / °C	ΔT _{abs} / °C	ΔT _{rel} / %	T _{model} / °C	ΔT _{abs} / °C	ΔT _{rel} / %	T _{model} / °C	ΔT _{abs} / °C	ΔT _{rel} / %	T _{model} / °C	ΔT _{abs} / °C	ΔT _{rel} / %
43601	1687	1651	35,59	2,11	1627	59,8	3,54	1628	59,45	3,52	1635	52,19	3,09
43607	1655	1672	17,45	1,05	1656	0,59	0,04	1653	1,88	0,11	1641	14,03	0,85
43608	1653	1638	14,59	0,88	1644	9,45	0,57	1644	8,62	0,52	1640	13,54	0,82
43611	1648	1657	9,19	0,56	1669	20,8	1,26	1668	19,78	1,20	1657	8,68	0,53
43613	1676	1597	78,95	4,71	1613	62,76	3,74	1612	64,09	3,82	1606	69,67	4,16
43619	1702	1692	10,06	0,59	1694	8,17	0,48	1684	18,33	1,08	1700	2,33	0,14
43621	1668	1739	70,57	4,23	1745	77,03	4,62	1741	72,59	4,35	1726	57,82	3,47
43624	1647	1718	71,3	4,33	1722	75,38	4,58	1723	75,91	4,61	1731	84,09	5,11
43625	1654	1696	42,09	2,54	1705	51,04	3,09	1706	51,94	3,14	1708	53,86	3,26
43626	1656	1698	41,9	2,53	1674	17,6	1,06	1674	17,68	1,07	1670	13,84	0,84
43628	1612	1603	9,15	0,57	1607	4,89	0,30	1609	3,21	0,20	1610	1,84	0,11
43629	1642	1607	35,42	2,16	1622	19,9	1,21	1624	18,41	1,12	1630	11,85	0,72
43631	1610	1655	45,07	2,80	1658	47,87	2,97	1661	51,12	3,18	1666	56,09	3,48
43633	1657	1672	14,5	0,88	1642	14,87	0,90	1644	13,33	0,80	1649	7,58	0,46
43637	1657	1655	2,44	0,15	1660	2,86	0,17	1662	5,11	0,31	1647	10,34	0,62
43640	1668	1692	24,34	1,46	1661	7,01	0,42	1664	4,29	0,26	1665	3,08	0,18
43643	1625	1574	50,81	3,13	1592	32,84	2,02	1597	27,86	1,71	1605	20,28	1,25
43644	1665	1602	63,15	3,79	1631	33,75	2,03	1633	32,43	1,95	1636	28,7	1,72
43653	1688	1657	30,95	1,83	1659	29,35	1,74	1656	31,74	1,88	1659	28,96	1,72
		priemer ΔT _{abs} 35,31			30,31			30,41			28,36		
		ΔT _{abs}	počet	kum.	ΔT _{abs}	počet	kum.	ΔT _{abs}	počet	kum.	ΔT _{abs}	počet	kum.
		8	1	5,26	8	4	21,05	8	4	21,05	8	4	21,05
		16	5	31,58	16	3	36,84	16	2	31,58	16	6	52,63
		24	1	36,84	24	3	52,63	24	4	52,63	24	1	57,89
		32	2	47,37	32	1	57,89	32	2	63,16	32	2	68,42
		40	2	57,89	40	2	68,42	40	1	68,42	40	0	68,42
		viac	8	100,0	viac	6	100,0	viac	6	100,0	viac	6	100,0

Na Obr. 30 je znázornený priebeh teploty kovu a obsahu uhlíka v kove pre tavbu číslo 43619. Priebeh teploty má v prvej polovici času miernejší nárast, čo je spôsobené tavením šrotu, ktoré je ukončené okolo 250 sekundy. Ďalej nárast spomaľuje aj rozklad troskotvorných prísad, ktorý je ukončený okolo 550 sekundy. V druhej polovici procesu skujňovania je nárast teploty strmší, pretože šrot a prísady sú roztavené, resp. rozložené a tieto procesy si vyžadujú spotrebu tepla a taktiež v tomto čase je maximálna rýchlosť oduhličovania. V prípade uhlíka je pokles obsahu uhlíka na začiatku miernejší, pretože rýchlosť vyhorenia uhlíka je menšia a uhlík v kove je dopĺňovaný uhlíkom z roztaveného šrotu. V strednej časti priebehu je pokles uhlíka rovnomerný, pretože rýchlosť oduhličovania je maximálna. V závere procesu sa priebeh uhlíka zmierňuje a blíži sa k výslednej koncentrácii v tekutom kove.



Obr. 30. Priebek teploty a uhlíka pre tavbu číslo 43619

Vzhľadom na analýzu citlivosti vstupov na výslednú teplotu ocele (Obr. 31) danú statickým modelom [1] majú viaceré vstupy významný vplyv. Napríklad 1t šrotu zníži teplotu ocele o 5.89°C. Pri podrobnejšej analýze bolo zistené, že vo väčšine taviieb je rozdiel medzi hmotnosťou šrotu v statických dátach a hmotnosťou získanou sčítaním údajov o jednotlivých typoch šrotu, napr. v prípade tavby č. 43621 je rozdiel 2.48t, resp. 8.05%, čo by mohlo mať vplyv na teplotu ocele až o 14.61°C. Z hľadiska možného rozptylu teploty ocele, by bolo zaujímavé zistiť aké sú neistoty merania jednotlivých vstupov a následne v akom intervale sa pohybuje neistota teploty ocele.



Obr. 31. Citlivosť vplyvu vstupov na výslednú zmenu teploty ocele

Vzhľadom na odladenie komplexného modelu by bolo vhodné ešte pokračovať v stanovení koeficientov prenosu komponentov v kove a troske, ktoré majú rozhodujúci vplyv na procesy prebiehajúce medzi troskou a kovom.

5. Model teploty a koncentrácie uhlíka s využitím metódy strojového učenia

V správe za prvú etapu riešenia projektu bol prezentovaný alternatívny postup modelovania konvertorového procesu, založený na SVM (Support Vector Machine) regresii (SVR), ktorý má sľubný potenciál v predikcii teploty taveniny a koncentrácie uhlíka. Úspešnú aplikáciu tejto metódy na konvertorový proces môžeme nájsť napr. v [15] [16].

V princípe sa jedná o počítačový model (naučený stroj) založený na regresnej funkcii (5.1) a veľkej matrice optimalizovaných podporných vektorov α (t.j. nenulových Lagrangeových multiplikátorov). Model predpovedá na základe regresnej rovnice (5.1), kde je možné nastaviť rôzne typy jadrovej funkcie (tzv. kernel) k (napr. polynomická, gausová, exponenciálna a iných.).

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b \quad (5.1)$$

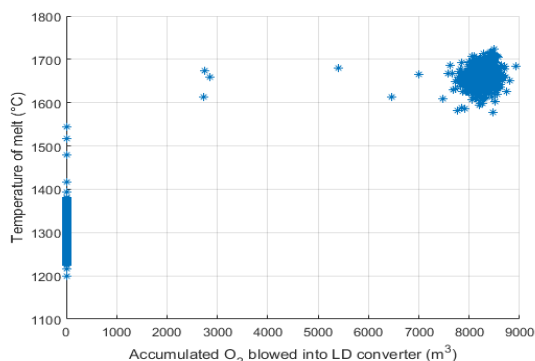
Pre vektor \mathbf{x} platí, že $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_l)$. Ak uvažujeme regresiu s jednou výstupnou premennou, tak pozorovania (tzv. observations) na skúmanom objekte môžeme zapísať ako postupnosť dvojíc $(\mathbf{x}_1, y_1), \dots, (\mathbf{x}_l, y_l), \dots, (\mathbf{x}_l, y_l)$, $\mathbf{x}_i \in \mathbf{R}^n, y_i \in \mathbf{R}$.

Podrobný algoritmus SVR môžeme nájsť v prácach [17] [18]. SVR je v súčasnosti implementovaná vo viacerých aplikačných programoch (Matlab, R) a nájsť môžeme aj hotové knižnice pre rôzne programovacie jazyky (Java, C#, a pod.). Pre modelovanie konvertorového procesu bol použitý Matlab a Statistics and Machine Learning Toolbox™. Ako metóda regresie bola použitá epsilon-necitlivá (epsilon-insensitive) SVM (ϵ -SVM) regresia, známa tiež ako $L1$ loss, ktorá je implementovaná v spomínanom Toolboxe. Ako algoritmus riešenia optimalizačného problému bol použitý algoritmus sekvenčnej minimalizačnej optimalizácie (SMO) – tzv. „SMO solver“.

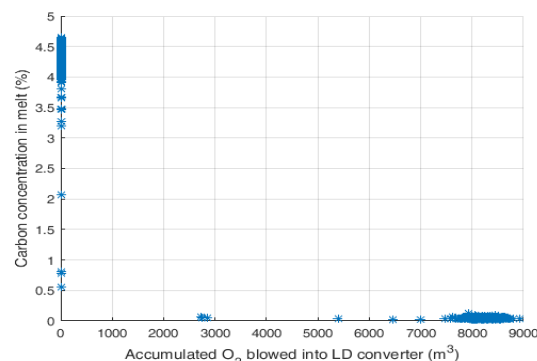
Vzhľadom na to, že **tento prístup k modelovaniu bol** na poslednom kontrolnom dni v USS **zamietnutý**, pre jeho komplikovanú technickú realizáciu a nespoľahlivosť, boli vykonané len dodatočné kontrolné simulácie a v ďalšom, rozsiahlejšom skúmaní sa v 2. etape riešenia projektu nepokračovalo.

Cieľom dodatočných simulácií bolo zistiť:

- či zvýšenie počtu pozorovaní (vstupov) do modelu môže zvýšiť presnosť predikcie. Ako štvrtý vstup do modelovania bol uvažovaný parameter akumulované množstvo fúkaného kyslíka (m^3). Tento údaj ako ďalší meraný prevádzkový parameter sa nachádza v databáze statických dát a po prepočte z prietoku kyslíka je možné ho získať aj z databázy dynamických dát. Závislosť koncovej teploty taveniny od celkového množstva nafúkaného kyslíka ilustruje Obr. 32. Podobne závislosť koncovej meranej koncentrácie uhlíka v tavenine od celkového množstva nafúkaného kyslíka je ilustrovaná na Obr. 33.
- aký kernel (jadrová funkcia) je vhodnejší pre predikciu teploty a aký na predikciu koncentrácie uhlíka v tavenine.



Obr. 32. Závislosť koncovej teploty taveniny od celkového množstva nafúkaného kyslíka (tavba 47105)



Obr. 33. Závislosť koncovej meranej koncentrácie uhlíka v tavenine od celkového množstva nafúkaného kyslíka

- tiež sa preskúmalo, či zmena offsetu pre výber počiatočných alebo koncových dynamických dát pre ich priradenie k meraným statickým dátam vo fáze učenia modelu prinesie zlepšenie predikcie. Zavedenie tohto offsetu vychádza z problému nejednoznačného určenia konca tavby z databázy dynamických dát. Inými slovami, statické dáta, ktoré odpovedajú koncu tavby, nezodpovedajú poslednému záznamu v databáze dynamických dát danej tavby. Z toho dôvodu bol zvolený offset od konca záznamu dynamických dát, ktorý približne odpovedá najvyšším stabilným hodnotám vstupov (t.j. koncentrácie CO, CO₂ a teplote spalín).

Prehľad vstupov a výstupov, ktoré boli uvažované pri SVM regresii je uvedený v Tab. 17

Tab. 17. Optimalizácia počtu vstupov a data-mining procesu pre SVM regresiu jednej tavby a predikciu teploty

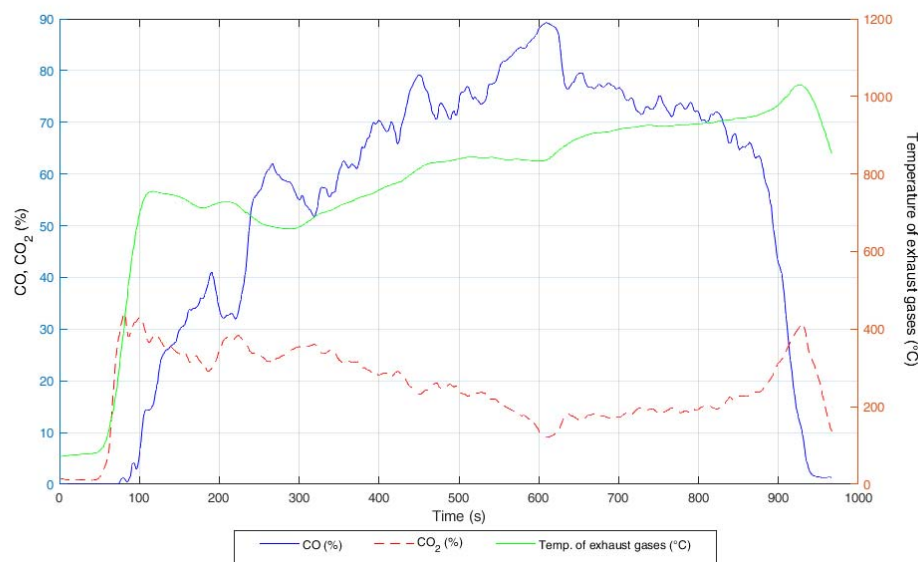
Pozorovania (vstupy)	Cieľové veličiny (výstupy)*
x_1 – CO v spalínach(%)	y_1 - Teplota taveniny (°C) y_2 - Koncentrácia uhlíka v tavenine (%)
x_2 – CO ₂ v spalínach (%)	
x_3 – Teplota spalín (°C)	
x_4 – Akumulovaný kyslík – fúkaný (m ³)	

*Simulované jednotlivo, samostatným SVR modelom.

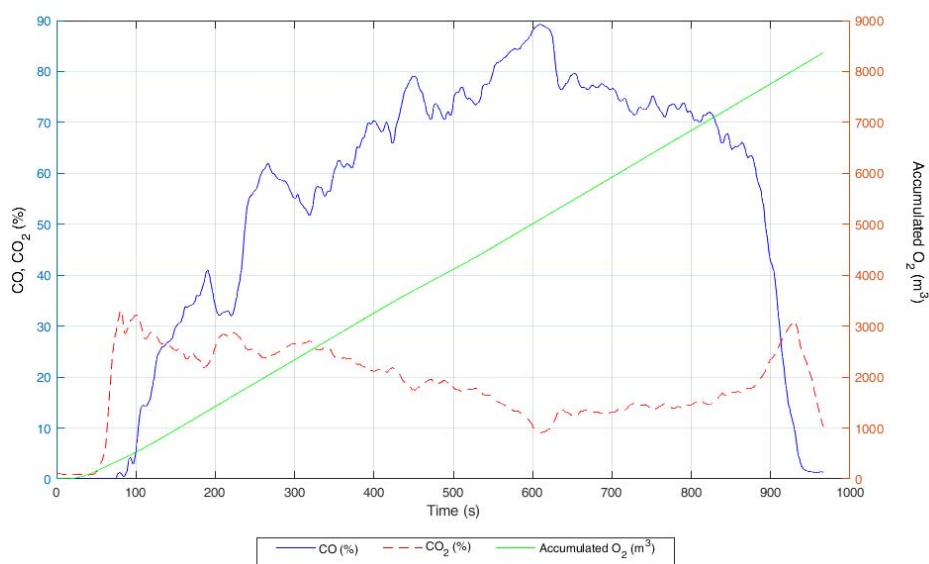
Keďže **výskum aplikácie tejto metódy nebol ideovo podporený** (viď. závery z 1. etapy riešenia projektu t.j. **prioritou je deterministický model**), prezentované sú len niektoré výsledky z predikcie teploty a koncentrácie uhlíka pre podloženie niektorých záverov resp. odporúčaní uvedených v správe z 1. etapy riešenia projektu.

V Tab. 18 sú uvedené výsledky z predikcie teploty taveniny s použitím rôznych vstupov, jadrových funkcií a offsetov. Jednalo sa o náhodne vybranú tavbu (August, 2017). Statické a dynamické dáta tejto tavby neboli súčasťou tréningu modelu. Ako offset pre výpočet absolútnej chyby bol stanovený na -200s od konca záznamu. V tomto čase sa teda vypočítal rozdiel skutočnej meranej teploty (z databázy stat. dát) a predpovedanej SVR modelom. Z tabuľky vyplýva, že najmenšia chyba bola dosiahnutá pri použití štyroch vstupov s Gaussovým kernelom a párovacími offsetmi 200:200. Vybrané veličiny z danej tavby

použité ako vstupy do modelu na predikciu (z databázy dyn. dát) sú uvedené v Obr. 34 a Obr. 35. Najlepší výsledok z predikcie teploty taveniny počas tavby (47105) je ilustrovaný na Obr. 36 a Obr. 37.



Obr. 34. Merateľné pozorovania resp. dynamické dáta tavby 47105 – vstupy do SVR modelu na predikciu



Obr. 35. Merateľné pozorovania resp. dynamické dáta tavby 47105 – vstupy do SVR modelu na predikciu

Tab. 18. Optimalizácia počtu vstupov a data-mining procesu pre SVM regresiu jednej tavby a predikciu teploty

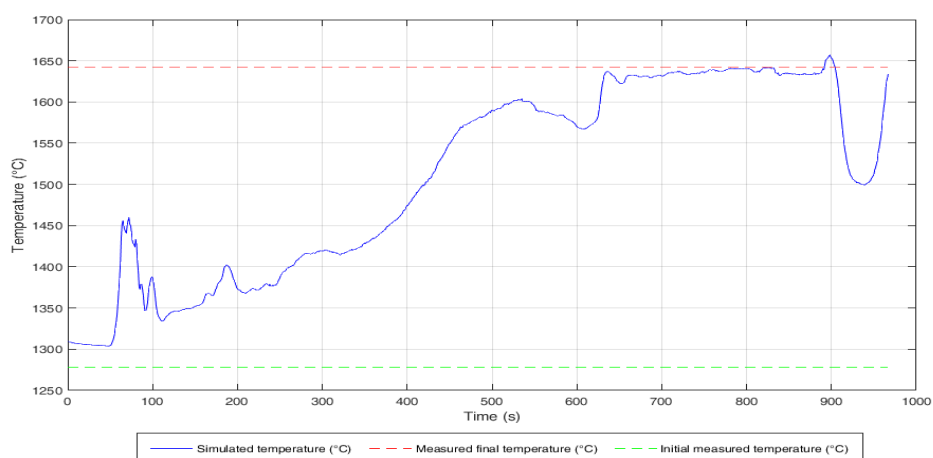
Tavba	Jadrová funkcia (kernel) pre SVM regresiu	Pozorovania *	Offset_low **	Offset_high **	Poč. Tep. (°C)	Konc. Tep. (°C)	Tepl. predikovaná modelom (°C)	Abs chyba ***
47105	Polynomická	3	200	200	1278	1642	1663	21,65
47105	Gaussov	3	200	200	1278	1642	1658	16,10
47105	Polynomická	4	200	200	1278	1642	1611	30,47
47105	Gaussov	4	200	200	1278	1642	1637	4,03
47105	Polynomická	3	100	200	1278	1642	1660	18,60
47105	Gaussov	3	100	200	1278	1642	1656	14,23
47105	Polynomická	4	100	200	1278	1642	1610	31,73
47105	Gaussov	4	100	200	1278	1642	1635	6,52
47105	Polynomická	4	100	100	1278	1642	1628	13,84
47105	Gaussov	4	100	100	1278	1642	1611	30,33
47105	Polynomická	4	100	0	1278	1642	1725	83,05
47105	Gaussov	4	100	0	1278	1642	1455	186,15
47105	Polynomická	4	0	200	1278	1642	1657	15,73
47105	Gaussov	4	0	200	1278	1642	1599	42,69

* Pozorovania resp. vstupy pre naučenie modelu: 1#: CO, 2#: CO₂, 3#: Teplota spalín, 4#: Akumulovaný kyslík.

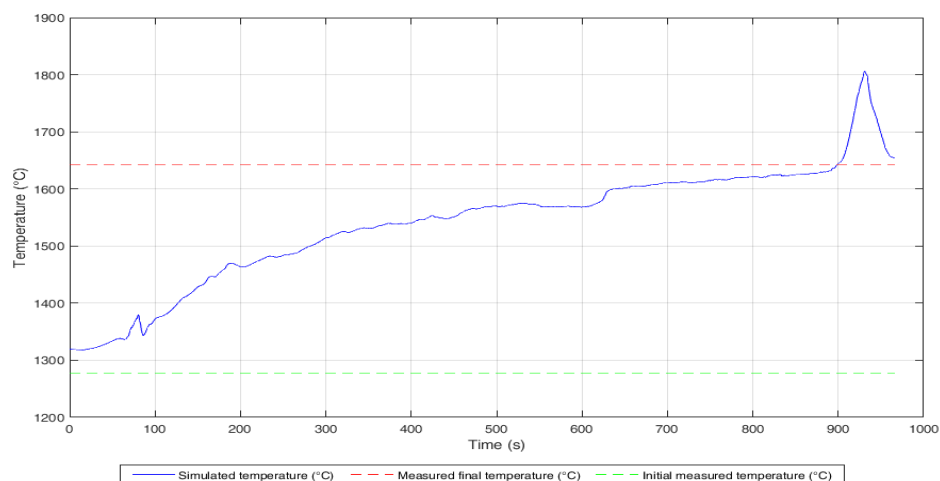
** Ofset od začiatku a konca dynamických dát každej tavby pre priradenie dynamických dát k počiatočným a konečným statickým dátam.

*** Chyba v čase 768 sek. od začiatku tavby (resp. v čase -200s od konca tavby).

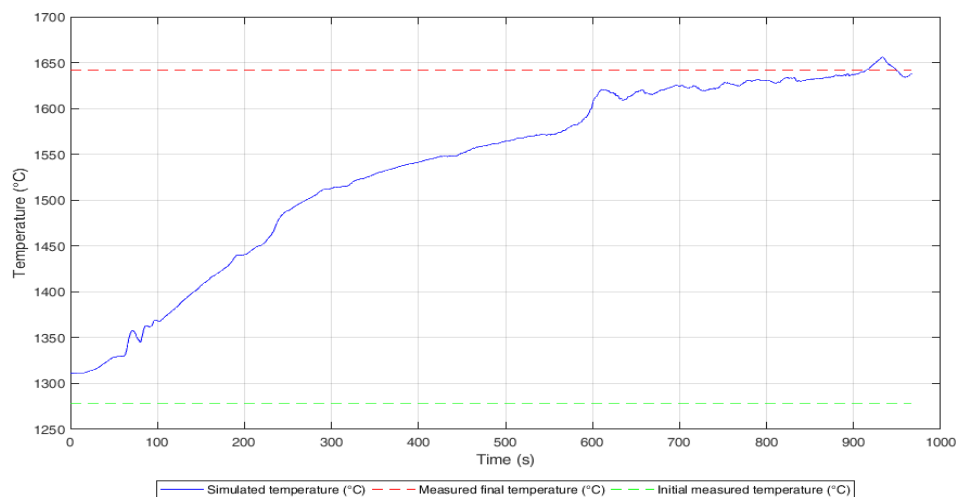
Tab. 18 ukazuje, že najmenšia absolútna chyba predikcie bola dosiahnutá v prípade použitia Gaussovej jadrovej funkcie. Treba však poznamenať, že priebeh simulovanej teploty nebol vždy kvalitatívne vyhovujúci (priebeh nebol „hladký“). Kvalitatívne lepší resp. reálnejší priebeh teploty bol dosiahnutý s použitím polynomickej jadrovej funkcie (vid. Obr. 37 a Obr. 38). Najhoršie výsledky boli dosiahnuté v prípade keď sa vo fáze data-mining a učenia modelu priradzovali koncovej meranej teplote (z databázy statických dát) dynamické dáta z konca záznamu t.j. ofsety boli nastavené v pomere 100:0. Pri oboch typoch jadrových funkcií sa však stretávame s problémom, ktorý sa prejavuje tým, že počiatočná simulovaná teplota sa líši o cca 30-40 °C od skutočnej počiatočnej meranej teploty surového železa (vid. Obr. 38). V prípade nastavených ofsetov 100:100 a použitia polynomickej jadrovej funkcie bola predikcia teploty na konci reálnejšia bez výraznejšieho preregulovania (vid. Obr. 38 a pre porovnanie Obr. 37).



Obr. 36. Priebeh simulovanej resp. predpovedanej teploty taveniny počas tavby 47105 (Gaussov kernel, 200:200, 4 vstupy, 4. riadok s dátami v Tab. 18)



Obr. 37. *Priebeh simulovanej resp. predpovedanej teploty taveniny počas tavby 47105 (polynomický kernel, 200:200, 4 vstupy, 3. riadok s dátami v Tab. 18)*



Obr. 38. *Priebeh simulovanej resp. predpovedanej teploty taveniny počas tavby 47105 (polynomický kernel, 4 vstupy, 100:100, 9. riadok s dátami v Tab. 18)*

Tab. 19. Optimalizácia počtu vstupov a data-mining procesu pre SVM regresiu jednej tavby a predikciu koncentrácie uhlíka

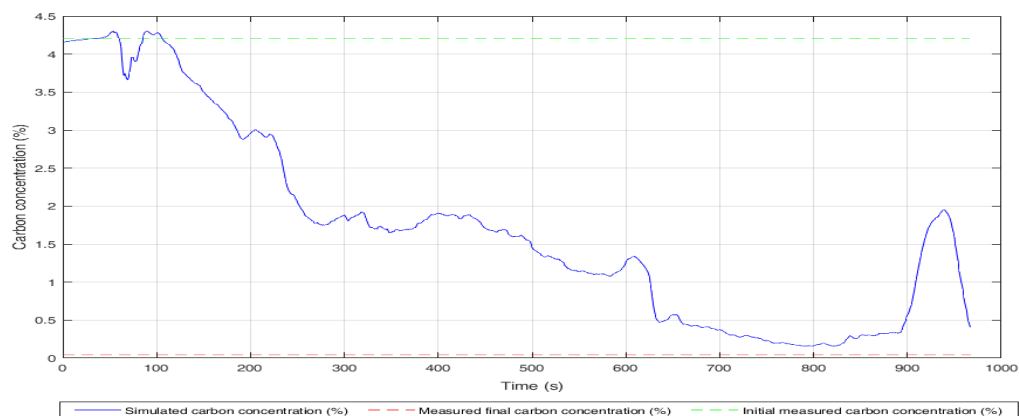
Tavba	Jadrová funkcia (kernel) pre SVM regresiu	Pozor.*	Offset_low**	Offset_high**	Poč. konc. uhlíka (%)	Kon. konc. uhlíka (%)	Konc. uhlíka predikovaná modelom (%)	Abs chyba***
47105	Polynomic	3	200	200	4,2017	0,0390	-0,1694	0,2084
47105	Gaussov	3	200	200	4,2017	0,0390	0,3079	0,2689
47105	Polynomic	4	200	200	4,2017	0,0390	0,2993	0,2603
47105	Gaussov	4	200	200	4,2017	0,0390	0,2546	0,2156
47105	Polynomic	3	100	200	4,2017	0,0390	-0,1759	0,2149
47105	Gaussov	3	100	200	4,2017	0,0390	0,2365	0,1975
47105	Polynomic	4	100	200	4,2017	0,0390	0,2548	0,2158
47105	Gaussov	4	100	200	4,2017	0,0390	0,2317	0,1927
47105	Polynomic	4	100	100	4,2017	0,0390	-0,0485	0,0875
47105	Gaussov	4	100	100	4,2017	0,0390	0,5968	0,5578
47105	Polynomic	4	100	0	4,2017	0,0390	0,6201	0,6591
47105	Gaussov	4	100	0	4,2017	0,0390	2,5190	2,4800
47105	Polynomic	4	0	200	4,2017	0,0390	0,3659	0,3269
47105	Gaussov	4	0	200	4,2017	0,0390	0,6453	0,6063

* Pozorovania resp. vstupy pre naučenie modelu: 1#: CO, 2#: CO₂, 3#: Teplota spalín, 4#: Akumulovaný kyslík.

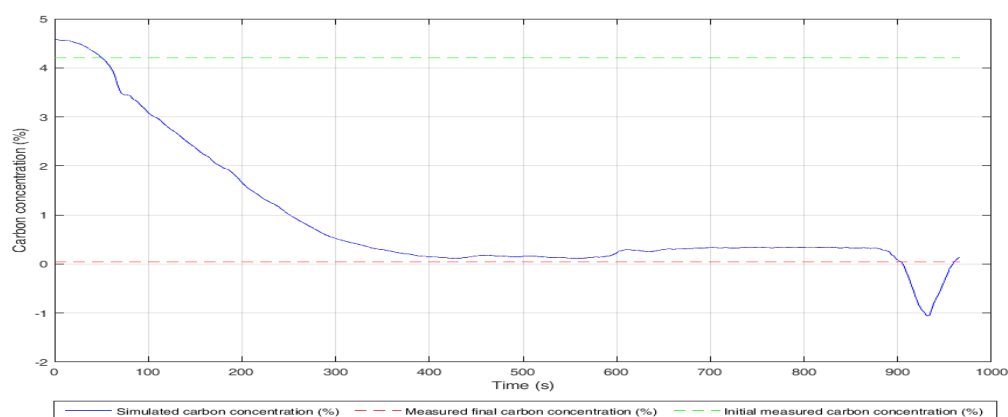
** Ofset od začiatku a konca dynamických dát každej tavby pre priradenie dynamických dát k počiatočným a konečným statickým dátam.

*** Chyba v čase 768 sek. od začiatku tavby (resp. v čase -200s od konca tavby).

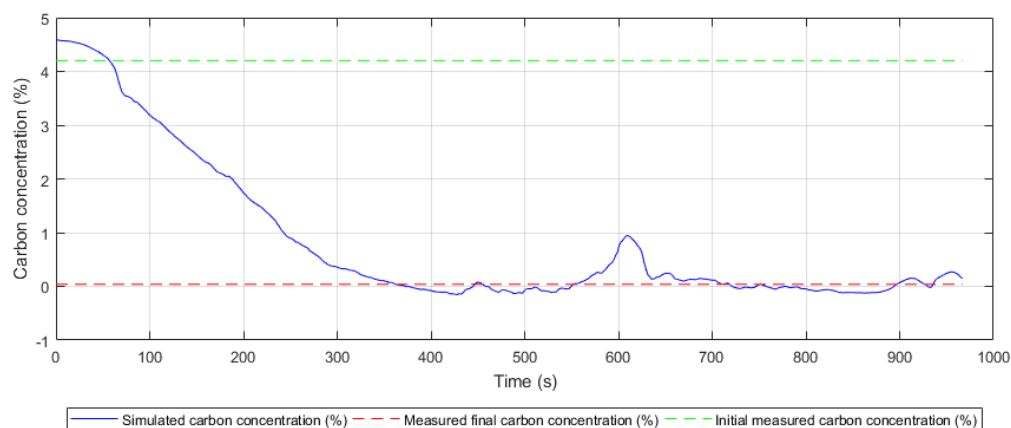
V Tab. 19 sú uvedené výsledky z predikcie koncentrácie uhlíka v tavenine tiež s použitím rôznych vstupov, jadrových funkcií a ofsetov. Jednalo sa rovnakú tavbu (47105) ako v prípade predikcie teploty. Ako ofset pre výpočet absolútnej chyby bol stanovený na -200s od konca záznamu. V tomto čase sa teda vypočítal rozdiel skutočnej meranej koncentrácie uhlíka (z databázy stat. dát) a predpovedanej SVR modelom. Výsledky simulácii pri rôznych nastavených variantoch sa výrazne nelíšili. Z tabuľky vyplýva, že najmenšia chyba bola dosiahnutá pri použití štyroch vstupov s Gaussovou jadrovou funkciou a nastavenými ofsetmi 100:100 (vo fáze učenia modelu). Najlepší výsledok z predikcie uhlíka počas tavby je ilustrovaný na Obr. 10. Treba však poznamenať, že priebeh simulovanej teploty nebol vždy kvalitatívne vyhovujúci (vyskytovali sa oscilácie resp. preregulovania) napr. v prípade použitia Gausovej jadrovej funkcie (Obr. 39). Kvalitatívne lepší resp. reálnejší priebeh koncentrácie uhlíka bol dosiahnutý s použitím polynomickej jadrovej funkcie (vid. Obr. 40a Obr. 41). Najhoršie výsledky boli dosiahnuté v prípade keď sa vo fáze data-mining a učenia modelu priradzovali koncovej meranej koncentrácii uhlíka (z databázy statických dát) dynamické dáta z konca záznamu t.j. ofsety boli nastavené v pomere 100:0. Pri obidvoch typoch jadrových funkcií (ale viac pri polynomickej) sa stretávame s problémom, ktorý sa prejavuje tým, že počiatočná simulovaná koncentrácia uhlíka sa líši od skutočnej počiatočnej meranej koncentrácie uhlíka v surovom železe (vid. Obr. 40). V prípade nastaveného ofsetov 100:100 a použitia polynomickej jadrovej funkcie bola predikcia koncentrácie uhlíka na konci reálnejšia bez výraznejšieho preregulovania na konci tavby (vid. Obr. 41a pre porovnanie Obr. 40).



Obr. 39. *Priebeh simulovanej resp. predpovedanej koncentrácie uhlíka v tavenine počas tavby 47105 (Gaussov kernel, 4 vstupy, 100:200, 8. riadok s dátami v Tab. 19)*



Obr. 40. *Priebeh simulovanej resp. predpovedanej koncentrácie uhlíka v tavenine počas tavby 47105 (polynomický kernel, 4 vstupy, 100:200, 7. riadok s dátami v Tab. 19)*



Obr. 41. *Priebeh simulovanej resp. predpovedanej koncentrácie uhlíka v tavenine počas tavby 47105 (polynomický kernel, 4 vstupy, 100:100, 9. riadok v Tab. 19)*

Z Tab. 18a Tab. 19 vyplýva, že zmena offsetov, počtu pozorovaní ako aj nastavenie jadrovej funkcie ovplyvňuje proces učenia modelu a v konečnom dôsledku aj kvalitu predikcie.

Ďalej boli simulované tavby z iného časového obdobia (Júl, 2018). Model na predikciu bol natrénovaný pri nastavení rôznych ofsetov pre párovanie statických a dynamických dát. Aj tu sa preskúmalo ako ovplyvní zmena ofsetu pre výber počiatočných alebo koncových dynamických dát pre ich priradenie k meraným statickým dátam vo fáze učenia modelu kvalitu predikcie. Zavedenie tohto ofsetu vychádza z problému nejednoznačného určenia konca tavby z databázy dynamických dát. Inými slovami, statické dáta, ktoré odpovedajú koncu tavby, nezodpovedajú poslednému záznamu v databáze dynamických dát danej tavby. Všetky simulácie boli vykonané so štyrmi vstupnými pozorovaniami.

Zhrnuté výsledky prezentuje Tab. 20. Celkovo bolo simulovaných 19 tavieb. Pri každej tavbe bol simuláciou vypočítaný priebeh teploty taveniny a priebeh koncentrácie uhlíka v tavenine. Na simuláciu sa použil model naučený na tavbách predchádzajúceho obdobia (August, 2017). Predikcia bola vypočítaná na základe meraných dynamických dát (Júl, 2018). Pri každej tavbe sa aplikoval Gaussov a polynomický kernel. Absolútna chyba bola vypočítaná podľa vzťahu (5.22) na štyroch miestach od konca záznamu predikcie (ofset - 200, -100, -50, 0). Okrem toho bola vypočítaná aj najmenšia priemerná chyba zo všetkých tavieb pri každom novom nastavení ofsetov.

$$\Delta_x = x_s - x_m \quad (5.22)$$

kde absolútna chyba Δ_x je rozdiel medzi nameranou x_s a skutočnou x_m hodnotou meranej veličiny.

Tab. 20. Sumár výsledkov z predikcie teploty a uhlíka pri rôznych nastavených ofsetoch

19 tavieb	Ofset z konca záznamu predikcie pre vyhodnotenie absolútnej chyby				Najmenšia priemerná chyba (°C)
	-200	-100	-50	0	
Cieľ predikcie					
Teplota: (100 : 100)	2,11	5,06	0,13	0,14	8,37
Teplota: (100 : 200)	0,46	0,07	0,42	0,66	14,45
Teplota: (200 : 200)	1,13	4,26	1,58	0,46	12,00
Uhlík: (100 : 100)	0,02	0,01	0,00	0,00	0,05
Uhlík: (100 : 200)	0,00	0,04	0,01	0,04	0,07
Uhlík: (200 : 200)	0,01	0,05	0,05	0,02	0,09

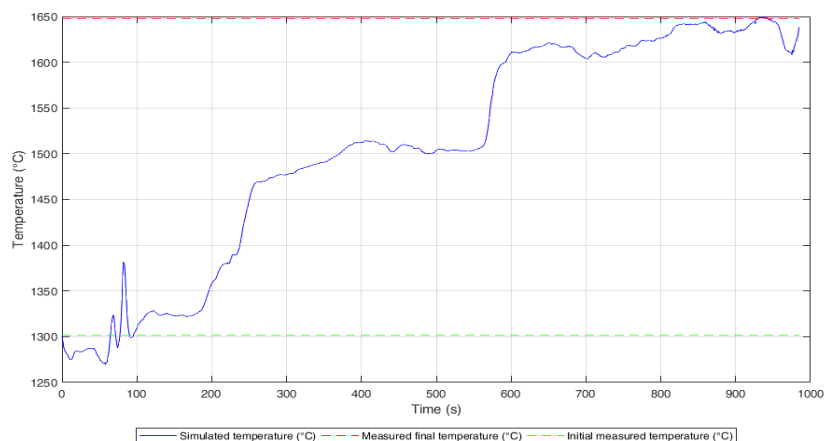
Z Tab. 20 vyplýva, že najlepšie nastavenie ofsetov bolo v pomere 100:100 v oboch prípadoch t.j. modelovanie teploty aj uhlíka. Pri tomto nastavenom pomere bola evidovaná najmenšia priemerná hodnota absolútnej chyby.

Priebeh predpovedanej (t.j. simulovanej resp. modelovej) koncentrácie uhlíka v tavenine bol kvalitatívne najlepší v prípade použitia polynomickej jadrovej funkcie so štyrmi vstupmi. Najlepšie výsledky z predikcie teploty pri nastavenom pomere ofsetov 100:100 prezentuje Tab. 21. Podobne najlepšie výsledky z predikcie koncentrácie uhlíka pri nastavenom pomere ofsetov 100:100 prezentuje Tab. 22. Zaujímavé výsledky sú v tabuľkách zvýraznené.

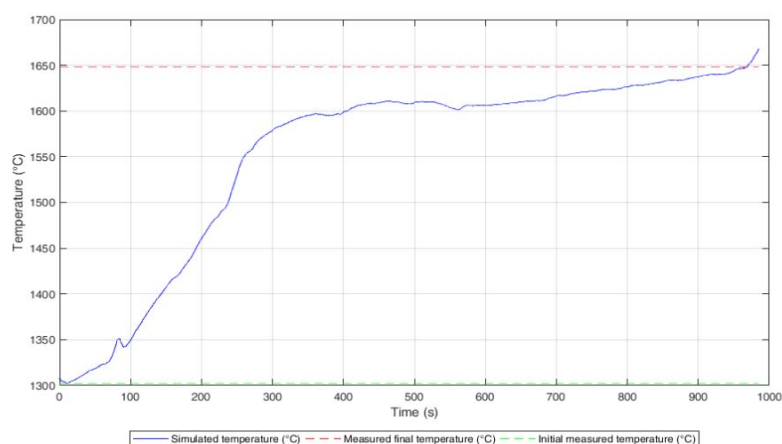
Tab. 21. Výsledky simulácií s SVR modelom na predikciu teploty taveniny (Ofsety 100:100)

Tavba	Vstupy	Kernel (jadrová funkcia)	Začiatočná meraná teplota (°C)	Koncová meraná teplota (°C)	Absolútna chyba v čase -200 s z konca záznamu (°C)	Absolútna chyba v čase -100 s z konca záznamu (°C)	Absolútna chyba v čase -50 s z konca záznamu (°C)	Absolútna chyba v čase -0 s z konca záznamu (°C)	Priemerná absolútna chyba (°C)
43601	4	Gaussian	1367.58	1687	62.10	76.20	44.51	49.85	58.16
43601	4	Polynomial	1367.58	1687	66.47	57.94	47.12	17.39	47.23
43607	4	Gaussian	1354.19	1655	49.41	26.92	33.69	18.14	32.04
43607	4	Polynomial	1354.19	1655	37.91	27.67	17.18	0.14	20.73
43608	4	Gaussian	1313.81	1653	51.34	27.98	32.93	18.19	32.61
43608	4	Polynomial	1313.81	1653	38.50	17.61	9.22	5.55	17.72
43611	4	Gaussian	1301.97	1648	19.99	5.78	0.13	7.57	8.37
43611	4	Polynomial	1301.97	1648	39.68	20.73	12.51	19.13	23.01
43613	4	Gaussian	1292.55	1676	53.21	55.59	92.69	84.59	71.52
43613	4	Polynomial	1292.55	1676	63.43	49.01	37.88	31.32	45.41
43619	4	Gaussian	1315.88	1702	72.60	80.98	58.75	106.78	79.78
43619	4	Polynomial	1315.88	1702	79.72	71.40	61.27	46.39	64.69
43621	4	Gaussian	1311.87	1668	36.48	24.17	22.87	118.30	50.45
43621	4	Polynomial	1311.87	1668	57.32	27.89	9.14	1.39	23.94
43624	4	Gaussian	1316.00	1647	41.59	23.00	13.89	101.82	45.08
43624	4	Polynomial	1316.00	1647	36.39	16.40	2.76	5.33	15.22
43625	4	Gaussian	1307.18	1654	40.83	38.89	10.71	21.54	27.99
43625	4	Polynomial	1307.18	1654	45.65	24.30	5.85	5.74	20.39
43626	4	Gaussian	1366.03	1656	46.35	16.05	3.12	24.14	22.42
43626	4	Polynomial	1366.03	1656	39.36	16.42	10.25	7.99	18.50
43628	4	Gaussian	1315.22	1612	10.97	9.81	24.91	13.29	14.75
43628	4	Polynomial	1315.22	1612	3.14	14.27	28.49	53.53	24.85
43629	4	Gaussian	1293.97	1642	31.02	34.03	15.11	9.74	22.47
43629	4	Polynomial	1293.97	1642	24.62	23.85	3.88	21.60	18.49
43631	4	Gaussian	1318.20	1610	2.11	11.38	41.55	20.83	18.97
43631	4	Polynomial	1318.20	1610	2.78	20.09	37.18	32.41	23.11
43633	4	Gaussian	1376.79	1657	21.24	42.38	26.15	11.63	25.35
43633	4	Polynomial	1376.79	1657	24.98	34.88	11.52	17.83	22.30
43637	4	Gaussian	1313.67	1657	43.01	39.20	18.02	22.19	30.60
43637	4	Polynomial	1313.67	1657	46.21	30.45	11.01	9.33	24.25
43640	4	Gaussian	1380.12	1668	52.94	48.19	45.16	82.37	57.17
43640	4	Polynomial	1380.12	1668	54.77	31.24	22.54	11.80	30.09
43643	4	Gaussian	1288.85	1625	17.19	5.06	85.49	28.88	34.16
43643	4	Polynomial	1288.85	1625	18.44	11.60	13.44	16.90	15.09
43644	4	Gaussian	1267.56	1665	42.62	62.77	62.71	66.09	58.55
43644	4	Polynomial	1267.56	1665	57.62	33.76	37.08	18.71	36.79
43653	4	Gaussian	1320.43	1688	68.44	59.66	45.06	95.76	67.23
43653	4	Polynomial	1320.43	1688	61.33	58.85	51.15	14.08	46.36
Najmenšia priemerná chyba:									8.37

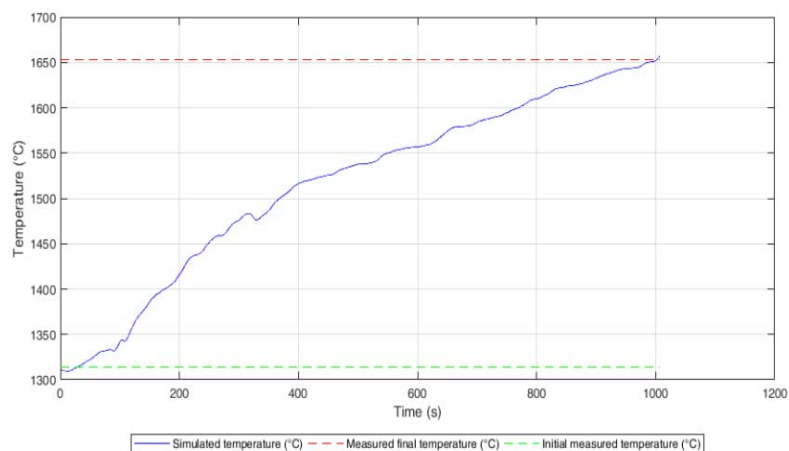
* Pozorovania resp. vstupy pre naučenie modelu: 1#: CO, 2#: CO₂, 3#: Teplota spalín, 4#: Akumulovaný kyslík.



Obr. 42. *Priebeh simulovanej teploty taveniny počas tavby 43611 – predikcia s Gaussovým kernelom (viď riadok 7 v Tab. 21, s priem. abs. chybou 8,37 °C)*



Obr. 43. *Priebeh simulovanej teploty taveniny počas tavby 43611 – predikcia s Polynomickým kernelom (viď riadok 8 v Tab. 21, s priem. abs. chybou 23,01 °C)*



Obr. 44. *Priebeh simulovanej teploty taveniny počas tavby 43608 – predikcia s Polynomickým kernelom (viď riadok 6 v Tab. 21, s priem. abs. chybou 17,72 °C)*

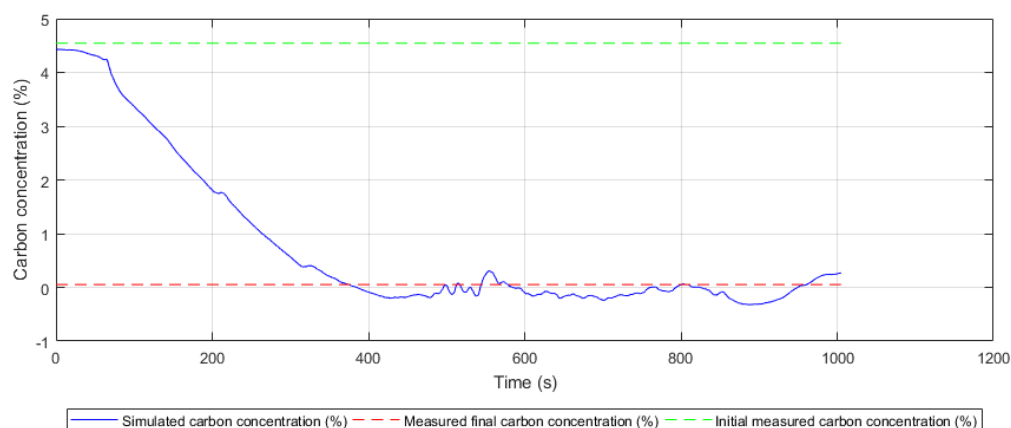
Na Obr. 42 môžeme vidieť priebeh simulovanej teploty s použitým Gausovým kernelom (tavba 43611). Hoci priebeh nie je kvalitatívne „hladký“ Pri tejto simulácii bola dosiahnutá najmenšia priemerná absolútna chyba (8,37 °C). Simulácia s polynomickým kernelom bola kvalitatívne lepšia priemerná absolútna chyba však bola vyššia (23,01 °C). Túto chybu ovplyvnilo preregulovanie na konci záznamu (vid. Obr. 43). Kvalitatívne lepší priebeh s polynomickým kernelom môžeme pozorovať na iných tabkách napr. 43608 (vid. Obr. 44) alebo 43643). Pri týchto tabkách bolo zaznamenané menšie preregulovanie a aj priemerná absolútna chyba bola menšia .

Tab. 22. Výsledky simulácii s SVR modelom na predikciu koncentrácie uhlíka v tavenine

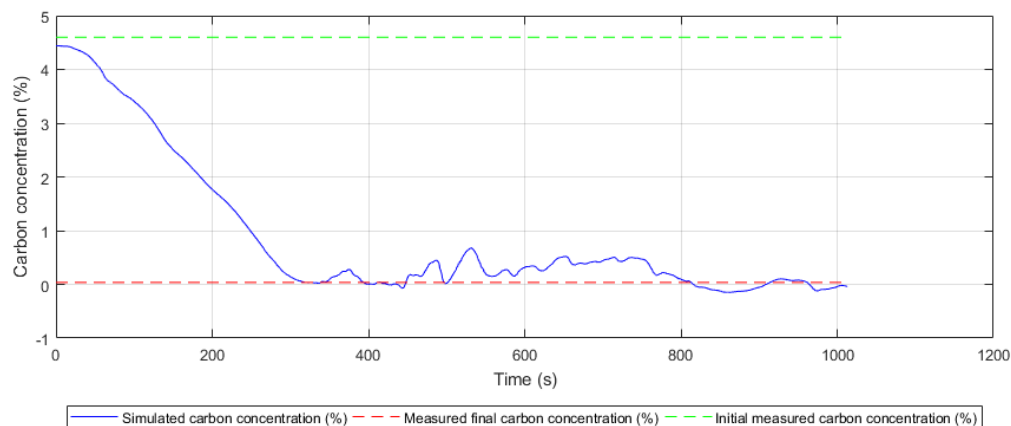
Tavba	Vstupy	Kernel (jadrová funkcia)	Zač. konc. uhlíka (°C)	Kon. konc. uhlíka (°C)	Absolútna chyba v čase -200 s z konca záznamu (°C)	Absolútna chyba v čase -100 s z konca záznamu (°C)	Absolútna chyba v čase -50 s z konca záznamu (°C)	Absolútna chyba v čase -0 s z konca záznamu (°C)	Priemerná absolútna chyba (°C)
43601	4	Gaussian	4,543	0,053	0,56	0,21	0,23	0,50	0,38
43601	4	Polynomial	4,543	0,053	0,08	0,21	0,00	0,07	0,09
43607	4	Gaussian	4,359	0,057	0,50	0,10	0,21	0,00	0,21
43607	4	Polynomial	4,359	0,057	0,33	0,14	0,12	0,08	0,17
43608	4	Gaussian	4,554	0,043	0,47	0,21	0,24	0,03	0,24
43608	4	Polynomial	4,554	0,043	0,05	0,14	0,31	0,20	0,17
43611	4	Gaussian	4,507	0,052	0,19	0,20	0,20	0,06	0,16
43611	4	Polynomial	4,507	0,052	0,29	0,21	0,32	0,14	0,24
43613	4	Gaussian	4,635	0,037	0,40	0,28	0,43	0,71	0,46
43613	4	Polynomial	4,635	0,037	0,08	0,33	0,05	0,30	0,19
43619	4	Gaussian	4,599	0,036	0,64	0,27	0,01	0,99	0,48
43619	4	Polynomial	4,599	0,036	0,03	0,11	0,00	0,07	0,05
43621	4	Gaussian	4,532	0,039	0,07	0,23	0,05	1,11	0,36
43621	4	Polynomial	4,532	0,039	0,05	0,16	0,05	0,16	0,10
43624	4	Gaussian	4,602	0,041	0,39	0,20	0,16	1,21	0,49
43624	4	Polynomial	4,602	0,041	0,15	0,01	0,09	0,17	0,10
43625	4	Gaussian	4,358	0,05	0,58	0,22	0,30	0,64	0,43
43625	4	Polynomial	4,358	0,05	0,09	0,01	0,20	0,16	0,11
43626	4	Gaussian	4,35	0,044	0,63	0,11	0,27	0,63	0,41
43626	4	Polynomial	4,35	0,044	0,15	0,03	0,22	0,01	0,10
43628	4	Gaussian	4,575	0,046	0,39	0,26	0,33	0,70	0,42
43628	4	Polynomial	4,575	0,046	0,26	0,08	0,09	0,13	0,14
43629	4	Gaussian	4,613	0,038	0,68	0,38	0,28	0,00	0,33
43629	4	Polynomial	4,613	0,038	0,08	0,21	0,13	0,02	0,11
43631	4	Gaussian	4,615	0,037	0,72	0,21	0,25	1,00	0,55
43631	4	Polynomial	4,615	0,037	0,21	0,18	0,12	0,16	0,17
43633	4	Gaussian	4,496	0,049	0,48	0,38	0,30	0,01	0,29
43633	4	Polynomial	4,496	0,049	0,11	0,39	0,21	0,07	0,20
43637	4	Gaussian	4,622	0,048	0,50	0,22	0,27	0,06	0,26
43637	4	Polynomial	4,622	0,048	0,02	0,07	0,08	0,34	0,13
43640	4	Gaussian	4,647	0,042	0,16	0,15	0,23	0,89	0,36
43640	4	Polynomial	4,647	0,042	0,05	0,14	0,03	0,04	0,06
43643	4	Gaussian	4,629	0,081	0,51	0,16	1,02	0,65	0,58
43643	4	Polynomial	4,629	0,081	0,19	0,36	0,01	0,01	0,14
43644	4	Gaussian	4,501	0,043	0,59	0,48	0,46	0,71	0,56
43644	4	Polynomial	4,501	0,043	0,02	0,24	0,06	0,14	0,12
43653	4	Gaussian	4,611	0,044	0,66	0,23	0,20	1,41	0,63
43653	4	Polynomial	4,611	0,044	0,41	0,31	0,23	0,03	0,24
Najmenšia priemerná chyba:									0,05

* Pozorovania resp. vstupy pre naučenie modelu: 1#: CO, 2#: CO₂, 3#: Teplota spalín, 4#: Akumulovaný kyslík.

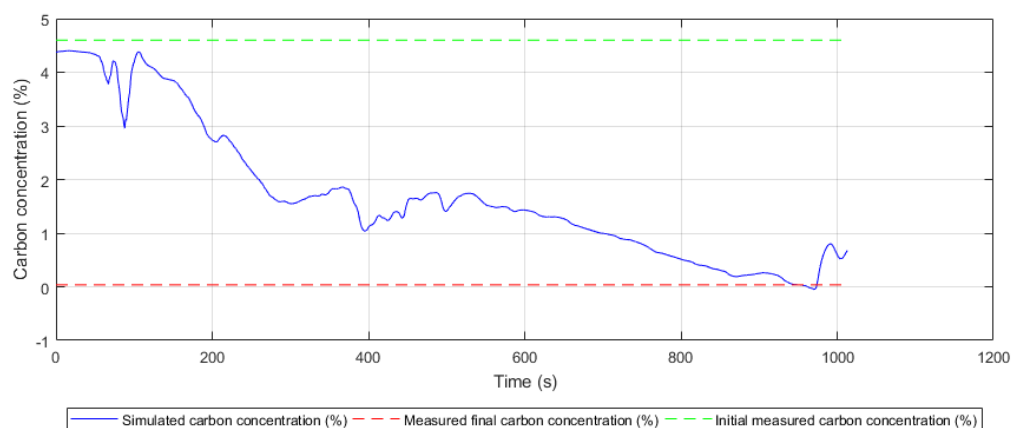
Z Tab. 22 vyplýva, že lepšie výsledky v prípade predikcie koncentrácie uhlíka t.j. menšia priemerná absolútna chyba bola dosiahnutá v prípade použitia polynomickeho kernela. Najnižšia priemerná chyba bola dosiahnutá pri dátach z tavby 43619 (0,05) (Obr. 46). Pre porovnanie priebeh s Gausovým kernelom (Obr. 47) dosahoval vyššiu priemernú chybu a kvalitatívne nebol vyhovujúci. Zaujímavý výsledok z kvalitatívneho hľadiska bol dosiahnutý aj pri tavbe 43601 (chyba bola 0,09) (Obr. 45). Aby sme demonštrovali vplyv zmeny ofsetov v procese učenia a následne vplyv takto naučeného SVR modelu na kvalitu predikcie uvádzame aj priebeh predikcie uhlíka pri nastavenom ofsete 100:200 (pozri Obr. 48a porovnaj s Obr. 46). Väčší horný ofset pri výbere dát spôsobil, že simulovaný priebeh koncentrácie uhlíka vykazoval väčšie preregulovanie na konci tavby resp. záznamu predikcie.



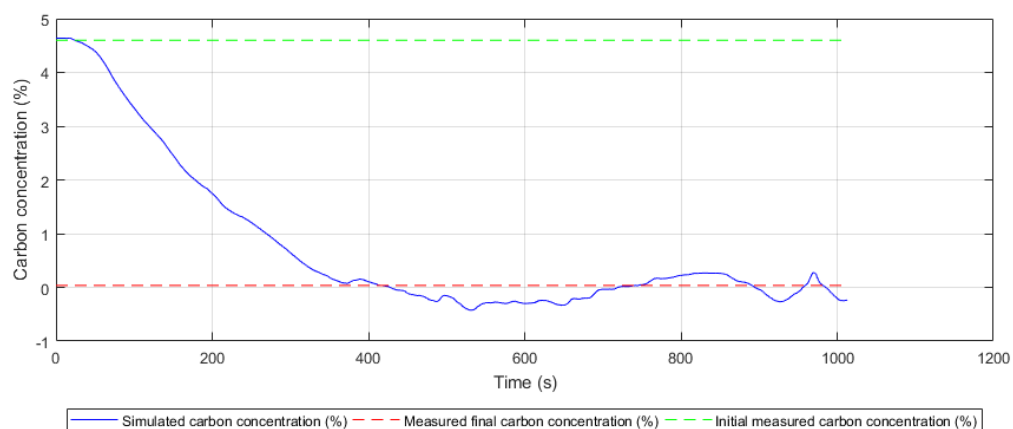
Obr. 45. Priebeh simulovanej koncentrácie uhlíka v tavenine (tavba 43601) – predikcia s Polynomickým kernelom (vid' riadok 2 v Tab. 22s priem. abs. chybou 0,09)



Obr. 46. Priebeh simulovanej koncentrácie uhlíka v tavenine (tavba 43619) – predikcia s Polynomickým kernelom (vid' riadok 12 v Tab. 22s priem. abs. chybou 0,05)



Obr. 47. *Priebeh simulovanej koncentrácie uhlíka v tavenine (tavba 43619) – predikcia s Gaussovým kernelom (viď riadok 11 v Tab. 22s priem. abs. chybou 0,48)*



Obr. 48. *Priebeh simulovanej koncentrácie uhlíka v tavenine – predikcia s Gaussovým kernelom (pri nastavenom ofsete 100:200)*

Záver

Uvedená správa sa venuje návrhu modelov pre nepriame meranie uhlíka a teploty v procese skujňovania v konvertore.

Pre **nepriame meranie uhlíka**, resp. pre ukončenie tavby na základe obsahu uhlíka v tavenine sú v správe popísané nasledujúce matematické modely:

- Bilancie uhlíka z koncentrácie CO a CO₂,
- Relatívnej rýchlosti oduhličenia,
- Gradientu koncentrácie CO₂,
- Využitia derivácií neceločíselného rádu.

Model bilancie uhlíka z koncentrácie CO a CO₂ vychádza z predpokladu, že plocha pod krivkou koncentrácie CO+CO₂ je priamo úmerná uhlíku, ktorý sa priviedol v surovom železe a šrote a následne spálil na CO a CO₂. Výstupom z modelu je hmotnosť uhlíka (kg), resp. koncentrácia uhlíka (%).

Základom modelu relatívnej rýchlosti oduhličenia je priebežný výpočet rýchlosti oduhličenia, ktorá je daná pomerom danej a maximálnej rýchlosti oduhličenia. V porovnaní s modelom bilancie uhlíka nie je potrebný prietok spalín, resp. ich teplota a tlak, čo značne zjednodušuje realizáciu uvedeného modelu.

Model gradientu koncentrácie CO₂ vychádza z poznatku, že v priebehoch koncentrácie CO₂ je v závere fúkania prudký nárast a následne pokles. Vzhľadom na priebehy koncentrácie CO₂, pri sledovaní gradientu koncentrácie, tak by v závere fúkania hodnota gradientu mala nadobúdať kladné hodnoty a mala by sa zvyšovať. Potom by sa hodnota gradientu mala zmeniť na klesajúce záporné hodnoty.

Predchádzajúce modely pre nepriame meranie uhlíka sú založené na ploche pod priebehom CO a CO₂ vychádzajú z aktuálnej, resp. predchádzajúcej hodnoty koncentrácie CO a CO₂, na gradiente koncentrácie CO₂, resp. na relatívnej rýchlosti oduhličenia. Vzhľadom na rozkolísanie hodnôt je preto potrebné uvažovať napríklad kľzavý priemer z posledných, napr. 30 sekundových dát. Z toho vyplýva, že na aktuálnu hodnotu nám vplývajú aj dáta z minulosti, čiže uvažujeme vplyv minulosti, resp. uvažujeme, že prebiehajúci proces má pamäť. Z literárnych zdrojov [2],[3],[4] vieme, že adekvátnejší popis takýchto procesov je s využitím derivácií neceločíselného rádu, ktoré už v samotnej definícii vychádzajú z vplyvu dát z minulosti na súčasnú hodnotu derivácie. Výstupom uvedených modelov je príznak ukončenia tavby, ktorý nadobúda hodnoty 1, resp. 0, t.j. je, resp. nie je koniec fúkania.

Pre **nepriame meranie teploty** je v rámci správy popísaný a čiastočne overený matematický teplotný model. Tento model vychádza z deterministického prístupu. Rýchlosť zmeny teploty taveniny je počítaná z rýchlostí odstraňovania nežiaducich prímies, tavenia šrotu a tavenia vápna. Teplota taveniny sa zvyšuje prostredníctvom tepla uvoľneného pri exotermických reakciách kyslíka s prímiesami kovu, pri zohľadnení tepelnej bilancie procesu, t.j. dodané a spotrebované teplo. Výstupom z modelu je priebeh teploty taveniny v čase.

Komplexný model pre nepriame meranie teploty a uhlíka so spätnou väzbou vychádza z predpokladu, že je meraný prietok konvertorového plynu a jeho zloženie na CO, CO₂ a O₂.

Pri tvorbe komplexného modelu sme vychádzali z určitých zjednodušení vybraných procesov, ktoré predstavujú:

- Proces tavenia šrotu,
- Proces rozkladu troskotvorných prísad,
- Proces oxidácie prvkov C, Si, Fe, Mn, P v tekutom kove,
- Procesy prebiehajúce medzi troskou a tekutým kovom.

Porovnanie výsledkov oboch teplotných modelov, t.j. model teploty a komplexný model, je uvedené v Tab. 23 a v Tab. 24. Lepšie výsledky z hľadiska absolútnej odchýlky dosiahol model teploty uvedený v kapitole 3 v porovnaní s komplexným modelom vid' kapitola 4. U teplotného modelu (kap 3) je cca 69% taviieb s odchýlkou $\pm 16^{\circ}\text{C}$ a u komplexného modelu je to cca 53% taviieb s odchýlkou $\pm 16^{\circ}\text{C}$.

Tab. 23. Porovnanie výsledkov modelov pre teplotu

Tavba č.	T _{nam} (°C)	model teploty (kap. 3)			komplexný model (kap. 4)		
		T _{mod} (°C)	ΔT_{abs} (°C)	ΔT_{rel} (%)	T _{mod} (°C)	ΔT_{abs} (°C)	ΔT_{rel} (%)
43601	1687	1690	-2.6	0.16	1635	52.2	3.09
43607	1655	1639	15.6	0.94	1641	14.0	0.85
43608	1653	1637	15.9	0.96	1640	13.5	0.82
43611	1648	1651	-2.5	0.15	1657	-8.7	0.53
43613	1676	1666	10.1	0.60	1606	69.7	4.16
43619	1702	1717	-15.4	0.90	1700	2.3	0.14
43621	1668	1666	2.1	0.12	1726	-57.8	3.47
43624	1647	1659	-12.5	0.76	1731	-84.1	5.11
43625	1654	1649	5.4	0.33	1708	-53.9	3.26
43626	1656	1621	34.6	2.09	1670	-13.8	0.84
43628	1612	1612	-0.1	0.00	1610	1.8	0.11
43629	1642	1621	21.5	1.31	1630	11.9	0.72
43631	1610	1642	-32.0	1.99	1666	-56.1	3.48
43633	1657	1621	36.3	2.19	1649	7.6	0.46
43637	1657	1671	-14.2	0.86	1647	10.3	0.62
43640	1668	1644	24.4	1.46	1665	3.1	0.18
43643	1625	1624	0.9	0.05	1605	20.3	1.25
43644	1665	1631	34.2	2.06	1636	28.7	1.72
43653	1688	1674	14.4	0.86	1659	29.0	1.72

Tab. 24. Početnosť taviieb v jednotlivých triedach presnosti teplotných modelov

	<i>model teploty (kap. 3)</i>		<i>komplexný model (kap. 4)</i>	
ΔT_{abs}	Počet	Cumulative %	Počet	Cumulative %
8	6	31.58%	4	21.05%
16	7	68.42%	6	52.63%
24	1	73.68%	1	57.89%
32	1	78.95%	2	68.42%
40	4	100.00%	0	68.42%
nad	0	100.00%	6	100.00%

Použitá literatúra

- [1] Laciak, M. a kol.: Výskum nepriameho merania teploty a uhlíka v procese skujňovania (priebežná správa), 2017, Technická univerzita v Košiciach
- [2] Podlubný, I.: Fractional differential equations, San Diego : Academic press, 1999, 340 p., ISBN 0-12-558840-2
- [3] Petráš, I.: Fractional-order nonlinear systems: modeling, analysis and simulation, Berlin : Springer-Verlag, 2011, 218 p., ISBN 978-3-642-18100-9
- [4] Žecová, M., Terpák, J.: Fractional heat conduction models and thermal diffusivity determination, In: Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2015, article ID 753936 (2015), p. 1-9, ISSN 1024-123X
- [5] Takawa, T. et al.: Analysis of Converter Process Variables from Exhaust Gas, Transactions ISIJ, Vol. 28, 1988
- [6] Mikulcic, H. et al.: Numerical modelling of calcination reaction mechanism for cement production, Chemical Engineering Science, Vol. 69, No. 1, 2012, pp 607-615. Chugh, S. S. Thumsi, V. Keshri, A comparative study between least square support vector machine(lssvm) and multivariate adaptive regression spline(mars) methods for the measurement of load storing capacity of driven piles in cohesion less soil, International Journal of Structural and Civil Engineering Research.
- [7] J. Kačur, M. Laciak, M. Durdán, P. Flegner, Utilization of machine learning method in prediction of UCG data, in: 2017 18th International Carpathian Control Conference (ICCC), IEEE, 2017, pp. 278–283.
- [8] Laciak, Marek, Kačur, Ján, Durdán, Milan, Flegner, Patrik, System of indirect measurement temperature of melt with adaptation module - 2015. In: ICCC 2015. - Danvers : IEEE, 2015 P. 277-281. - ISBN 978-1-4799-7369-9
- [9] Karol Kostúr, Marek Laciak, Peter Bubelíny, Modelovanie a optimálne riadenie konvertorového procesu - Košice : Vienaľa, - 2002. - 86 s. - ISBN 80-88922-62-3.
- [10] R. Weeks. Dynamic Model of the BOS Process. in Proceedings of the Conference on Mathematical Process Models in Iron- and Steelmaking. 1973. Amsterdam. The Metals Society, pp 103-116
- [11] J. Schlueter, H.-J. Odenthal, N. Uebber, H. Blom, K. Morik, A novel data-driven prediction model for BOF endpoint, Proceedings of 30th International Steel Industry Conference, Paris, France, December, 2012, pp.28-29.
- [12] S. Bouhouche, Z. Mentouri, H. Meradi and Laib dit Leksir Yazid, Combined Use of Support Vector Regression and Monte Carlo Simulation in Quality and Process Control Calibration, Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Istanbul, Turkey, July 3 – 6, 2012, pp. 2156-2165.
- [13] V. Vapnik, S. Golowich, A. Smola, Support vector method for function approximation, regression estimation, and signal processing, In: M. Mozer, M. Jordan, and T. Petsche, editors, Advances in Neural Information Processing Systems 9, MIT Press, Cambridge, MA, 1997, pp. 281–287.
- [14] F. Parrella: Online Support Vector Regression, A Thesis presented for the degree of Information Science, Department of Information Science, University of Genoa, Italy, June 2007. p. 101

- [15] J. Schlueter, H.-J. Odenthal, N. Uebber, H. Blom, K. Morik, A novel data-driven prediction model for BOF endpoint, Proceedings of 30th International Steel Industry Conference, Paris, France, December, 2012, pp.28-29.
- [16] S. Bouhouche, Z. Mentouri, H. Meradi and Laib dit Leksir Yazid, Combined Use of Support Vector Regression and Monte Carlo Simulation in Quality and Process Control Calibration, Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Istanbul, Turkey, July 3 – 6, 2012, pp. 2156-2165.
- [17] V. Vapnik, S. Golowich, A. Smola, Support vector method for function approximation, regression estimation, and signal processing, In: M. Mozer, M. Jordan, and T. Petsche, editors, Advances in Neural Information Processing Systems 9, MIT Press, Cambridge, MA, 1997, pp. 281–287.
- [18] F. Parrella: Online Support Vector Regression, A Thesis presented for the degree of Information Science, Department of Information Science, University of Genoa, Italy, June 2007. p. 101