VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

VÝPOČTOVÝ SYSTÉM PRO VYHODNOCENÍ VÝROBNÍCH UKAZATELŮ SPALOVEN KOMUNÁLNÍCH ODPADŮ

COMPUTATIONAL TOOL FOR PROCESSING OF PRODUCTION DATA FROM WASTE-TO-ENERGY SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. ONDŘEJ MACHÁT

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. MICHAL TOUŠ, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ondřej Machát

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výpočtový systém pro vyhodnocení výrobních ukazatelů spaloven komunálních odpadů

v anglickém jazyce:

Computational tool for processing of production data from waste-to-energy systems

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá problematikou vyhodnocení parametrů při spalování směsného komunálního odpadu (SKO) v jednotkách EVO. Jedná se především o určení výhřevnosti SKO a účinnosti spalovenského kotle. Student navrhne postup zpřesnění původního odhadu výhřevnosti a účinnosti, který následně implementuje do optimalizačního programu GAMS nebo jiného vhodného software. Použitelnost vytvořeného nástroje bude testována na reálných provozních datech.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámit se s problematikou energetického využití odpadů.
2. Prostudovat předchozí práce zaměřené na problematiku určení výhřevnosti odpadu a účinnosti kotle výpočtem z provozních dat.
3. Návrh postupu zpřesnění výpočtu výhřevnosti směsného komunálního odpadu a účinnosti kotle s využitím statistické analýzy a prvků matematického programování.
4. Vytvořit potřebný model ve vhodném prostředí s uživatelským rozhraním.
5. Řešení případové studie.
6. Diskuse výsledků

Seznam odborné literatury:

HEJL, M. Bilance provozu energetického využití odpadu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 71 s.

PAVLAS, M.; TOUŠ, M.; BENÁČKOVÁ, J.; HEJL, M. Určení výhřevnosti směsného komunálního odpadu statistickou analýzou výrobních ukazatelů ze zařízení EVO. CHISA 2011. 13 s.

BAZARAA, M. S.; SHERALLI, H. D.; SHEETY, C. M. Nonlinear Programming: Theory and Algorithms. John Wiley & Sons, second edition. New York. 1993. ISBN 0-471-55793-5.

FELLNER, J.; CENCIC, O.; RECHBERGER, H. A New Method to Determine the ratio of electricity from Fossil and Biogenic Sources in Waste-to-Energy Plant. Environ. Sci. Technol. (41), pp. 2579-2586. 2007.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Touš, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne

L.S.

_____	_____
prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Ředitel ústavu	Děkan fakulty

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou vyhodnocení parametrů při spalování směsného komunálního odpadu (SKO) v jednotkách EVO. Jedná se především o určení výhřevnosti SKO a účinnosti spalovenského kotle. Je navržen postup pro zpřesnění původního odhadu výhřevnosti a účinnosti, který je následně implementován v prostředí Microsoft Excel. Použitelnost vytvořeného nástroje je vyhodnocena pomocí testovacích i reálných provozních dat.

Abstract

This thesis contains evaluation of crucial operational indicators of a waste-to-energy plant. Above all, it is lower heating value of municipal solid waste and boiler efficiency. An approach for evaluation improvement by mathematical methods is proposed. The approach is implemented in a computational tool developed in Microsoft Excel. The approach is tested and subsequently used for operational data from a real waste-to-energy plant.

Klíčová slova

Účinnost, výhřevnost, vyrovnání dat, detekce hrubých chyb, optimalizace

Keywords

Efficiency, lower heating value, data reconciliation, gross error detection, optimalization

Bibliografická citace

MACHÁT, O. Výpočtový systém pro vyhodnocení výrobních ukazatelů spaloven komunálních odpadů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 51s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Touš, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Výpočtový systém pro vyhodnocení výrobních ukazatelů spaloven komunálních odpadů* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Michala Touše, Ph.D. s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

Ondřej Machát

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Michalu Toušovi, Ph.D. za jeho přístup, trpělivost, invenci a pochopení.

Ondřej Machát

Obsah

Úvod ……. 9

1 Spalovny komunálního odpadu ……. 10

1.1 Rozpracované projekty spaloven ……. 12

1.1.1 ZEVO Chotíkov ……. 12

1.1.2 EVO Komořany ……. 12

1.1.3 KIC Odpady, a.s., Barbora – Karviná ……. 13

1.2 Technologie ……. 13

2 Výpočet výhřevnosti ……. 15

2.1 Výhřevnost směsného komunálního odpadu jako podstatný parametr při návrhu zařízení na energetické využití odpadů ……. 15

2.2 Výpočet výhřevnosti směsného komunálního odpadu z provozních dat 17

3 Výpočet účinnosti ……. 18

3.1 Přímá metoda ……. 19

3.2 Nepřímá metoda ……. 20

3.3 Nepřímá „modifikovaná“ metoda ……. 20

4 Zpřesnění výpočtu výhřevnosti z provozních dat ……. 21

4.1 Chyby v provozních datech ……. 21

4.2 Formulace problému ……. 22

4.3 Test metodiky ……. 23

4.3.1 Zatížení náhodnou chybou ……. 24

4.3.2 Zatížení systematickou chybou ……. 26

4.3.3 Nastavení optimálních vah ……. 31

4.4 Aplikace na reálných datech ……. 35

4.4.1 Detekce hrubých chyb ……. 36

4.4.2 Výsledky po odstranění hrubých chyb ……. 37

Závěr ……. 50

Seznam použité literatury ……. 51

Seznam zkratek ……. 52

Seznam příloh ……. 53

Úvod

Tato práce se bude zabývat problematikou vyhodnocení podstatných parametrů z hlediska provozu při spalování směsného komunálního odpadu (SKO) pro energetické využití odpadů (EVO). Hlavní důraz přitom bude kladen na hodnocení výhřevnosti (anglicky lower heating value - lhv) a účinnosti spalovenského kotle (η) jejichž stanovení spolu úzce souvisí. Tyto vlastnosti mají značnou vypovídací hodnotu o stávajícím stavu či potenciálu zařízení EVO, bývají hlavními vstupními parametry při návrhu nových zařízení. Výhřevnost i účinnost jsou klíčové pro určení zpracovatelské kapacity, množství výroby tepla a elektrické energie nebo pro stanovení efektivity provozu.

Tento text je věnován postupu, kterým bude možné docílit zpřesnění výpočtu výhřevnosti a tedy i účinnosti spalovenského kotle. Oba parametry jsou dopočítávány z měřených hodnot některých veličin. Diskutován bude vliv nepřesností vstupních veličin, možnosti a způsoby jejich odstranění, či odhalení. Vycházet se při tom bude z teorie vyrovnání dat [4].

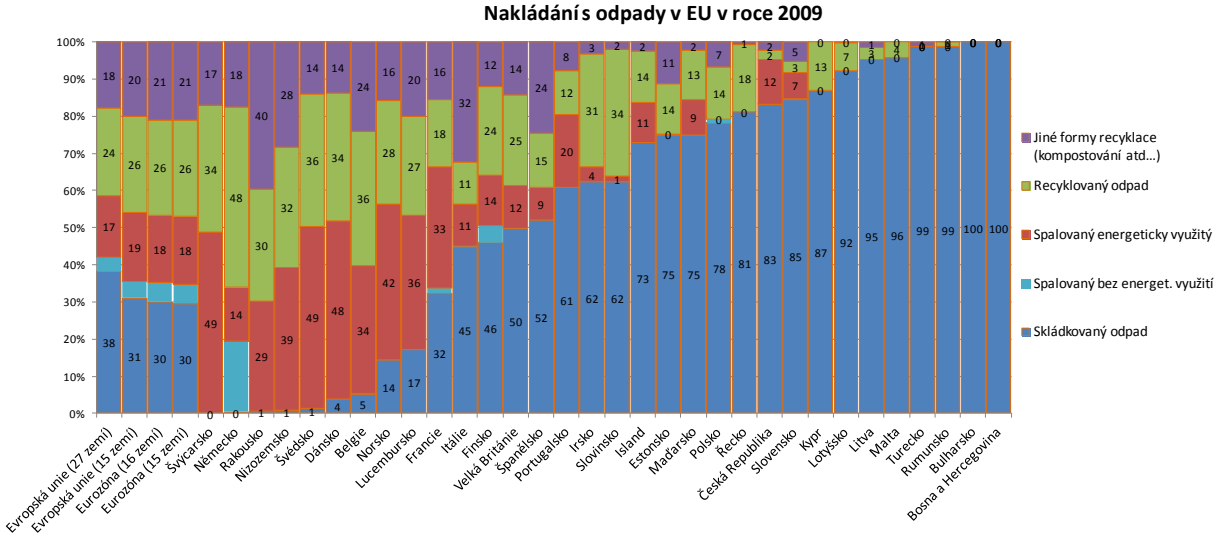
Práce je také součástí aktivit Sekce energetických systémů a simulačních výpočtů, Ústavu procesního a ekologické inženýrství FSI VUT v Brně, pro zmapování hodnot výhřevnosti na území ČR, zpřesnění dosavadních informací a sestavení komplexního ekonomického modelu k efektivnímu plánování nových zařízení EVO. Navazuje tedy na některé starší diplomové práce [5] a studie [6].

První kapitola se věnuje úvodu do problematiky energetického využití odpadů v kontextu odpadového hospodářství České republiky a současnému stavu budovaných zařízení EVO. V další kapitole je popsán význam výhřevnosti pro zařízení EVO a postupy pro její vyhodnocování. Téma účinnosti je pak zpracováno v kapitole 3.

Stěžejní část práce představuje kapitola 4. Věnuje se popisu metody pro zpřesnění výpočtu účinnosti a vyhodnocení této aplikace na testovacích a později i reálných datech. Závěrečná kapitola pak připomíná důležité poznatky této práce a náměty k dalším zlepšením.

1 Spalovny komunálního odpadu

Současné odpadové hospodářství jednotlivých států Evropy je značně rozlišné. Tento stav je dán především snahou o dosažení závazků vzhledem ke směrnici o omezování skládkování č. 1999/31/EC. V ideálním případě by měl být odpad prioritně znovu využit materiálově (recyklován), dále pak energeticky využit, případně spálen bez energetického přínosu, a až poslední možností by mělo být jeho skládkování. Porovnání stavu z roku 2009 vystihuje následující obrázek.



Obr.1: Způsob nakládání s odpadem v zemích EU v roce 2009 [7]

Výše uvedená směrnice zavazuje ČR k redukci množství biodegradabilního materiálu určeného k trvalému uložení na skládky následovně:

- na 75 % úrovně roku 1995 do roku 2010,
- na 50 % úrovně roku 1995 do roku 2013,
- na 35 % úrovně roku 1995 do roku 2020.

Pro dosažení těchto závazků je třeba kvalitní součinnosti v oblasti snižování samotné produkce odpadu, růstu uplatnění materiálového využití druhotných surovin a v neposlední řadě vybudování vhodné infrastruktury odpadového hospodářství, zařízení EVO především.

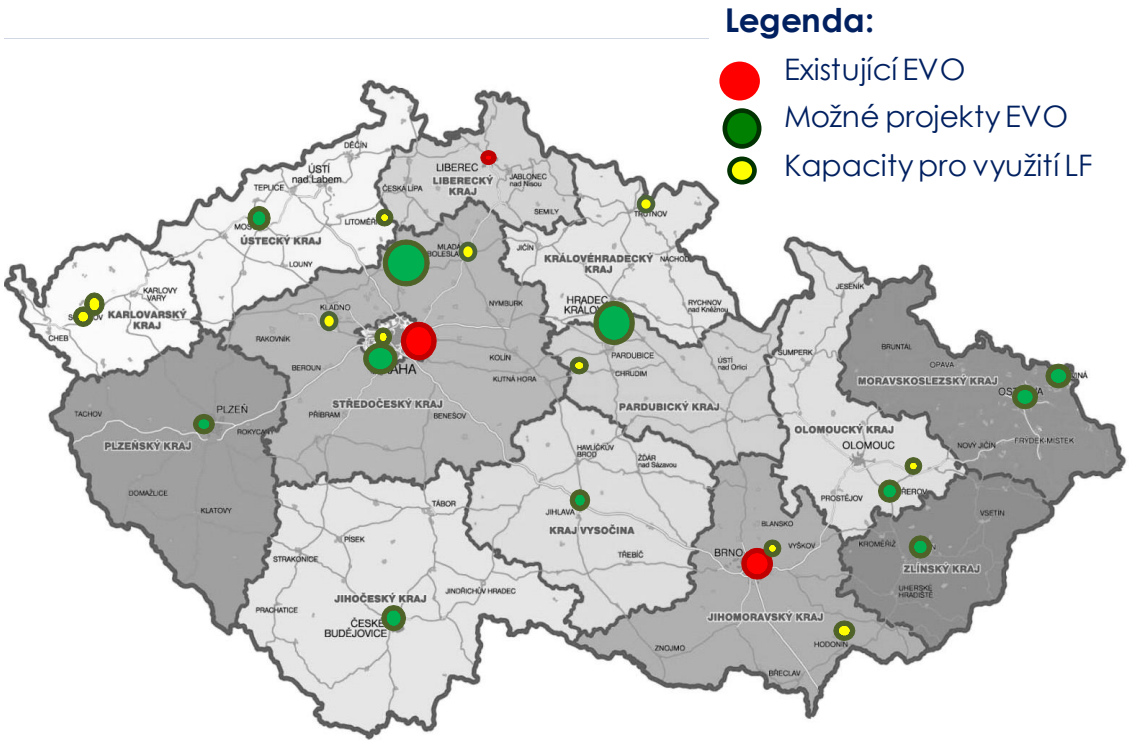
Dle studie Ing. Martin Pavlas, Ph.D. a kolektivu ze srpna 2011 [7] nelze v nadcházejících letech očekávat žádný výrazný pokles produkce odpadu. Z celkového množství odpadu je pouze 1/3 využitelná jako druhotné suroviny, ovšem ani tuto část se nedaří zcela využívat. Jednou z reálných variant řešení k dodržení cílů EU je tedy zřejmě nahrazení skládkování zařízeními EVO.

V současné době se na území ČR nachází 3 provozované spalovny komunálního odpadu. Všechny pracují na principu tzv. kogenerace, která představuje velmi efektivní princip využívání energie. Zařízení tedy nejen že likvidují odpad bezpečně a ekologicky, ale navíc jeho spalováním získávají teplo, respektive elektřinu. Jedná se o ZEVO Malešice (Praha), SAKO Brno a TERMIZO Liberec. Spalovny jsou dohromady schopny zpracovat 650kt/rok.

Jak vyplývá z Tab.1, potenciální množství odpadu k termickému využití značně přesahuje současné zpracovatelské možnosti. Na základě tohoto zjištění a vyhodnocení lokálních možností uplatnění vyrobené energie byly vytipovány oblasti, ve kterých by bylo možné vybudovat další spalovny (viz Obr.2).

Tab.1: Odhad produkce odpadu [7]

	2009	2013		2020	
	produkce SKO+OO	Produkce SKO+OO	K termickému zpracování	Produkce SKO+OO	K termickému zpracování
Praha	561 604	598 913	365 720	691 795	503 642
Jihočeský	190 277	202 918	119 838	234 387	169 834
Jihomoravský	438 306	465 291	281 823	537 450	390 821
Karlovarský	107 226	114 349	69 763	132 083	96 147
Královehradecký	161 480	172 208	99 699	198 914	143 736
Liberecký	174 743	186 352	110 746	215 252	156 106
Moravskoslezský	410 571	437 846	265 516	505 749	367 831
Olomoucký	210 690	224 687	134 482	259 532	188 408
Pardubický	154 634	164 907	98 055	190 481	138 152
Plzeňský	172 073	183 504	117 521	211 963	155 394
Středočeský	520 410	554 982	318 890	641 051	462 747
Ústecký	310 591	331 224	201 510	382 592	278 388
Vysočina	152 042	162 143	95 781	187 288	135 712
Zlínský	180 097	192 061	120 834	221 847	162 212
Celkem ČR	3 742 744	3 991 385	2 034 458	4 610 384	3 349 128



Obr.2: Lokality vhodné pro výstavbu EVO [7]

1.1 Rozpracované projekty spaloven

1.1.1 ZEVO Chotíkov

V současnosti má nejblíže k realizaci projekt Plzeňské teplárenské a.s., spalovna ZEVO Chotíkov, jejíž stavbu již schválilo zastupitelstvo města Plzně. Studii budoucí spalovny o kapacitě 95 kt/rok je možné shlédnout na Obr.3. Zařízení by mělo být vybudováno do konce roku 2015.

Obr.3: Studie ZEVO Chotíkov

ZEVO Chotíkov bude generovat elektrickou energii a teplo ve formě horké vody o parametrech 140 °C/ 70 °C. Elektrická energie bude dodávána do rozvodné sítě, teplo pak do sítě Plzeňské teplárenské. Produkci tepla a elektrické energie popisuje Tab.2.

Tab.2: Plánovaná produkce energií ZEVO Chotíkov

Teplo (jako horká voda)		
Maximální dodávka	22,1 MW	
Roční produkce	107 984 MWh/rok	
Elektrická energie		
Výroba	max 7,3 MW	45 064 MWh/rok
Vlastní spotřeba	max 2,95 MW	22 656 MWh/rok
Dodávka do sítě	max 4,35 MW	22 408 MWh/rok

1.1.2 EVO Komořany

Jedná se o spalovnu situovanou v Ústeckém kraji s navrženou kapacitou 150 kt/rok. V květnu roku 2011 vydalo MŽP souhlasné stanovisko k záměru z hlediska přijatelnosti vlivů na životní prostředí a dalo tak zelenou k další přípravě výstavby tohoto zařízení. Dokončení je plánováno na rok 2015, podobu projektu vystihuje Obr.4.

Obr.4: Studie EVO Komořany

Teplo generované ve spalovně bude vyvedeno do stávajícího rozvodu CZT teplárny Komořany. Vyrobená elektrická energie bude využívána jednak pro vlastní spotřebu, přebytky pak budou dodávány do stávající distribuční sítě. Plánované výstupy zařízení shrnuje Tab.3.

Tab.3: Plánovaná produkce energií EVO Komořany

Teplo (jako horká voda)	
Roční produkce	2 998 519 MWh/rok
Elektrická energie	
Výroba	62 583 MWh/rok
Vlastní spotřeba	16 564 MWh/rok
Dodávka do sítě	46 019 MWh/rok

1.1.3 KIC Odpady, a.s., Barbora – Karviná

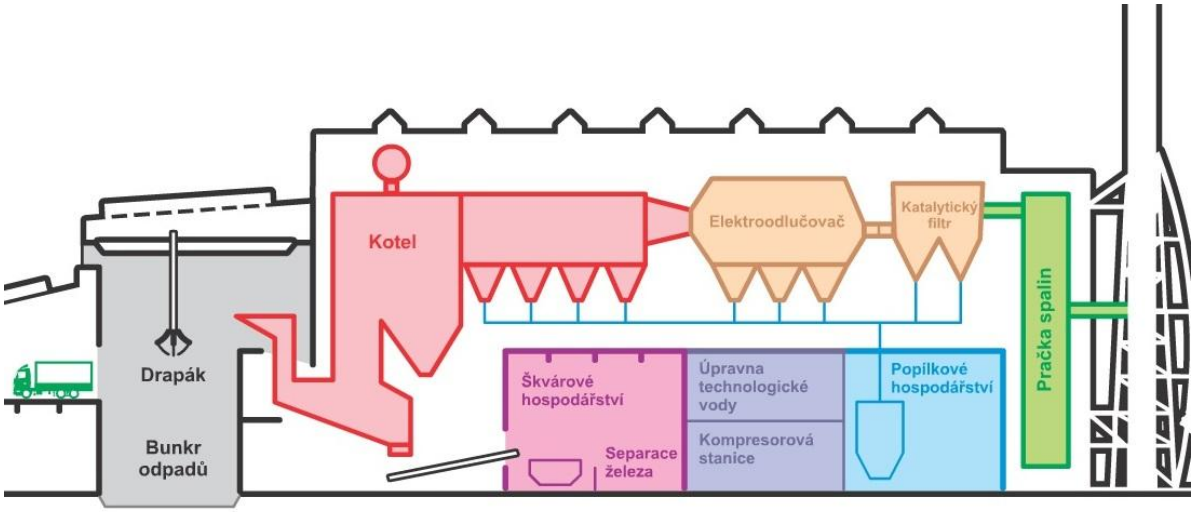
I tato spalovna měla původně zahájit svůj provoz během roku 2015, protože ale projekt nebyl doposud podpořen dotacemi EU, výstavba se odkládá. Pro představu ale dodejme, že kapacita zařízení je navržena na 190 kt/rok.

Na území naší republiky je uvažováno i s dalšími projekty. Ať už se jedná o plány v Jihlavě, Chvaleticích (Pardubicko) či Mydlovarech (Českobudějovicko), realizace vázne především na dotacích, případně pak na odporu místního obyvatelstva.

1.2 Technologie

Samotné fungování a princip energetického využívání odpadů si představíme na příkladu technologie navržené pro EVO Komořany (čerpáno z www.spalovnakomorany.cz).

Jak můžeme vidět na Obr. 5, odpad je svážen do takzvaných bunkrů. Uvnitř jsou instalovány hydraulické nůžky a drtič pro velkoobjemový odpad. Prostor je vybaven čidly pro sledování koncentrace metanu a samozřejmě požárním bezpečnostním systémem. V bunkru je udržován neustálý podtlak, který zabraňuje úniku případného zápachu. Jeřábník drapákem odpad v bunkru neustále promíchává, aby byl dostatečně homogenizovaný před plněním násypky roštového ohniště. Odpad z násypky je automaticky podáván na rošt a spalován. Drapák je vybaven tenzometrickými čidly pro sledování dávkování odpadu do kotle.



Obr.5: Technologie spalovny

Odpady se v kotli spalují při teplotě 950 – 1100°C na posuvném roštu tak, aby došlo k dokonalému prohoření. Pro správné hoření je do kotle vháněn ohřátý spalovací vzduch, který je nasáván z prostoru bunkru (podtlak). K zahřátí kotle na provozní teplotu a prvnímu zapálení

odpadu se používá zemní plyn. Při spalování vznikají spaliny, které ohřívají přiváděnou vodu a přeměňují ji na páru. Pára je z kotle vedena do turbogenerátoru, kde je vyráběna elektřina. Část páry je z turbíny odebírána k ohřevu topné vody, která je dále distribuována do soustavy centrálního zásobování teplem (CZT). Prohořelý odpad ve formě strusky či škváry padá z roštu do vynašeče, kde jsou tyto zbytky ochlazovány.

Po opuštění kotle jsou spaliny přiváděny do filtrační jednotky – elektroodlučovače, kde jsou zbavovány tzv. tuhého úletového popílku. Jedná se o malé částečky z prohořelého odpadu, které strhnul proud spalovacího vzduchu – spalin. Elektroodlučovač je rozdělen na tři sekce a výsledná účinnost separace úletových látek je přes 99 %. Dále jsou spaliny vedeny přes katalitický filtr, kde probíhá kataliticko-oxidační destrukce organických látek typu PCDD/F (dioxinů a furanů) a dodatečná filtrace. Poslední operací před vypuštěním spalin do ovzduší je vícestupňové praní, které pracuje na principu fyzikálně-chemické absorpce. V prvním stupni se spaliny ochladí na z cca 200°C na cca 65°C a odstraní se z nich anorganické kyseliny, těžké kovy a případné zbývající tuhé látky. V druhém stupni dochází k intenzivní vypírce oxidu siřičitého, pomocí cirkulace roztoku hydroxidu sodného. V poslední fázi praní prochází spaliny soustavou Venturiho trysek, kde probíhá odlučování aerosolů. Dále jsou spaliny vedeny přes odlučovač kapek do komína se systémem kontinuálního měření emisí.

Voda používaná v celém procesu prochází samostatným vícestupňovým procesem čištění. Ze škváry a popílku je nejprve odseparován železný odpad, pak jsou odvezeny k dalšímu zpracování (stavební účely), případně jsou pak skládkovány. Popílek z katalytického filtru (odstraňování látek typu PCDD/F) se však s ostatním popílkem nemíchá a odváží se na skládky příslušné kategorie.

V současnosti není v běžném provozu zvykem detailně sledovat a vyhodnocovat hodnoty výhřevnosti a účinnosti. Postupně ale lze očekávat daleko přísnější požadavky a kritéria analýzy těchto hodnot. Evropská komise vydala Best available techniques reference dokument (BREF) s přehledem požadavků a doporučení na zařízení EVO [1], přičemž jedno z doporučení je dlouhodobé sledování parametrů výhřevnosti a účinnosti. Příkladem může být i směrnice 2008/98/ES [2] rozlišující zařízení EVO od zařízení pro pouhé odstraňování odpadu. Hlavním kritériem tohoto rozlišení (R1 efficiency) je vypočtená účinnost, jejímž stěžejním vstupním parametrem je výhřevnost spalovaného odpadu pro vyčíslení energie vnesené odpadem (Obr.X).

Symbolický zápis	Waste-to-Energy systém
$\eta_e = \frac{Q_{prod} - (E_f + I_{imp})}{0{,}97 \cdot (E_w + E_f)}$	$\eta_e > 0{,}6$ $\eta_e > 0{,}65^*$

* Pro zařízení uvedená do provozu po 31.12.2008

Obr.X: Definice kritéria Energy efficiency [6]

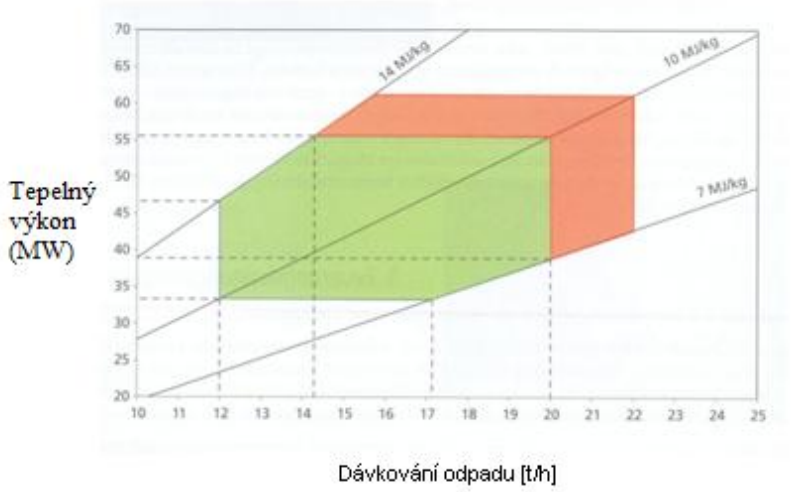
I česká vláda schválila zákon č.165/2012 Sb. [3] o podporovaných zdrojích energie, podle něhož musí EVO dosahovat určitou minimální účinnost, aby dosáhlo na podporu vyrobené elektřiny. Tato je pak klasifikována buď jako elektřina z obnovitelného či druhotného zdroje komunálního odpadu.

2 Výpočet výhřevnosti

Výhřevnost a účinnost jsou vlastnosti zásadně ovlivňující návrh nového zařízení EVO. Navíc spolu velmi úzce souvisejí, jelikož z výhřevnosti se stanovuje účinnost a naopak. Následující podkapitoly se věnují způsobům odhadu (výpočtu) výhřevnosti.

2.1 Výhřevnost směsného komunálního odpadu jako podstatný parametr při návrhu zařízení na energetické využití odpadů

Význam přesné znalosti výhřevnosti demonstruje například výkonový diagram roštu (Obr. 6), který je jedním ze základních dokumentů technologického řetězce energetického využívání odpadů. Diagram dává do souvislosti zpracovatelský výkon (t/h) a teplený výkon uvolněný spalováním paliva. Diagram tak přímo či nepřímo slouží ke správnému dimenzování jednotlivých aparátů spalovny. Při konstrukci výkonového diagramu se vždy vychází z nominálních (předpokládaných) parametrů projektovaného zařízení. Správný odhad očekávané hodnoty výhřevnosti SKO a její variability v průběhu roku i možná změna v budoucnosti je zde zásadní. Výhřevnost SKO je ovlivněna dobou a místem jeho vzniku a z pohledu spalovny pak závisí na svozové oblasti.



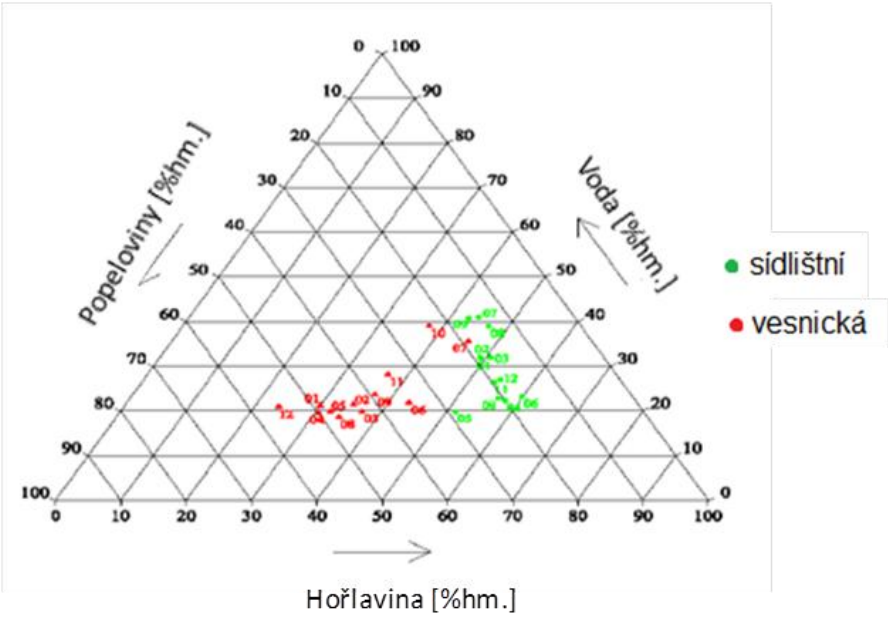
Obr.6: Výkonový diagram roštu

O důležitosti informací v této oblasti svědčí např. zkušenosti z provozu technologie SAKO Brno. Provoz je dimenzován na výhřevnost SKO 11 GJ/t, ale v současnosti je její hodnota mezi 8 a 9 GJ/t. Vzhledem k nedostatku informací a značné nehomogenitě paliva je odhad výhřevnosti SKO problematický. Výzkum v této oblastí může napomoci efektivnějšímu plánování případných dalších zařízení a předcházení provozních problému. Výhřevnost lze obecně určit několika metodami:

- výpočtem na základě známého složení (hrubý a elementární rozbor → spalné teplo → výhřevnost),
- na základě známého frakčního složení a odhadu výhřevnosti frakce (ČSN 06 3090 [8]),
- zpětným výpočtem z provozních dat.

První dvě metody jsou vhodné především pro určení výhřevnosti u homogenních materiálů (uhlí, dříví, atd.). V případě SKO je složení velice proměnné a závisí na velkém množství parametrů. Přesto existují studie a projekty zabývající se strukturou a vlastnostmi odpadu v závislosti na nejrůznějších parametrech [10]. Výsledkem pak může být například ternární

diagram obsahu popelovin, hořlavin a vody v závislosti na domovní zástavbě uvedený na Obr. 7.



Obr.7: Složení odpadu v závislosti na druhu zástavby

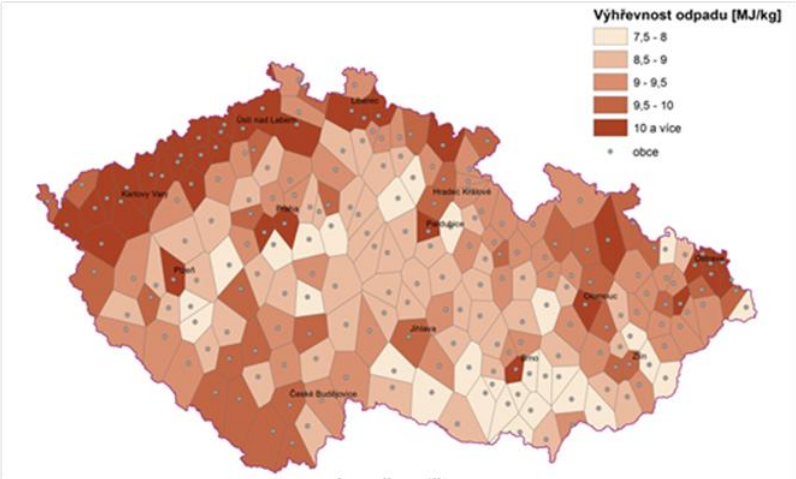
V případě existujícího provozu zařízení EVO se pro stanovení výhřevnosti SKO běžně používá výpočet výhřevnosti z provozních dat (viz kapitola 3.1). Výhřevnost SKO je většinou sledována za delší časový okamžik (typicky rok). Výpočet okamžité výhřevnosti (za krátký časový interval) se v některých provozech používá také pro vlastní řízení spalovacího procesu. Dlouhodobou snahou Sekce energetických systémů a simulačních výpočtů je detailněji analyzovat dostupné informace (analýzy týkající se složení a produkce odpadů v jednotlivých lokalitách, zpracování dat z existujících EVO) a s využitím komplexních statistických nástrojů a teoretických znalostí vytvářet relevantní modely, které v budoucnu napomohou při plánování nových zařízení.

Podstatným bodem je detailní a metodicky jasně definovaná analýza dostupných dat z existujících zařízení EVO, na kterou se zaměřuje tato práce. V kombinaci se znalostí svozových oblastí pro konkrétní zařízení, experimentálních výsledků výzkumu, socio-statistických údajů a zkušeností ze zahraničí, lze v budoucnu očekávat možnost vytvoření relevantních modelů o rozložení výhřevnosti SKO na území ČR.

Pro podporu plánování nových zařízení EVO byl na pracovišti Sekce energetických systémů a simulačních výpočtů sestaven prvotní model pro výpočet výhřevnosti SKO, který vychází plně z výše prezentované filosofie. Model využívá výstupy ze studie [9], kde byly experimentálně zjištěny hodnoty výhřevnosti SKO v sídlištní, venkovské a smíšené zástavbě, a dále informace ČSU (zastoupení bytů a domů v zástavbě v dané oblasti). Modelem vypočítané hodnoty výhřevnosti pro Českou republiku jsou na Obr.8 (rozdělení podle obcí s rozšířenou působností). Vytvořený model v existujícím stavu má zcela jistě celou řadu nedostatků. Jeho kvalita je přímo úměrná množství dostupných dat.

Na dalším zpřesňování tohoto přístupu se neustále pracuje, výsledné údaje jsou používány například v optimalizaci úlohy svozové vzdálenosti odpadů atd.

Další kapitola představuje přístup k výpočtu výhřevnosti směsného komunálního odpadu pomocí empirických vzorců. Vychází se při tom z provozních dat.



Obr.8: Vypočítané hodnoty výhřevnosti v ČR

2.2 Výpočet výhřevnosti směsného komunálního odpadu z provozních dat

V literatuře lze najít několik výpočtových vztahů. Rovnice (1) uvádí vztah doporučený podle metodiky BREF/BAT [11], rovnice (2) pak vztah doporučený v práci D. O. Reinmanna [12]. Vstupními daty pro výpočet jsou hodnoty on-line měřených veličin a archivovaných veličin v řídicím systému EVO.

$$lhv_{W,B} = \frac{1{,}133 \cdot \frac{\dot{m}_{ST,W}}{m_W} \cdot i_{ST,HP,NET} + 0{,}008 \cdot t_{SP4}}{1{,}085} \tag{1}$$

$$lhv_{W,R} = 1{,}133 \cdot \frac{\dot{m}_{ST,W}}{m_W} \cdot i_{ST,HP,NET} + 0{,}008 \cdot t_{SP4} - 0{,}801 \tag{2}$$

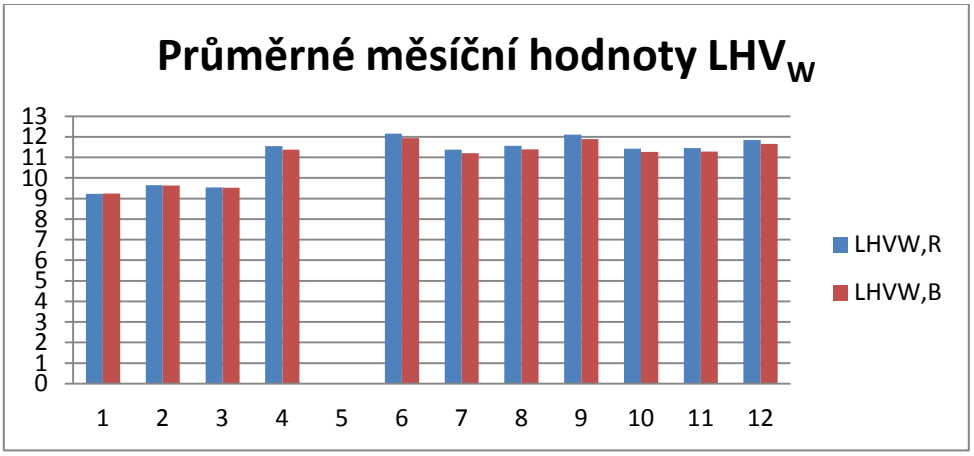
kde

$lhv_{W,B}$	výhřevnost odpadu dle BREF [GJ/t]
$lhv_{W,R}$	výhřevnost odpadu dle Reimanna [GJ/t]
$\dot{m}_{ST,W}$	množství vyrobené páry z odpadu bez podílu páry vyrobené z importované energie [t/r]
$\dot{m}_W$	množství zpracovaného odpadu [t/r]
t_{SP4}	teplota spalin na výstupu z kotle [°C]
$i_{ST,HP,NET}$	rozdíl entalpie páry na výstupu z kotle a napájecí vody na vstupu do kotle [GJ/t]
0,008	specifický energetický obsah ve spalinách s 4 – 12 % O2 [GJ/t*°C]
1,133	koeficient regresní rovnice
0,801	koeficient regresní rovnice
1,085	koeficient regresní rovnice

Výpočty na základě provozních dat z reálného zařízení TERMIZO, a.s. z roku 2009 bylo ověřeno, že oba vztahy vedou k velmi podobným výsledkům výhřevnosti, jak ukazuje Obr. 9.

Oba vztahy vznikly na základě velkého množství dat z různých provozů. Je tedy zřejmé, že nepostihují konkrétní technologické řešení (parametry páry, předehřev vzduchu, recirkulaci spalin). Je tedy zaváděna takzvaná korigovaná výhřevnost, která upravuje vztahy (1) a (2) tak, aby zohledňovaly konkrétní zařízení. Hlavními důvody korekce je [6]:

- Druh vyráběné páry
- Způsob předehřevu vzduchu
- Existence recirkulace spalin

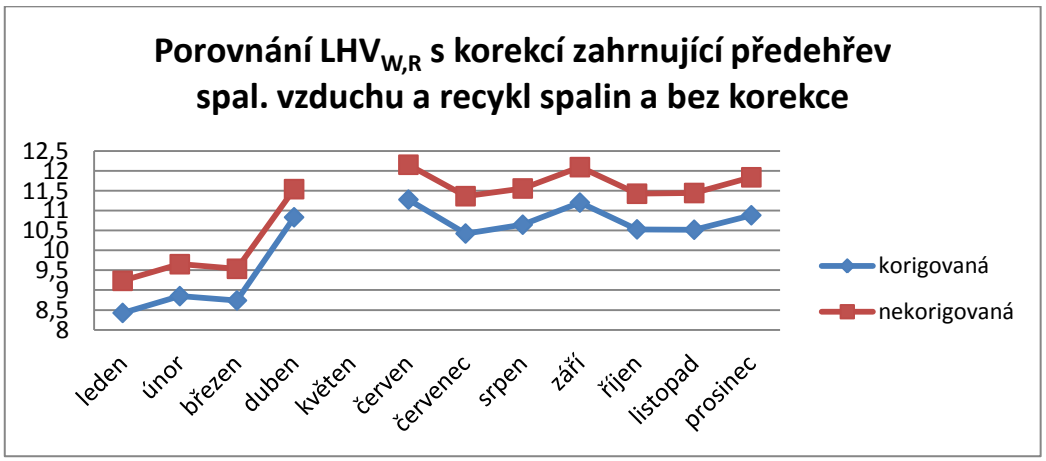


Pozn: Výsledky pro měsíc květen nebyly vyčísleny z důvodu nekompletnosti vstupních dat

Obr.9: Průměrné měsíční hodnoty výhřevnosti dle Riemana a dle BREF [6]

EVO může vyrábět páru o různých parametrech. Buď se jedná o páru z bubnu kotle, která se používá k předehřevu spalovacího vzduchu (nebo pro jiné technologické ohřevy), a nebo o páru z přehříváku, která je následně vedena na turbínu. Způsob předehřevu může být realizován přímo v rámci kotle jako dodatkové teplosměnné plochy, nebo díky dodávce externě vyrobené páry. Recirkulace spalin pak představuje další dodatečný tepelný tok do spalovací komory.

Celkový postup a odvození důvodů korekce lze najít v diplomové práci Ing. Hejla [5]. V dalším textu je uvažováno s korigovanou výhřevností dle Riemana. Představu o míře korekce si lze udělat z Obr. 10.



Obr.10: Porovnání korigované a nekorigované výhřevnosti dle Riemana [6]

Výhřevnost odpadu je jedním z podstatných parametrů výpočtu účinnosti spalovenského kotle a naopak. Výpočtu účinnosti spalovenského kotle se věnuje následující kapitola.

3 Výpočet účinnosti

Účinnost spalovenského kotle patří ke stěžejním technickým ukazatelům provozu zařízení EVO a určuje do jaké míry je zařízení schopno využít energii obsažýenou v odpadu. V dokumentu BREF [1] se uvádí, že by se její hodnota měla pohybovat nad hranicí 80%, což je účinnost odvozená z hodnot existujících zařízení na území Evropské Unie.

K výpočtu účinnosti se v praxi používá buď metoda přímá, nebo nepřímá [13]. Jako kontrolní postup těchto dvou všeobecně známých metod byla na pracovišti Sekce energetických systémů a simulačních výpočtů sestavena ještě třetí metoda označená jako nepřímá "modifikovaná“ (detaily například v [6]). Tab. 4 shrnuje důležité vstupní parametry pro výpočet účinnosti jednotlivými způsoby.

Tab.4: Hlavní vstupní parametry výpočtu účinnosti

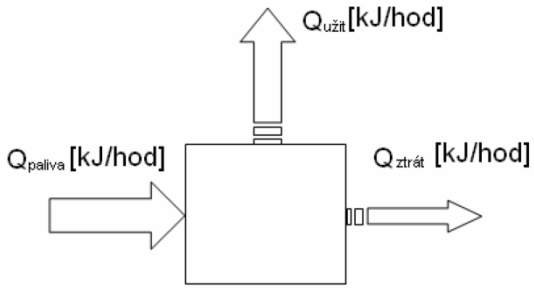
Přímá metoda	**Nepřímá metoda**	**Modifikovaná nepřímá metoda**
výhřevnost	výhřevnost	množství spáleného odpadu
množství spáleného odpadu	množství vyráběné páry	množství vyráběné páry
množství vyráběné páry	teplota spalin za kotlem	teplota spalin za kotlem
entalpie páry	množství spalin za kotlem	množství spalin za kotlem
průtok napájecí vody	obsah CO ve spalinách	obsah CO ve spalinách
entalpie napájecí vody	složení odpadu	složení odpadu
průtok odluhu a odkalu	obsah O2 ve spalinách	obsah O2 ve spalinách
entalpie odluhu a odkalu		

Obecně lze účinnost chápat jako podíl energie vygenerované ku energii vložené. Vyjádřením tohoto podílu v oblasti využití tepla dostáváme:

$$\eta_{kt} = \frac{Q_{užit}}{Q_{paliva}} \tag{3}$$

kde η_{kt} účinnost kotle [-]
$Q_{užit}$ množství tepla dodané pro ohřev vody [kJ/h]
Q_{paliva} množství tepla vzniklé spalováním paliva [kJ/h]

Velikost účinnosti značně ovlivňují tepelné ztráty. Na Obr. 11 nalezneme schéma vyjadřující množství tepla uvolněného spalováním paliva, které nepřechází do aktivní výroby teplosměnného media.



Obr.11: Schéma energetických toků [14]

3.1.1 Přímá metoda

Do výpočtu přímou metodou vstupují parametry, které v provozních podmínkách EVO, mohou být zatíženy značnou chybou měření. Jedná se hlavně o určení výhřevnosti, množství materiálu dávkovaného do spalovací komory, a v některých případech rovněž průtoku páry na výstupu z kotle. Využíváme vztahu:

$$\eta_p = \frac{\dot{m}_{ST,W} \cdot i_{ST,HP,NET}}{\dot{m}_W \cdot lhv_W} \tag{4}$$

kde

η_p	účinnost přímou metodou
lhv_W	výhřevnost odpadu [GJ/t]
$\dot{m}_{ST,W}$	množství vyrobené páry z odpadu bez podílu páry vyrobené z importované energie [t/r]
$\dot{m}_W$	množství zpracovaného odpadu [t/r]
$i_{ST,HP,NET}$	rozdíl entalpie páry na výstupu z kotle a napájecí vody na vstupu do kotle [GJ/t]

3.1.2 Nepřímá metoda

Nepřímá metoda odstraňuje problém se stanovením hmotnosti spáleného paliva. Oproti přímé metodě zde vystupuje pouze jeden parametr zatížený značnou chybou, a to výhřevnost odpadu. Účinnost kotle se stanovuje na základě odečtů jednotlivých druhů ztrát od ideálního předpokládaného stavu. Ztráty jsou způsobeny nedokonalostí spalování a nemožností využít veškeré teplo uvolněné spalováním paliva. Nepřímá metoda definuje účinnost jako:

$$\eta_N = 100 - Q_{ztráty} = 100 - (\xi_{MN} + \xi_{CN} + \xi_f + \xi_k + \xi_{SV}) \tag{5}$$

kde

η_N	účinnost kotle nepřímou metodou [%]
$Q_{ztráty}$	celkové ztráty [%]
ζ_{MN}	ztráta mechanickým nedopalem [%]
ζ_{CN}	ztráta chemickým nedopalem [%]
ζ_f	ztráta citelným teplem tuhých zbytků [%]
ζ_k	ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta) [%]
ζ_{SV}	ztráta sdílením tepla do okolí [%]

Podrobnější rozbor jednotlivých ztrát lze nalézt ve [14].

3.1.3 Nepřímá „modifikovaná“ metoda

Tato metoda byla navržena na pracovišti Sekce energetických systémů a simulačních výpočtů a v běžné technické praxi se nepoužívá. Budeme ji ale nadále považovat za jeden z možných postupů k získání hodnoty účinnosti. Vycházíme ze vztahu (3), který upravíme:

$$\eta_{kt} = \frac{Q_{užit}}{Q_{paliva}} = \frac{Q_{užit}}{Q_{užit} + Q_{ztráty}} \tag{6}$$

Dosazením rovnice (5) a převrácením zlomku lze vyjádřit:

$$\frac{1}{\eta_m} = \frac{Q_{užit} + Q_{ztráty}}{Q_{užit}} = 1 + \frac{Q_{ztráty}}{Q_{užit}} = 1 + (\xi_{MN} + \xi_{CN} + \xi_f + \xi_k + \xi_{SV}) \tag{7}$$

Jestliže v případě výše uvedené nepřímé metody bylo pro všechny součinitele ztrát typické, že ve jmenovateli vystupovala výhřevnost paliva, v tomto případě je výhřevnost nahrazena jednotkovým vyrobeným teplem. Pro výpočet účinnosti modifikovanou metodou je zapotřebí určitá úprava ztrátových koeficientů. Postup je popsán diplomové práci Ing. Koláčka [14].

Doposud byla vytvářena rešerše stávajících postupů pro určení hodnot výhřevnosti a účinnosti. Úkolem této práce je ovšem návrh výpočtového systému pro zpřesnění těchto parametrů. Takovému návrhu je věnována následující kapitola.

4 Zpřesnění výpočtu výhřevnosti z provozních dat

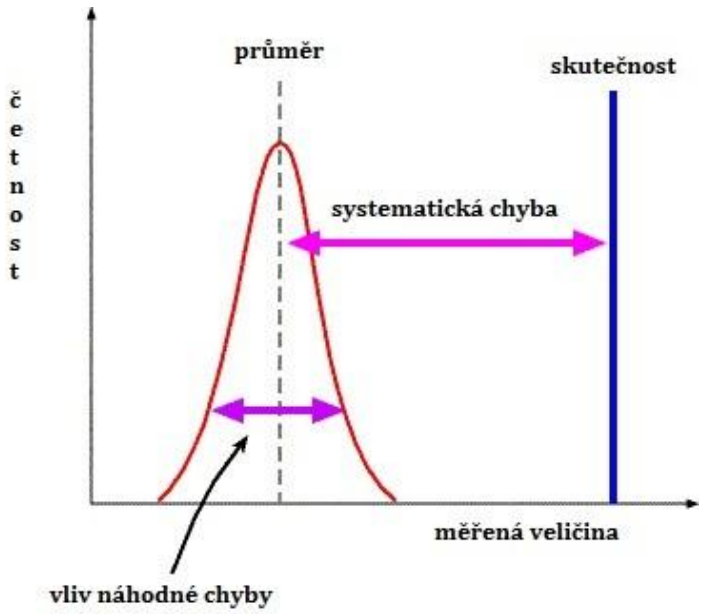
Každý přístup pro výpočet účinnosti uvažuje různé vstupní proměnné a parametry. Teoreticky by měly všechny tyto způsoby výpočtu dávat totožné výsledky. Protože ale hodnoty každé z proměnných jsou zatíženy určitou chybou (danou nepřesným měřením nebo nepřesným odhadem), účinnosti se liší. Této vlastnosti se v prezentovaném postupu využívá k zpřesnění výpočtu výhřevnosti. V dalším je uvažována většina vstupních parametrů jako chybami nezatížené. Nepřesnosti jsou připouštěny pouze v případě tří nejpodstatnějších parametrů:

- výhřevnost SKO (lhv_W)
- množství spalovaného SKO ($\dot{m}_W$)
- množství generované páry ($\dot{m}_{ST,W}$)

4.1 Chyby v provozních datech

V problematice spalování odpadu se při sledování dat naráží na mnoho nepřesností. Už jen samotné složení odpadu a tím pádem i výhřevnost jsou údaje v provozu prakticky nezměřitelné. Odhad jejich hodnot je tedy zajisté více či méně zatížen určitou chybou. Ostatně veškeré měřicí přístroje (průtokoměry, teploměry, tlakoměry) mohou pracovat nepřesně. Pokud by se nějakým způsobem podařila zjistit velikost chyby zkreslující jednotlivé proměnné, bylo by možné dosáhnout (jejich umělým odstraněním) do jisté míry totožných výsledků u všech způsobů výpočtu účinnosti kotle.

Uvažujeme dva druhy chyb – náhodné a systematické. Náhodná chyba vzniká v důsledku různých náhodných vlivů. Je to tedy náhodná veličina a předpokládá se, že se řídí normálním rozdělením pravděpodobnosti s nulovou střední hodnotou (průměrem). Systematická chyba představuje posun (vzdálenost) střední hodnoty (průměru) od nuly. Představme si například opakované měření hmotnosti výrobku na ručičkové váze. Za náhodnou chybu je možné považovat chybné odečtení váhy – přehlednutí se. Systematickou chybu pak lze charakterizovat například jako váhu misky, na které je výrobek vážen, a jejíž váha se při odečtu neuvažuje. Vytvoří-li se z takto naměřených hodnot histogram (graf četností jednotlivých výsledků měření), vznikne tzv. Gaussova křivka. Oba druhy chyb jsou znázorněny na Obr. 12.



Obr. 12: Znázornění náhodné a systematické chyby

4.2 Formulace problému

Metoda je založena na technice vyrovnání dat (detaily lze nalézt v literatuře, např. [4]). Princip metody vyrovnání dat spočívá v tom, že upravíme (vyrovnáme) naměřené hodnoty tak, aby splňovaly bilanční rovnice popisující daný proces, a zároveň aby rozdíl mezi vyrovnanou a původně naměřenou hodnotou byl co nejmenší. Jedná se tedy o úlohu optimalizace. Tento princip lze využít i pro zpřesnění výpočtu (nejen) výhřevnosti. V tomto případě je požadavek na splnění bilančních rovnic nahrazen požadavkem na rovnost účinností vypočítaných jednotlivými metodami (přímá, nepřímá, modifikovaná) a vyrovnávanými parametry jsou výhřevnost, množství odpadu a množství páry. Účelovou funkci, kterou chceme minimalizovat, definujeme takto

$$(lhv_W - X \cdot lhv_W)^2 + (\dot{m}_W - Y \cdot \dot{m}_W)^2 + (\dot{m}_{ST,W} - Z \cdot \dot{m}_{ST,W})^2 \quad (8)$$

Rovnicemi (4), (5) a (7) máme definovány způsoby výpočtu účinností, uvažujeme nepřesnosti vstupních veličin pouze v případě lhv_W, $\dot{m}_W$ a $\dot{m}_{ST,W}$, z Tab.4 dále víme, že do výpočtu jednotlivých účinností vstupují vždy minimálně dvě z námi sledovaných proměnných.

Aby bylo nějakým způsobem možné popsat velikost chyby, kterou je daná vstupní charakteristická veličina zatížena, zavádíme následující parametry:

- X – chybový koeficient výhřevnosti
- Y – chybový koeficient množství spalovaného odpadu
- Z – chybový koeficient množství generované páry

Chybové koeficienty tedy charakterizují odezvu výpočtu na chybu vnesenou vstupní proměnnou. Přirozená je pak snaha najít takové koeficienty X, Y a Z, které dosahují hodnoty co nejbližší 1, a zároveň splňují následující požadavky na rozdíly účinností:

$$(\eta_p - \eta_n)^2 \leq p \quad (9)$$

$$(\eta_p - \eta_m)^2 \leq p \quad (10)$$

$$(\eta_m - \eta_n)^2 \leq p \quad (11)$$

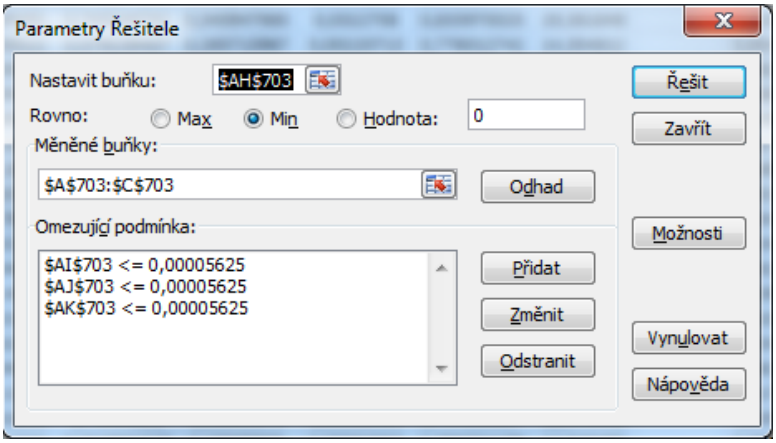
kde p je maximální zvolený rozdíl mezi účinnostmi. V ideálním případě by bylo voleno p=0, v praxi je ale uvažována přesnost nižší, tedy p>0. Při výpočtu pro p=0 totiž matematický model dostatečně rychle nekonverguje. Důvodem může být výpočtová náročnost postupu, ale také možnost, že řešení s nulovým rozdílem účinností zkrátka neexistuje.

Úloha je zpracována v uživatelsky nenáročném a přehledném prostředí Microsoft Excel 2007 s využitím optimalizačního nástroje *Řešitel*. Příklad výchozího nastavení výpočtu pro jeden řádek (jednu trojici účinností) znázorňuje Obr.13. Pro zjednodušení byl ve skriptu *Makro1* vytvořen také cyklus v nástavbovém prostředí VBA (Visual Basic for Applications), který lze najít na Obr.14.

Ve skriptu vidíme cyklus, který na řádcích 4 až 703 definuje nastavení parametrů *Řešitele*. Dochází tedy k minimalizaci (MaxMinVal:=2) účelové funkce přítomné v buňce AH (SetCell:="AH") změnou hodnot v buňkách A, B a C (ByChange). Navíc cyklus přiřazuje výpočtu jednotlivá omezení (SolverAdd CellRef) v příslušných buňkách, které musí být menší než (Relation:=1) zvolená hodnota (FormulaText:=). Natavení možností Řešitele (SolverOptions) nastavuje maximální dobu řešení jednoho řádku na 10000 sekund (MaxTime), připouští 10000 ireací (Iterations) a přesností (Precision) řešiče na šest desetinných míst.

Uspořádání dat a definice vztahů lze najít například v příloze *Real_data.xlxs*, z kapacitních důvodů není v této práci zobrazen žádný náhled prostředí.

Zda je myšlenka a formulace úlohy správná je testováno a diskutováno v kapitole 4.3.



Obr.13: Příklad nastavení řešitele

```
Sub Makro1()
'
' Makro1 Makro
'

'

    Dim i As Integer
For i = 4 To 703
SolverReset
    SolverReset
    SolverOk SetCell:="AH" & i, MaxMinVal:=2, ValueOf:="0", ByChange:=Range("A" & i, "C" & i)
     SolverOptions MaxTime:=10000, Iterations:=10000, Precision:=0.000001
    SolverAdd CellRef:="AI" & i, Relation:=1, FormulaText:="0,00005625"
    SolverOk SetCell:="AH" & i, MaxMinVal:=2, ValueOf:="0", ByChange:=Range("A" & i, "C" & i)
     SolverOptions MaxTime:=10000, Iterations:=10000, Precision:=0.000001
    SolverAdd CellRef:="AJ" & i, Relation:=1, FormulaText:="0,00005625"
    SolverOk SetCell:="AH" & i, MaxMinVal:=2, ValueOf:="0", ByChange:=Range("A" & i, "C" & i)
     SolverOptions MaxTime:=10000, Iterations:=10000, Precision:=0.000001
    SolverAdd CellRef:="AK" & i, Relation:=1, FormulaText:="0,00005625"
    SolverOk SetCell:="AH" & i, MaxMinVal:=2, ValueOf:="0", ByChange:=Range("A" & i, "C" & i)
     SolverOptions MaxTime:=10000, Iterations:=10000, Precision:=0.000001
    SolverSolve (True)
Next i
End Sub
```

Obr.14: Cyklus pro automatizaci výpočtu

4.3 Test metodiky

Než se pustíme do analýzy dat získaných z reálného provozu, je zapotřebí otestovat funkčnost výše navrženého výpočtového modelu. Vychází se z teoretických hodnot, vycházejících ze simulace určitého provozního stavu pomocí bilančního softwaru. Jde tedy o hodnoty nezatížené chybou – referenční. Pro tyto hodnoty se účinnosti rovnají.

Postupně jsou generovány umělé chyby o různé intenzitě, kterými jsou teoretické hodnoty zatěžovány. Poté je vyhodnocena reakce modelu (hodnoty jednotlivých účinností a chybových koeficientů). Teoretické hodnoty (startovací hodnoty výpočtu) jsou dopočítávány z účinností stanovených na 86,5% (průměrná účinnost kotlů). Tomu odpovídají hodnoty uvedené v Tab. 5.

Tab.5: Startovací hodnoty výpočtu

proměnná	hodnota	jednotka
lhv_W	10,553	GJ/t
$\dot{m}_W$	11,747	t/h
$\dot{m}_{ST,W}$	39,316	t/h

K těmto středním hodnotám (normálního rozdělení) je generováno 500 hodnot zatížených uměle simulovanou chybou (s náhodnou a systematickou složkou). Vznikne tak soubor pětiset hodnot, jejichž střední hodnota je díky vlivu systematické složky vychýlena vzhledem k referenční hodnotě a jejichž rozptyl je dán velikostí náhodné složky.

Jednotlivé sčítance účelové funkce (8) lze ovlivnit takzvanou vahou. Vahou rozumíme koeficient (kladné reálné číslo), který zohledňuje přesnost měření (odhadu) příslušného parametru. Tím se povoluje či zpřísňuje velikost rozdílu mezi ideální a vyrovnanou hodnotou.

Představit si tyto váhy lze na příkladě věznic. Dle zkušeností s odsouzeným (např. vzhledem k povaze jeho trestného činu) je tento umístěn buď do domácího vězení, do věznice s dohledem, nebo do věznice se zvýšenou ostrahou. Činí se tak z důvodu různé pravděpodobnosti jejich útěku a páchání dalších trestných činů. Stejně tak na základě praxe můžeme v oblasti spalování odpadů očekávat větší nepřesnosti při dávkování odpadu do spalovací komory než u měření průtoku vyrobené páry apod.

Účelová funkce s váhami *u*, *v* a *w* by vypadala takto

$$u \cdot (lhv_W - X \cdot lhv_W)^2 + v \cdot (\dot{m}_W - Y \cdot \dot{m}_W)^2 + w \cdot (\dot{m}_{ST,W} - Z \cdot \dot{m}_{ST,W})^2 \qquad (12)$$

Dodejme ještě, že v testovém výpočtu je uvažován maximální zvolený rozdíl mezi účinnostmi p=0,35%. Tato hodnota je volena na základě testování konvergence výpočtu a zaručuje rozdíl mezi konečnými účinnostmi v maximální výši 0,35%.

Postupně byla otestována reakce matematického modelu na data obsahující uměle vytvořenou náhodnou chybu, dále chybu systematickou, jejich kombinace, a také vliv váhových koeficientů. Celkem došlo k propočtům 33 variantních možností umělého rozhození dat. Jejich celkový přehled lze najít v příloze *Umele_rozhozeni.xls*.

4.3.1 Zatížení náhodnou chybou

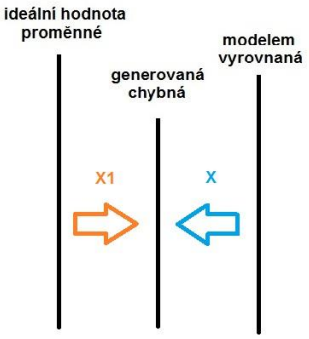
Z několika testovaných variant uvedeme v tomto textu pouze výsledky z případu uměle vytvořené náhodné chyby ve výši 3% pro všechny tři proměnné. Jak si lze všimnout v Tab. 6, pro všechny proměnné vychází průměr roven téměř přesně 1. Je tedy neměnný, což odpovídá očekávání. Rovnost průměru a mediánu potvrzuje navíc fakt, že hodnoty přísluší normálnímu rozdělení.

V dalších tabulkách jsou proměnné označeny tak, že první písmeno značí druh zatížení dat (kombinaci náhodné a systematické chyby) a volbu váhy, písmena X, Y a Z pak značí dříve definované chybové koeficienty.

Tab.6: Zatížení náhodnou chybou

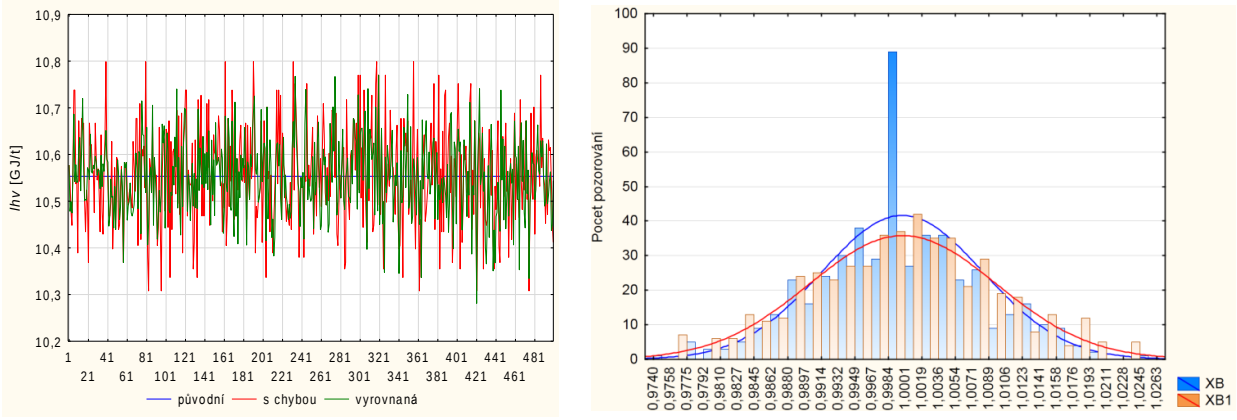
proměnná	náhodná	system.	váha	Průměr	Medián	Rozptyl	Sm.Odch
BX	3	0	1	0,9997	1,0000	0,0001	0,0083
BY	3	0	1	0,9998	1,0000	0,0000	0,0058
BZ	3	0	1	1,0000	1,0000	0,0000	0,0005

Sledujeme odezvu systému na chybami zatížená vstupní data. Na modrých křivkách histogramů je vynášen podíl modelem vyrovnaných proměnných ku generovaným chybným (naše chybové koeficienty X, Y, Z), oranžovou barvou pak poměr ideálních ku generovaným chybným (X1, Y1, Z1). Barevné odlišení spojnicových grafů je uvedeno přímo v legendě. Znázornění odezvy si lze představit pomocí Obr. 15.



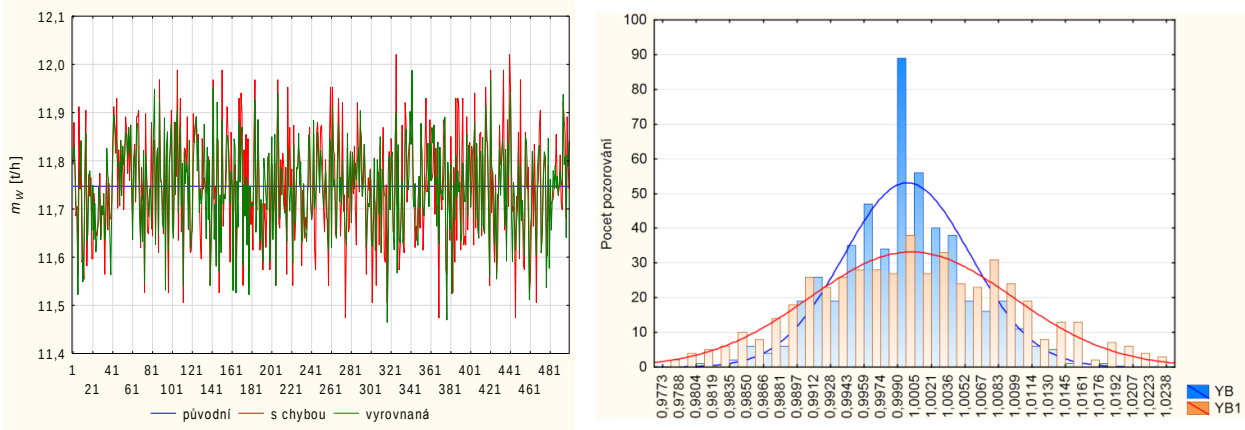
Obr.15: Znázornění odezvy modelu na velikost chyby

Na dalších třech uvedených obrázcích (Obr. 16-18) lze sledovat jednak histogramy jednotlivých proměnných (v duchu Obr. 15), ale také spojnicové grafy rozložení dat generovaných a vyrovnaných vzhledem ke startovací hodnotě. Na histogramech je vidět, že jednotlivé chybové koeficienty (modré křivky) se shodují v průměru, ovšem šíře pásma jejich hodnot se liší. Zatímco X poměrně přesně kopíruje generované chyby, Y, a především pak Z, značně krátí šíři histogramu. To znamená, že systém byl méně nucen reagovat na chybu $\dot{m}_W$, a téměř vůbec nebylo nutné korigovat vstupní data $\dot{m}_{ST,W}$ k tomu, abychom dosáhli „shodných" účinností.



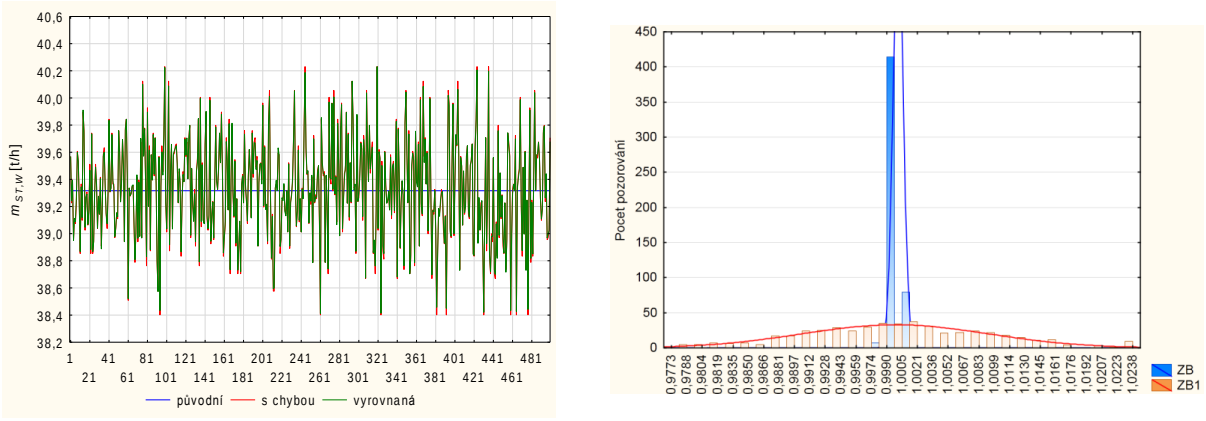
a) b)

Obr.16: Vyrovnání výhřevnosti s náhodnou chybou a) spojnicový graf, b) histogram chybových koeficientů



a) b)

Obr.17: Vyrovnání množství odpadu s náhodnou chybou a) spojnicový graf, b) histogram chybových koeficientů



a) b)

Obr.18: Vyrovnání množství páry s náhodnou chybou a) spojnicový graf, b) histogram chybových koeficientů

Lze konstatovat, že pokus o vyrovnání takto malých náhodných chyb (do 3 %) je bez efektu. To je pravděpodobně způsobeno tím, že chyba je natolik malá, že omezující podmínky jsou většinou prakticky splněny ještě před začátkem výpočtu.

Dále je možné si všimnout, že zatímco v případě výhřevnosti a množství odpadu k určité vyrovnávací reakci došlo, v případě množství páry je reakce nulová. Tento výsledek zdůvodňuje následná analýza vlivu chyb u jednotlivých parametrů. Vliv chyb u jednotlivých parametrů je ukázán pomocí regresních koeficientů. Hledáme regresní funkci vyjadřující závislost účinnosti (přímé, nepřímé, modifikované) na výhřevnosti, množství odpadu a množství páry. Velikost regresních koeficientů pak určuje velikost jednotkové změny účinnosti při změně daného parametru. Regresní koeficienty jsou uvedeny v Tab. 7.

V případě přímé účinnosti má lhv_W a $\dot{m}_W$ zhruba stejný vliv ($\dot{m}_W$ o něco menší), výrazněji menší vliv má $\dot{m}_{ST,W}$. Při výpočtu nepřímou metodou je zcela bez vlivu $\dot{m}_W$ a $\dot{m}_{ST,W}$ má výrazně menší vliv než lhv_W. Konečně v případě modifikované metody je vliv lhv_W ve srovnání s $\dot{m}_W$ a $\dot{m}_{ST,W}$ výrazně nižší. Z těchto výsledků je patrné, že lhv_W je v rámci všech tří metod nejvlivnější parametr. Je to z toho důvodu, že $\dot{m}_{ST,W}$ má celkově nejnižší vliv, a ačkoliv $\dot{m}_W$ má celkový vliv srovnatelný s vlivem lhv_W, je vliv $\dot{m}_W$ výrazně oslaben nulovým efektem v rámci nepřímé metody.

Tab.7: Vliv vstupních proměnných ve výpočtu účinnosti jednotlivými metodami

proměnná	přímá	nepřímá	modifikovaná
lhv_W	-0,0837	0,0122	-0,0006
$\dot{m}_W$	-0,0752	0	-0,0098
$\dot{m}_{ST,W}$	0,0226	0,0002	0,003

Zajímavé je ještě srovnání regresních koeficientů mezi jednotlivými metodami výpočtu účinnosti. Přímá metoda reaguje na chybu v parametru mnohem výrazněji než další dvě. To znamená, že účinnost vypočítaná přímou metodou bude vždy více odchýlena od správné hodnoty, a zřejmě tedy bude hlavní „hnací silou“ vyrovnání.

4.3.2 Zatížení systematickou chybou

Nyní bude k náhodné chybě z předchozí kapitoly přidána také chyba systematická. Testováno je několik variant zatížení klíčových proměnných. V případě množství odpadu volíme systematickou chybu stále rovnu 5%. Předpokládáme totiž, že při dávkování odpadu do pece je nejpravděpodobnější úbytek odpadu vytroušením. Celkový přehled testovaných případů je uveden v Tab. 8. Proměnné jsou značeny vždy dvěma písmeny. První z nich

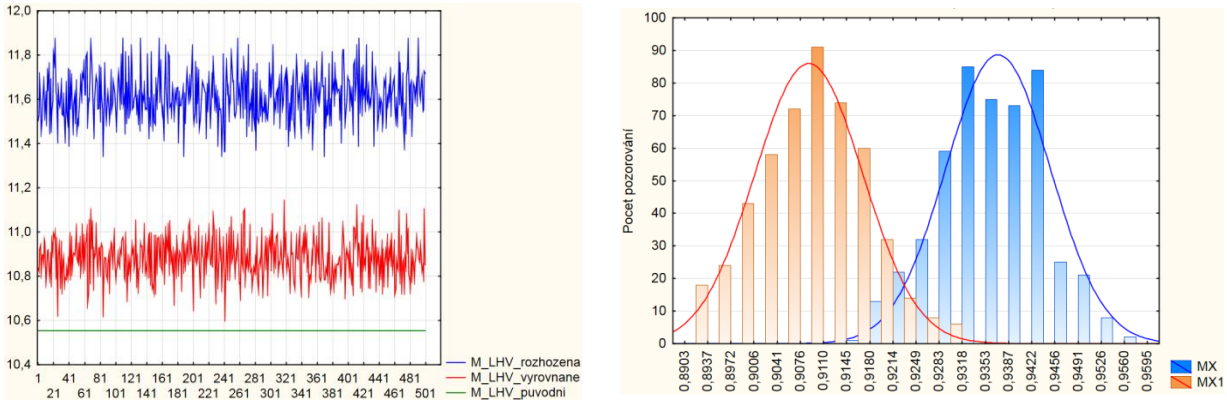
(případně i v kombinaci s číslovkou) označuje testovanou variantu uvažovaného zatížení, druhé pak symbolizuje dříve zavedené chybové koeficienty.

Jak si lze všimnout, použití samotné účelové funkce (8) a omezujících podmínek (9), (10) a (11) nevyvolává u všech uvedených variant ideální odezvu. Tento jev je způsoben především vlivem vstupních proměnných ve výpočtu účinnosti uvedeným v předchozí kapitole. Přesto lze konstatovat spokojenost s výsledky variant D, E, M i N, kdy průměry (mediány) reagují očekávaným způsobem. Tedy že kladnou chybu umírňují chybovým koeficientem menším než 1 a naopak zápornou chybu napravují násobkem větším než 1.

Tab.8: Testované varianty systematických chyb

proměnná	náhodná	system.	váha	Průměr	Medián	Rozptyl	Sm.Odch
DX	3	0	1	0,9747	0,9749	0,0001	0,0092
DY	3	5	1	0,9841	0,9844	0,0000	0,0058
DZ	3	0	1	1,0015	1,0015	0,0000	0,0006
EX	3	10	1	0,9234	0,9235	0,0001	0,0078
EY	3	5	1	0,9416	0,9418	0,0000	0,0059
EZ	3	0	1	1,0054	1,0054	0,0000	0,0006
MX	3	10	1	0,9369	0,9369	0,0001	0,0078
MY	3	5	1	0,9516	0,9519	0,0000	0,0059
MZ	3	3	1	1,0043	1,0042	0,0000	0,0006
NX	3	10	1	0,9088	0,9091	0,0001	0,0075
NY	3	5	1	0,9310	0,9310	0,0000	0,0055
NZ	3	-3	1	1,0067	1,0067	0,0000	0,0006
FX	3	-10	1	1,0409	1,0412	0,0001	0,0107
FY	3	5	1	1,0210	1,0210	0,0000	0,0055
FZ	3	0	1	0,9980	0,9979	0,0000	0,0005
OX	3	-10	1	1,0592	1,0586	0,0001	0,0106
OY	3	5	1	1,0306	1,0303	0,0000	0,0055
OZ	3	3	1	0,9972	0,9972	0,0000	0,0005
PX	3	-10	1	1,0268	1,0251	0,0002	0,0125
PY	3	5	1	1,0121	1,0117	0,0000	0,0058
PZ	3	-3	1	0,9990	0,9988	0,0000	0,0011

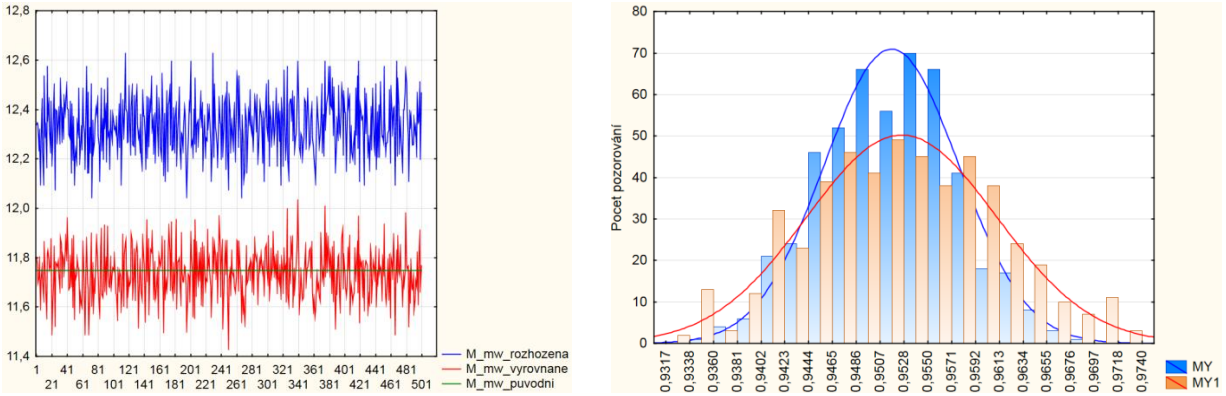
Níže jsou uvedeny opět histogramy a rozložení dat (Obr. 19-24) variant M a N. Barevné odlišení histogramů opět vychází z předpokladu znázorněného na Obr.15. Tvary histogramů reprezentující rozhození a vyrovnání výhřevnosti varianty M jsou velmi podobné, ne-li totožné. Lze pozorovat slušnou odezvu lišící se od ideální o necelá 3%.



a) b)

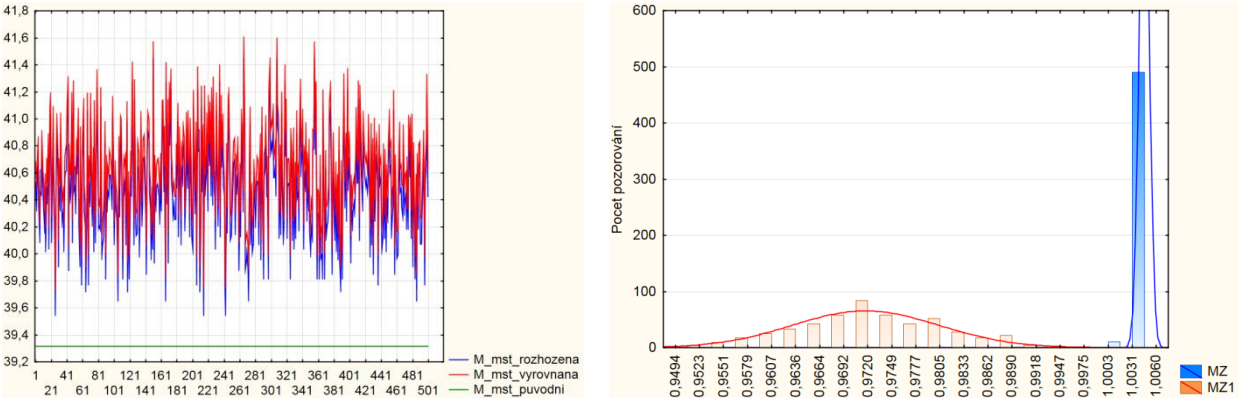
Obr.19: Vyrovnání výhřevnosti varianta M a) spojnicový graf, b) histogram chybových koeficientů

U dalších proměnných varianty M stojí za zmínku dva postřehy. Prvním z nich je zajisté téměř stejný průměr histogramu u množství odpadu. Dalším faktem je reakce modelu jako celku. U všech tří vstupních proměnných je uvažována kladná systematická chyba. Model ale vzhledem k definici účelové funkce (8) a algoritmu *Řešitele* reaguje vždy u jedné vstupní proměnné inverzně k ostatním dvěma. Pokud jsou tedy dva chybové koeficienty větší než 1, třetí z nich bude menší než jedna a naopak. Jak si lze všimnout, model reaguje skvěle. Jako inverzní reakci totiž volí případ nejméně zkreslené proměnné.



a) b)

Obr.20: Vyrovnání množství odpadu varianta M a) spojnicový graf, b) histogram chybových koeficientů



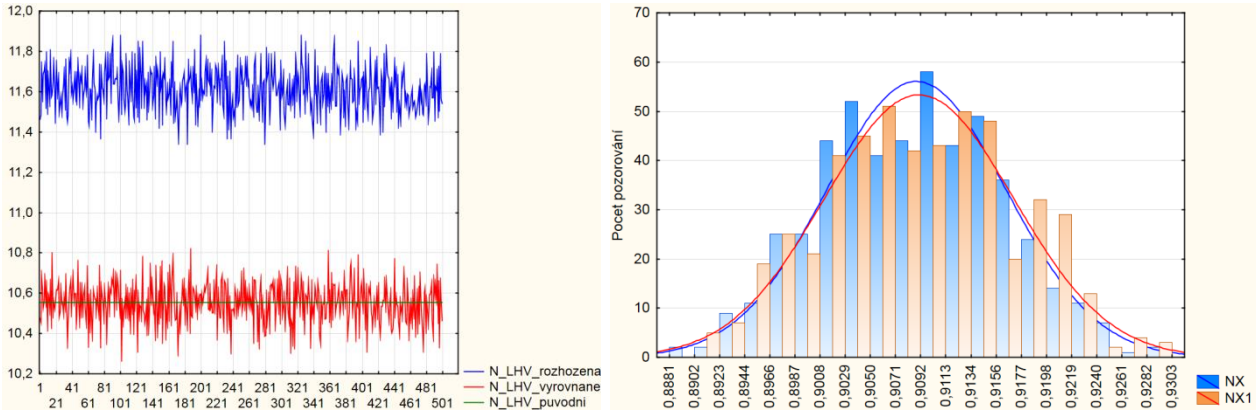
a) b)

Obr.21: Vyrovnání množství páry varianta M a) spojnicový graf, b) histogram chybových koeficientů

Varianta N ukazuje také slušnou odezvu systému. U reakce výhřevnosti dokonce téměř ideální. Z celkového pohledu na histogramy obou případů (M, N) lze říci, že model bude nejlépe reagovat na předpoklady příslušné variantě E, která reprezentuje určitý „součet“ M a N. To ostatně dokazují i výsledky uvedené v Tab. 8.

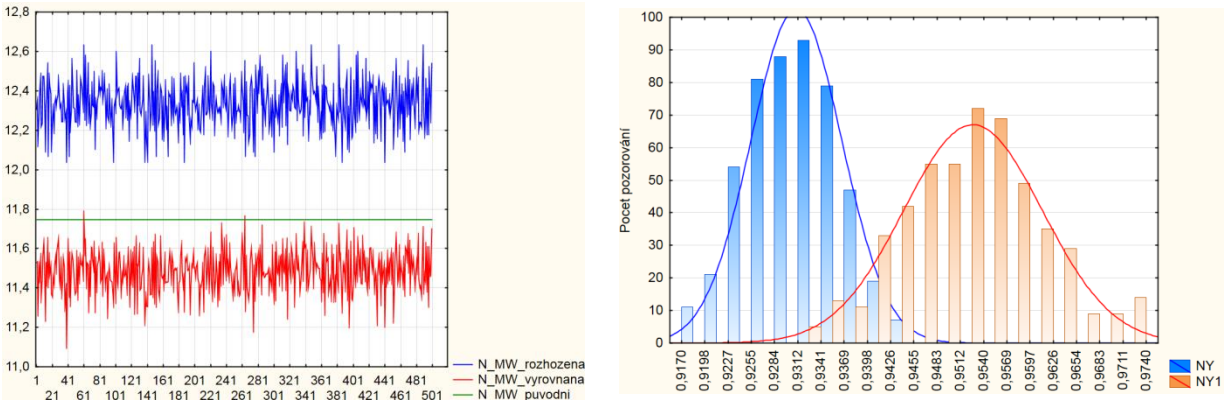
K celkovému náhledu na odezvu systému přispívá připomínaný přehled startovacích hodnot z Tab.5.

proměnná	hodnota	jednotka
lhv_W	10,553	GJ/t
$\dot{m}_W$	11,747	t/h
$\dot{m}_{ST.W}$	39,316	t/h



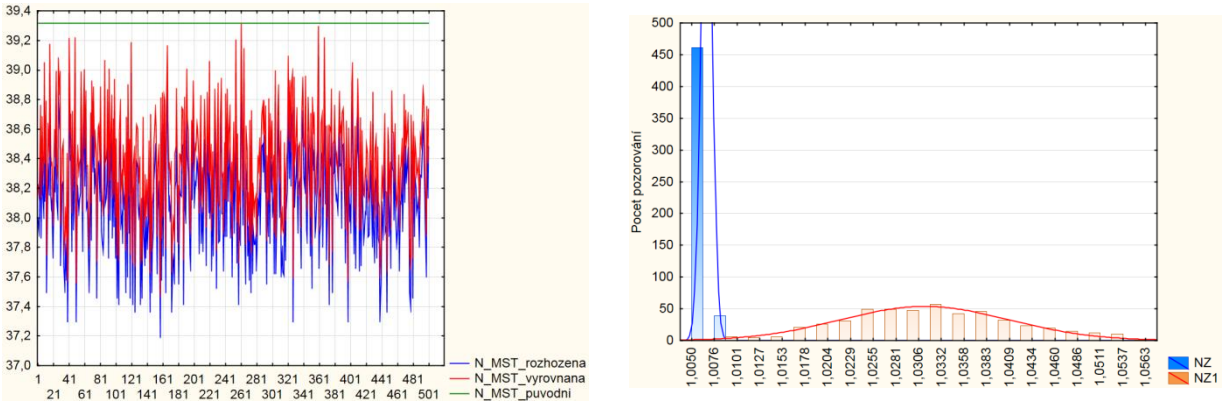
a) b)

Obr.22: Vyrovnání výhřevnosti varianta N a) spojnicový graf, b) histogram chybových koeficientů



a) b)

Obr.23: Vyrovnání množství odpadu varianta N a) spojnicový graf, b) histogram chybových koeficientů

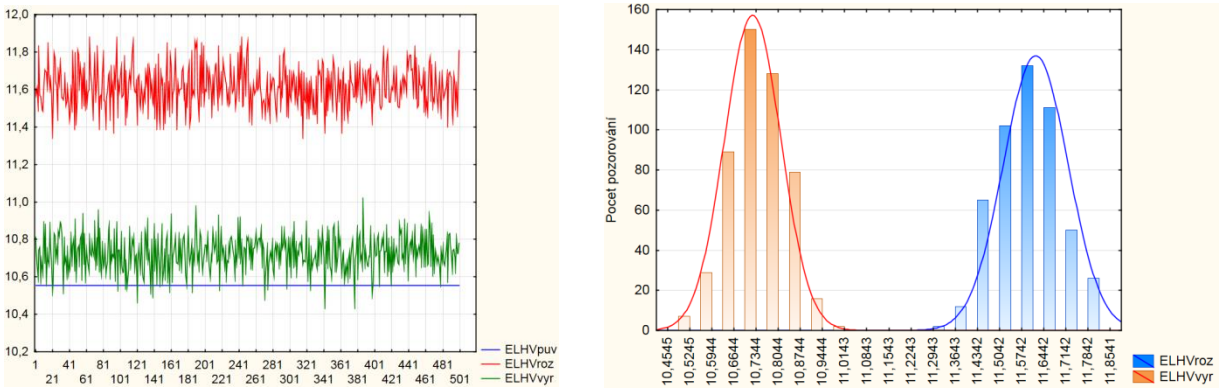


a) b)

Obr.24: Vyrovnání množství páry varianta N a) spojnicový graf, b) histogram chybových koeficientů

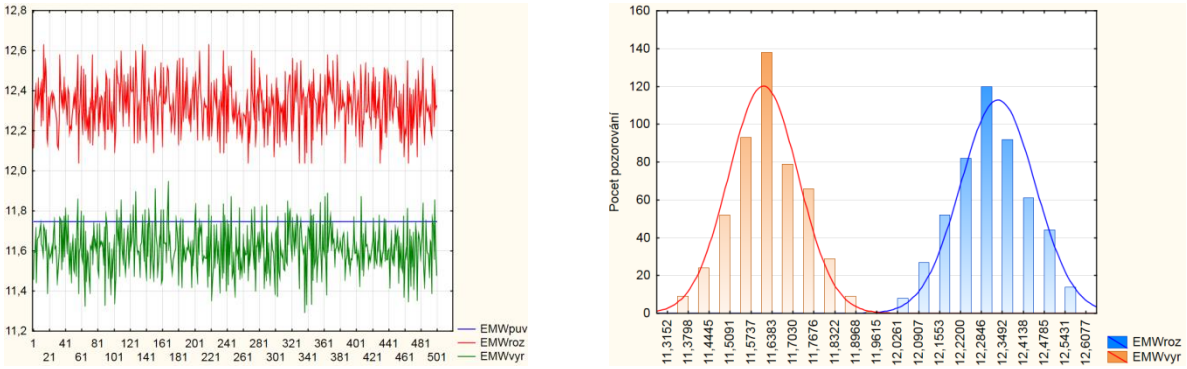
Porovnáním reakce modelu vzhledem k variantám M a N je zjištění, že změnou systematické chyby v množství páry z kladné na zápornou dochází téměř přesnému obracení hodnot výhřevnosti a množství odpadu.

K variantě E jsou dále (namísto porovnání chybových koeficientů a generovaných chyb) uvedeny přímo histogramy jednotlivých proměnných. Oranžová barva přísluší vyrovnaným datům, modrá pak hodnotám rozhozeným. Spojnicové grafy využívají modrou barvu pro původní hodnoty, červenou pro rozhozené a zelenou pro vyrovnané (Obr. 25-27).



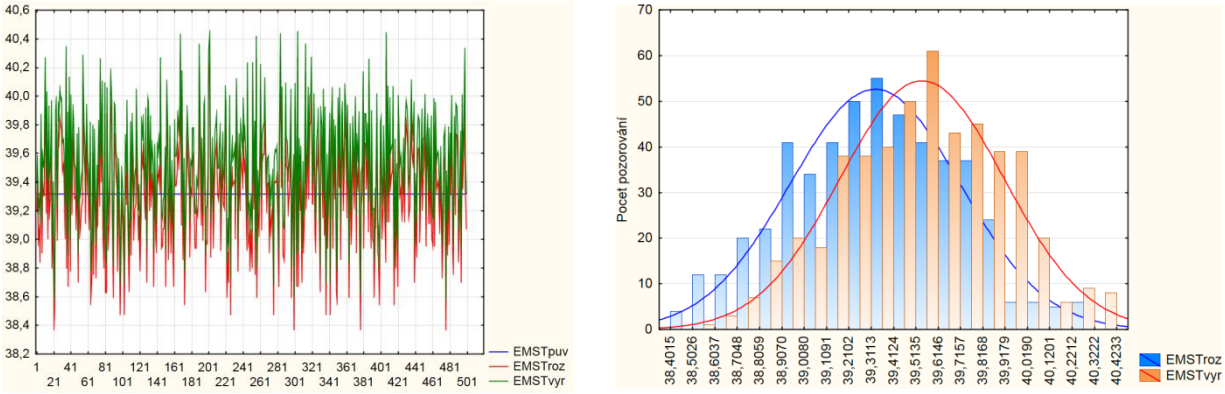
a) b)

Obr.25: Chybou zatížená a vyrovnaná data výhřevnosti varianta E a) spojnicový graf, b) histogram



a) b)

Obr.26: Chybou zatížená a vyrovnaná data množství odpadu varianta E a) spojnicový graf, b) histogram



a) b)

Obr.27: Chybou zatížená a vyrovnaná data množství páry varianta E a) spojnicový graf, b) histogram

U všech proměnných lze registrovat posun histogramu téměř totožného tvaru směrem do oblasti startovací hodnoty.

4.3.3 Nastavení optimálních vah

Nyní se pokusíme k jednotlivým variantám systematických chyb najít takové váhové koeficienty, které by vyvolaly ještě přesnější odezvu optimalizačního modelu. Postupně testujeme varianty dle Tab.9. Označení jednotlivých řádků opět souvisí se startovním nastaveném výpočtu. Například varianta D1 se od varianty D2 liší v nastavení vah. Písmena X, Y a Z reprezentují naše chybové koeficienty. Ještě je třeba dodat, že původní varianta kombinace zatížení E v případě využití vah nahrazena označením G. Tedy zatížení zůstává, pouze přibývá vliv vah.

Tab.9: Testování systematických chyb s užitím vah

proměnná	náhodná	system.	váha	Průměr	Medián	Rozptyl	Sm.Odch
D1X	3	0	1	0,9813	0,9815	0,0000	0,0067
D1Y	3	5	0,5	0,9760	0,9765	0,0001	0,0088
D1Z	3	0	1	1,0012	1,0011	0,0000	0,0004
D2X	3	0	1	0,9714	0,9717	0,0001	0,0104
D2Y	3	5	1,5	0,9881	0,9883	0,0000	0,0043
D2Z	3	0	1	1,0017	1,0017	0,0000	0,0007
GX	3	10	0,6	0,9594	0,9592	0,0000	0,0039
GY	3	5	0,2	0,8984	0,8980	0,0001	0,0104
GZ	3	0	1	1,0018	1,0018	0,0000	0,0002
G1X	3	10	0,2	0,8930	0,8928	0,0001	0,0107
G1Y	3	5	0,6	0,9748	0,9748	0,0000	0,0023
G1Z	3	0	1	1,0015	1,0015	0,0000	0,0002
IX	3	10	0,6	0,9664	0,9664	0,0000	0,0040
IY	3	5	0,2	0,9171	0,9170	0,0001	0,0104
IZ	3	3	1	1,0014	1,0014	0,0000	0,0002
I1X	3	10	0,2	0,9125	0,9120	0,0001	0,0108
I1Y	3	5	0,6	0,9790	0,9789	0,0000	0,0024
I1Z	3	3	1	1,0011	1,0011	0,0000	0,0002
JX	3	10	0,6	0,9523	0,9524	0,0000	0,0038
JY	3	5	0,2	0,8792	0,8791	0,0001	0,0102
JZ	3	-3	1	1,0022	1,0022	0,0000	0,0002
J1X	3	10	0,2	0,8737	0,8736	0,0001	0,0099
J1Y	3	5	0,6	0,9700	0,9707	0,0000	0,0046
J1Z	3	-3	1	1,0019	1,0018	0,0000	0,0006
HX	3	-10	0,6	1,0274	1,0270	0,0001	0,0073
HY	3	5	0,2	1,0400	1,0400	0,0001	0,0104
HZ	3	0	1	0,9992	0,9992	0,0000	0,0002
H1X	3	-10	0,2	1,0094	1,0094	0,0000	0,0025
H1Y	3	5	0,6	0,9995	0,9995	0,0000	0,0001
H1Z	3	0	1	1,0753	1,0758	0,0002	0,0145
KX	3	-10	0,6	1,0380	1,0381	0,0001	0,0075
KY	3	5	0,2	1,0560	1,0566	0,0001	0,0107
KZ	3	3	1	0,9989	0,9989	0,0000	0,0002
K1X	3	-10	0,2	1,0753	1,0758	0,0002	0,0145
K1Y	3	5	0,6	1,0135	1,0135	0,0000	0,0031
K1Z	3	3	1	0,9993	0,9993	0,0000	0,0002
LX	3	-10	0,6	1,0205	1,0172	0,0002	0,0124
LY	3	5	0,2	1,0191	1,0179	0,0001	0,0115
LZ	3	-3	1	0,9999	0,9997	0,0000	0,0008
L1X	3	-10	0,2	1,0327	1,0312	0,0002	0,0143
L1Y	3	5	0,6	1,0045	1,0051	0,0000	0,0040
L1Z	3	-3	1	0,9998	0,9997	0,0000	0,0006

Prohlédneme-li si jednotlivé varianty systematických chyb a volby vah, nacházíme logickou zákonitost v reakci výpočtového algoritmu. Lepší odezvy systému dosahujeme použitím váhy v závislosti na velikosti chyby. S rostoucí velikostí chyby volíme váhu bližší nule, k malé chybě

přiřazujeme váhu blíže jedné. Pro libovolnou kombinaci předpokládaných (simulovaných) velikostí chyb bychom se tedy mohli pokusit najít ideální váhové koeficienty, které by vyvolaly adekvátní odezvu modelu.

Vzhledem k tomu, že v praktickém provozu EVO předpokládáme podobné rozložení chyb jako ve variantě E, bude dále ve výpočtu uvažováno toto zatížení.

Postupně provádíme několik simulací s různou intuitivní volbou vah. Výsledky všech testovaných možností jsou uvedeny v Tab.10.

Tab.10 Hledání ideální váhy

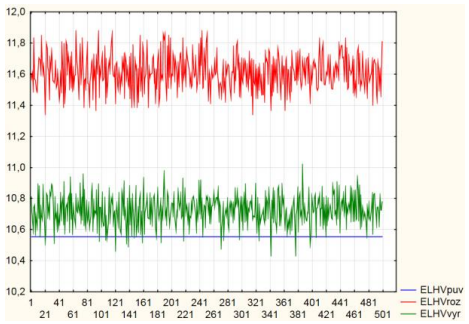
proměnná	náhodná	system.	váha	Průměr	Medián	Rozptyl	Sm.Odch
EX	3	10	1	0,9234	0,9235	0,0001	0,0078
EY	3	5	1	0,9416	0,9418	0,0000	0,0059
EZ	3	0	1	1,0054	1,0054	0,0000	0,0006
GX	3	10	0,6	0,9594	0,9592	0,0000	0,0039
GY	3	5	0,2	0,8984	0,8980	0,0001	0,0104
GZ	3	0	1	1,0018	1,0018	0,0000	0,0002
G1X	3	10	0,2	0,8930	0,8928	0,0001	0,0107
G1Y	3	5	0,6	0,9748	0,9748	0,0000	0,0023
G1Z	3	0	1	1,0015	1,0015	0,0000	0,0002
G2X	3	10	0,2	0,9013	0,9012	0,0001	0,0100
G2Y	3	5	0,4	0,9643	0,9643	0,0000	0,0034
G2Z	3	0	1	1,0014	1,0014	0,0000	0,0001
G3X	3	10	0,2	0,9088	0,9087	0,0001	0,0093
G3Y	3	5	0,3	0,9552	0,9552	0,0000	0,0044
G3Z	3	0	1	1,0013	1,0013	0,0000	0,0001
G4X	3	10	0,2	0,9213	0,9212	0,0001	0,0080
G4Y	3	5	0,2	0,9402	0,9401	0,0000	0,0060
G4Z	3	0	1	1,0011	1,0011	0,0000	0,0001
G5X	3	10	0,2	0,9107	0,9107	0,0001	0,0091
G5Y	3	5	0,28	0,9528	0,9527	0,0000	0,0046
G5Z	3	0	1	1,0012	1,0012	0,0000	0,0001
G6X	3	10	0,18	0,9087	0,9086	0,0001	0,0093
G6Y	3	5	0,27	0,9552	0,9551	0,0000	0,0044
G6Z	3	0	1	1,0011	1,0011	0,0000	0,0001
G7X	3	10	0,1	0,9010	0,9008	0,0001	0,0103
G7Y	3	5	0,2	0,9639	0,9638	0,0000	0,0033
G7Z	3	0	1	1,0007	1,0007	0,0000	0,0001
G8X	3	10	0,1	0,9036	0,9034	0,0001	0,0099
G8Y	3	5	0,18	0,9608	0,9607	0,0000	0,0036
G8Z	3	0	1	1,0007	1,0007	0,0000	0,0001
G9X	3	10	0,1	0,9083	0,9083	0,0001	0,0092
G9Y	3	5	0,15	0,9549	0,9550	0,0000	0,0043
G9Z	3	0	1	1,0006	1,0006	0,0000	0,0001
G10X	3	10	0,04	0,9081	0,9081	0,0001	0,0092
G10Y	3	5	0,06	0,9546	0,9549	0,0000	0,0046
G10Z	3	0	1	1,0003	1,0003	0,0000	0,0000

Z jednotlivých výsledných průměrů chybových koeficientů lze vypozorovat, že vhodnou volbou vah pro variantu zatížení E je hodnota 0,2 pro sčítanec výhřevnosti, 0,3 pro člen množství odpadu a 1 pro sčítanec množství páry účelové funkce. Lze také tvrdit, že vhodnou volbou jsou i varianty, které volí:

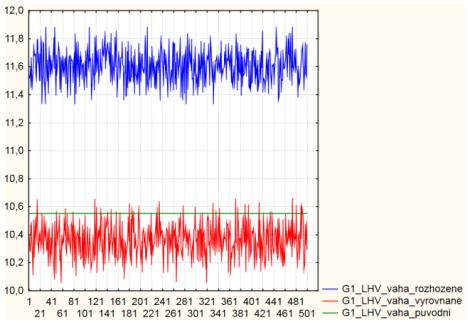
- Váhu $\dot{m}_{ST,W}$ rovnu 1
- Váhy pro lhv_W a $\dot{m}_W$ jako desetinná čísla v poměru 2:3

Zajímavé je porovnání postupného přibližování vyrovnaných dat k původní hodnotě v svislosti na volbě váhy. Tento jev je pozorovatelný na Obr. 28-30, na kterých jsou

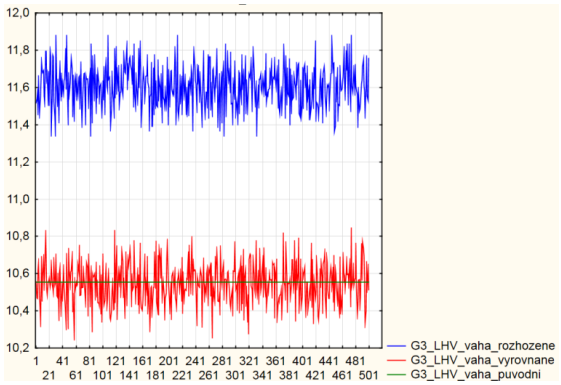
prezentována data variant E, G1 a G3. Z obrázků je také dobře vidět poměr velikostí systematických chyb.



a)

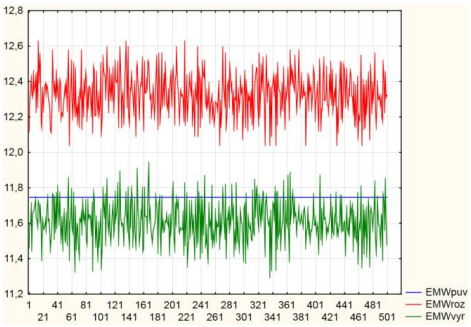


b)

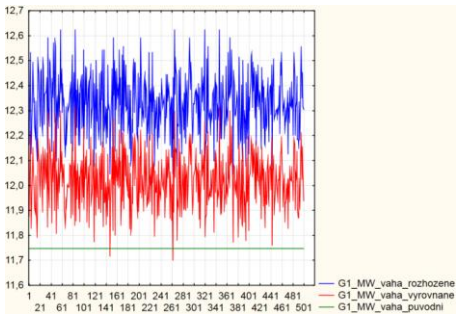


c)

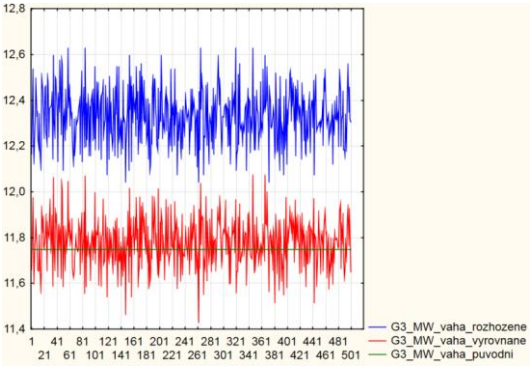
Obr.28: Vyrovnání výhřevnosti se zatížením E a) s neměnnou vahou, b) s vahou dle G1, c) s vahou dle G3



a)



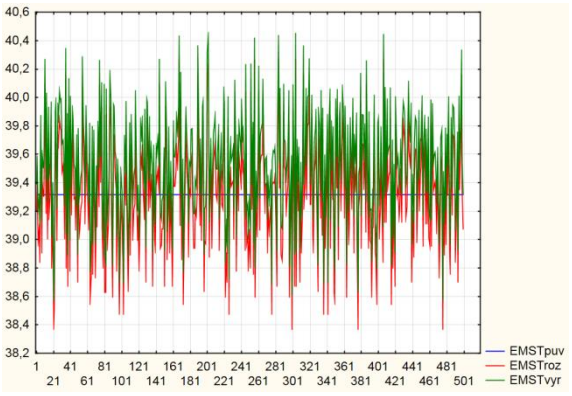
b)



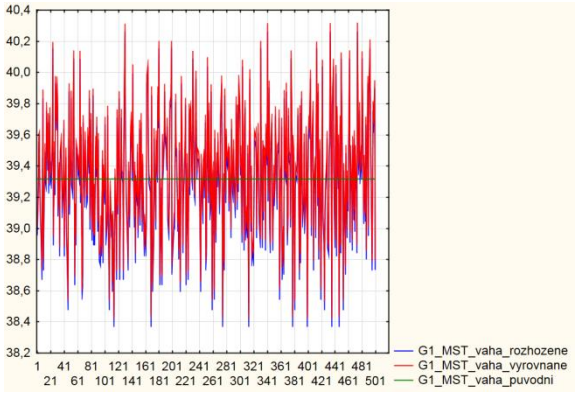
c)

Obr.29: Vyrovnání množství odpadu se zatížením E a) s neměnnou vahou, b) s vahou dle G1, c) s vahou dle G3

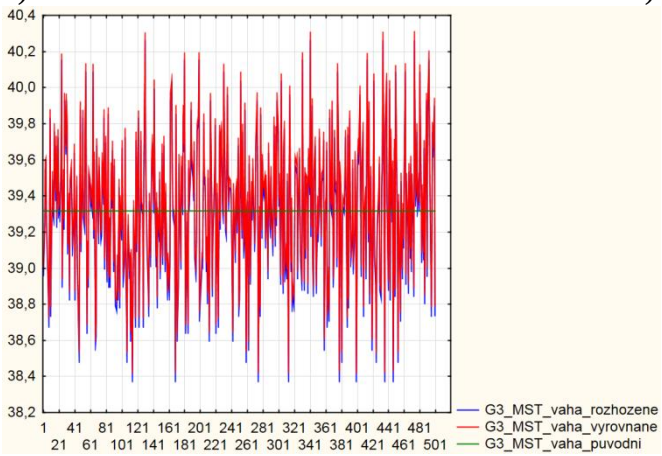
Zřejmě by bylo možné nalézt ideální kombinaci vah pro jakoukoliv variantu zatížení. Ať už v této práci zmíněné či nikoliv. Je třeba si ale také uvědomit, že váhu volíme na základě známého zkreslení vstupních dat. V reálném provozu ale takovéto znalosti samozřejmě nemáme. Pokud by ostatně takové údaje existovaly, ztrácela by tato práce smysl. Námětem pro případnou navazující práci by tedy mohl nějaký iterační výpočet, který by se na základě libovolné startovací hodnoty zátěže dopracoval ke skutečné hodnotě chyby vstupní proměnné.



a)



b)



c)

Obr.30: Vyrovnání množství páry se zatížením E a) s neměnnou vahou, b) s vahou dle G1, c) s vahou dle G3

Postupné zpřesňování řešení dokazuje i Tab.11 s uvedenými průměry jednotlivých proměnných.

Tab.11: Vyrovnání proměnných s využitím vah

Proměnná	Startovací hodnota	Jednotka	Rozhození	Varianta E	Varianta G1	Varianta G3
lhv_W	10,553	GJ/t	11,6055	10,7032	10,3630	10,5461
$\dot{m}_W$	11,747	t/h	12,3292	11,5802	12,0182	11,7765
$\dot{m}_{ST,W}$	39,316	t/h	39,2979	39,5903	39,3549	39,3475

Princip této úlohy je v zásadě správný. Otázkou zůstává, jakým způsobem nastavit váhy v účelové funkci. Další postup činnosti je popsán v následující kapitole.

4.4 Aplikace na reálných datech

V této kapitole je výše popsaný výpočtový model využit k analýze reálných dat. Ta získala Sekce energetických systémů a simulačních výpočtů z provozu Termizo Liberec, konkrétně z dat provozního deníku roku 2009. Údaje byly zaznamenány v patnáctiminutových intervalech, zde budou použity příslušné průměry hodinových intervalů. Abychom předešli případné nepřesnosti zpožděním a nesynchronizaci parametrů, vytváříme i intervaly vlastní (tříhodinové a pětihodinové), přičemž vstupní hodnotou rozumíme průměr příslušných hodinových dat. Pokud by totiž byly vstupní parametry vyhodnocovány ve stejný okamžik, neměly by správnou vypovídací hodnotu. Odpad, který je právě dávkován, nevytváří aktuální výrobu páry.

Testován je také vliv omezujících podmínek (9), (10) a (11). Konkrétně byly provedeny výpočty pro tři různé hodnoty omezení p (p=0,75, p=0,5 a p=0,35). Přehled veškerých výsledků je zachycen v příloze *Real_data.xlsx,* výsledné hodnoty účinností jsou uvedeny v Tab.12. Váhy jsou voleny stejně jako v případě varianty G3 uvedené v Tab.10.

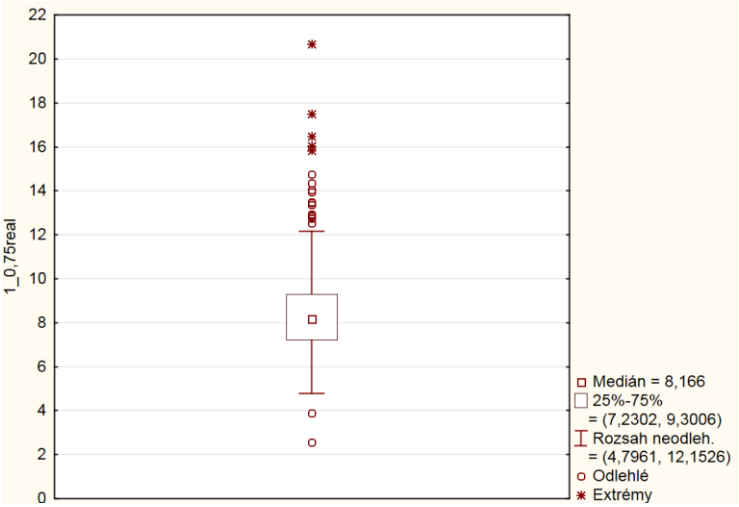
Tab.12: Souhrn průměrů účinnosti analýzy reálných dat

		PŮVODNÍ			VYROVNANÉ			S VAHOU		
přesnost	**interval**	**přímá**	**nepřímá**	**modif.**	**přímá**	**nepřímá**	**modif.**	**přímá**	**nepřímá**	**modif.**
0,75	**1**	**0,8497**	**0,8318**	**0,8197**	**0,8268**	**0,8231**	**0,8271**	**0,8272**	**0,8235**	**0,8275**
	3	0,8364	0,8336	0,8259	0,8289	0,8289	0,8314	0,8290	0,8291	0,8316
	5	0,8335	0,8355	0,8344	0,8266	0,8230	0,8284	0,8267	0,8231	0,8284
0,5	**1**	**0,8497**	**0,8318**	**0,8197**	**0,8304**	**0,8312**	**0,8342**	**0,8329**	**0,8337**	**0,8366**
	3	0,8364	0,8336	0,8259	0,8322	0,8353	0,8370	0,8339	0,8369	0,8386
	5	0,8335	0,8355	0,8344	0,8298	0,8288	0,8334	0,8310	0,8301	0,8346
0,35	**1**	**0,8497**	**0,8318**	**0,8197**	**0,8587**	**0,8614**	**0,8631**	**0,8658**	**0,8686**	**0,8702**
	3	0,8364	0,8336	0,8259	0,8603	0,8646	0,8651	0,8668	0,8710	0,8716
	5	0,8335	0,8355	0,8344	0,8595	0,8594	0,8629	0,8663	0,8663	0,8697

Ve všech případech lze konstatovat zmenšení rozdílů mezi jednotlivými účinnostmi. Při použití nejpřísnějšího omezení si sice jsou výsledky účinnosti navzájem nejbližší, ovšem teoreticky by neměli růst nad meze původních hodnot.

Porovnáním průměrů původních účinností vzhledem k délce intervalů je zjištěno jejich postupné přibližování. Za předpokladu budoucí povinnosti co nejdetailnějšího sledování hodnot výhřevnosti a účinnosti se jeví vhodné využití modelu s uvažovanou přesností p=0,75 (respektive p=0,5) a užitím vhodných vah.

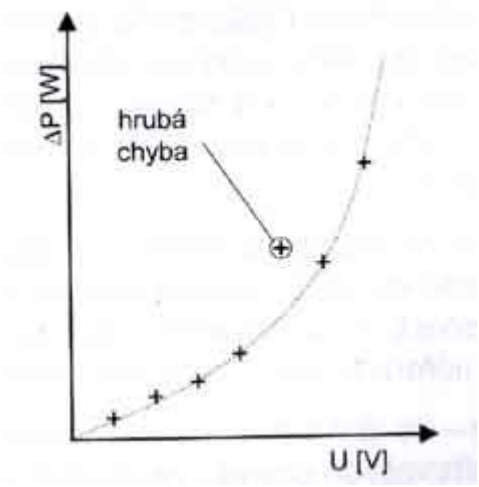
Bylo zjištěno, že v poměrně velkém počtu případů výpočet nekonverguje. Model byl nucen chybovým koeficientům přiřazovat velmi vysoká čísla (v řádu milionů). Protože ale byla v kapitole 4.2 funkčnost postupu ověřena, bylo potřeba hledat příčinu především ve vstupních datech. Jednoduchou analýzou pomocí krabicového grafu v softwaru *Statistica* bylo zjištěno velké množství extrémních hodnot (Obr. 31). Je tedy vhodné provést detekci a odstranění hrubých chyb.



Obr.31: Krabicový diagram poskytnutých dat výhřevnosti

4.4.1 Detekce hrubých chyb

V každém souboru dat se může objevit takzvaná hrubá chyba. Jedná se o hodnoty značně odlišné od všech ostatních. Takovou situaci si lze představit na Obr. 30. Detekcí a odstraněním hrubých chyb předcházíme zkreslení výsledků analýz.



Obr.30: Znázornění hrubé chyby měření

Tato práce využívá postup odvozený ve [4], který kombinuje vlastnosti směrodatné odchylky a srovnávacího kritéria (Shidak, Bonferroni). Pro každou vstupní proměnnou jsou nejprve spočítány rozdíly mezi původní a vyrovnanou hodnotou. Z těchto rozdílů je pak vypočtena směrodatná odchylka (pro každou proměnnou). Jednotlivé rozdíly jsou pak touto směrodatnou odchylkou poděleny a porovnány s hodnotou srovnávacího kriteria. Hodnoty, které nevyhoví, jsou pak ze souboru odstraněny. Kritérium je závislé na celkovém objemu dat (počtu řádků, tedy vstupních hodnot) a na zvolené hladině spolehlivosti.

Jedná se o iterační metodu, protože s postupným vyřazováním hrubých chyb se mění jak hodnota směrodatné odchylky, tak hodnota kritéria. V běžných aplikacích by byl součástí iterace i přepočet samotné optimalizační úlohy. Jelikož my ale postupujeme *Řešitelem* v samostatných krocích řádek po řádku a jednotlivé výsledky se tedy navzájem neovlivňují, je možné tento krok vynechat.

Celkový souhrn analýzy hrubých chyb je zachycen v příloze *Gross_error.xlsx*. Pro zajímavost byl testován i vliv váhy v účelové funkci. Výsledky jsou shrnuty v níže uvedené tabulce (Tab.13).

Tab.13: Analýza hrubých chyb

reálná						
interval	přesnost	původně	po vyloučení	iterace	odpad	%
1	0,75	700	669	**6**	**31**	**4,43**
1	0,35	700	666	**6**	**34**	**4,86**
1	0,5	700	458	**20**	**242**	**34,57**
3	0,75	233	222	**7**	**11**	**4,72**
3	0,35	233	197	**8**	**36**	**15,45**
3	0,5	233	155	**16**	**78**	**33,48**
5	0,75	140	134	**4**	**6**	**4,29**
5	0,5	140	92	**14**	**48**	**34,29**
5	0,35	140	74	**21**	**66**	**47,14**
s vahou						
interval	přesnost	původně	po vyloučení	iterace	odpad	%
1	0,75	700	672	**6**	**28**	**4,00**
1	0,35	700	651	**7**	**49**	**7,00**
1	0,5	700	447	**18**	**253**	**36,14**
3	0,75	233	219	**8**	**14**	**6,01**
3	0,35	233	187	**12**	**46**	**19,74**
3	0,5	233	154	**16**	**79**	**33,91**
5	0,75	140	134	**4**	**6**	**4,29**
5	0,5	140	91	**13**	**49**	**35,00**
5	0,35	140	97	**13**	**43**	**30,71**

Z výsledků vyplývá hned několik závěrů. Využitím váhy se výsledky nepatrně mění, nelze ale říci, že by hrubých chyb v celkovém pohledu výrazně ubylo nebo naopak. Rozdíly v jednotlivých variantách vznikají na základě různé odezvy systému v případě užití váhy, protože lišící se optimalizované chybové koeficienty (X, Y, Z) také ovlivňují detekci hrubých chyb.

Značně zarážející je množství odhalených chyb, zejména pak v případě výpočtu s uvažovanou přesností p=0,5. U všech třech časových intervalů pozorujeme více jak třetinový podíl chyb. Tato varianta je tedy nejcitlivější ze všech. Otázkou ovšem zůstává, v jaké míře citlivosti pracovat – především s ohledem na dostatečné množství dat k vyhodnocení. Prohlašovat nějaké výsledky za důvěryhodné, a přitom jednu třetinu dat vůbec neuvažovat, je přinejmenším troufalé.

Z výše uvedených důvodů se zdá nejvhodnější užití přesnosti p=0,75, kdy se množství hrubých chyb v závislosti na délce časového intervalu prakticky nemění a navíc dosahuje rozumné míry hrubých chyb okolo 4,5%. Jedním dechem je ale nutné dodat, že připouštíme rozptyl jednotlivých účinností o téměř 1%.

4.4.2 Výsledky po odstranění hrubých chyb

Po odstranění hrubých chyb by měl výpočet bez problému konvergovat. Otázkou zůstává, zda je schopný dostatečně reagovat na reálná data, a zda výsledky naplní očekávání. Souhrn výsledků lze najít v příloze *Real_data_poGE.xlsx*.

Nejprve jsou uvedeny tabulky (Tab. 14-16) výsledných chybových koeficientů.

Tab.14: Chybové koeficienty výhřevnosti

přesnost	interval	průměr výchozí real	průměr odezva real	chybový koeficient	průměr výchozí váha	průměr odezva váha	chybový koeficient
0,75	1	8,4565	8,5622	**1,0125**	8,4244	8,5411	**1,0138**
	3	8,2889	8,3405	**1,0062**	8,2486	8,3073	**1,0071**
	5	8,3002	8,3347	**1,0042**	8,3002	8,3367	**1,0044**
0,5	1	9,0487	9,1424	**1,0103**	9,0653	9,1657	**1,0111**
	3	8,7131	8,7573	**1,0051**	8,7433	8,7852	**1,0048**
	5	8,7079	8,7253	**1,0020**	8,7228	8,7387	**1,0018**
0,35	1	8,4852	10,7927	**1,2719**	8,5146	11,4938	**1,3499**
	3	8,6360	10,6128	**1,2289**	8,6743	11,1931	**1,2904**
	5	9,1739	10,5061	**1,1452**	8,8748	11,0018	**1,2397**

Chybový koeficient je ve všech případech větší než jedna. Model tedy uměle zvyšuje hodnoty výhřevnosti, v některých případech přesnosti p=0,35 dokonce o více než 20%. Zajímavostí může být podobná reakce modelu s využitím i bez využití váhy. Volba váhových koeficientů totiž předpokládá nadhodnocení vstupních hodnot výhřevnosti, očekávanou reakcí by tedy měli být koeficienty menší než 1.

Tab.15: Chybové koeficienty množství odpadu

přesnost	interval	průměr výchozí real	průměr odezva real	chybový koeficient	průměr výchozí váha	průměr odezva váha	chybový koeficient
0,75	1	12,8511	12,9009	**1,0039**	12,9007	12,9378	**1,0029**
	3	12,9630	12,9839	**1,0016**	13,0136	13,0305	**1,0013**
	5	12,9522	12,9641	**1,0009**	12,9522	12,9605	**1,0006**
0,5	1	12,5060	12,5526	**1,0037**	12,4700	12,5054	**1,0028**
	3	12,9577	12,9724	**1,0011**	12,9339	12,9432	**1,0007**
	5	12,9867	12,9901	**1,0003**	12,9776	12,9791	**1,0001**
0,35	1	12,7460	10,5813	**0,8302**	12,6913	9,5138	**0,7496**
	3	12,7334	10,8042	**0,8485**	12,7298	9,8916	**0,7770**
	5	12,2950	11,0075	**0,8953**	12,5762	10,1414	**0,8064**

Chybové koeficienty množství odpadu se ve většině případů pohybují těsně nad hranicí jedné. To také příliš neodpovídá předpokladu, protože v praxi by mělo být pravděpodobnější nadhodnocení váhy odpadu. Ten je totiž vážen v drapáku při přepravě do spalovací komory a hrozí tak nebezpečí roztroušení. Tuto teorii by potvrzovaly koeficienty u přesnosti p=0,35.

Chybové koeficienty množství páry jsou v případech větší tolerance přesnosti téměř rovny 1. Je-li ale předpokladem jakákoliv nepřesnost vstupních parametrů, logicky by se mělo měnit i množství vyrobené páry v závislosti na změně množství odpadu a jeho výhřevnosti. Reálnější se tedy zdají koeficienty příslušné nejpřísnějšímu omezení.

Tab.16: Chybové koeficienty množství páry

přesnost	interval	průměr výchozí real	průměr odezva real	chybový koeficient	průměr výchozí váha	průměr odezva váha	chybový koeficient
0,75	1	32,8336	32,8127	**0,9994**	32,8227	32,8181	**0,9999**
	3	32,5414	32,5318	**0,9997**	32,5417	32,5394	**0,9999**
	5	32,5218	32,5156	**0,9998**	32,5218	32,5204	**1,0000**
0,5	1	34,4650	34,4484	**0,9995**	34,4989	34,4949	**0,9999**
	3	34,3395	34,3340	**0,9998**	34,4137	34,4124	**1,0000**
	5	34,3044	34,3022	**0,9999**	12,9776	12,9791	**1,0001**
0,35	1	32,7814	35,2745	**1,0761**	42,5152	42,7621	**1,0058**
	3	33,3419	35,5447	**1,0661**	34,8955	35,5033	**1,0174**
	5	34,3906	35,8476	**1,0424**	34,6332	35,2442	**1,0176**

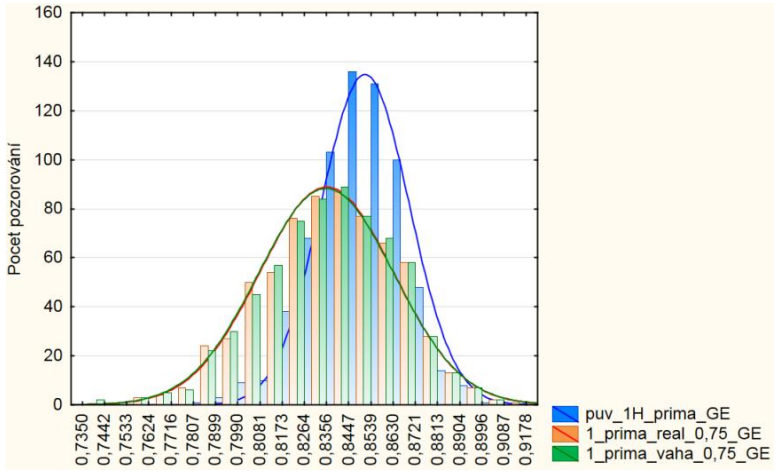
Hlavní vypovídací hodnotu by měli dávat souhrnné výsledky účinností vypočtené po odstranění hrubých chyb, které jsou uvedené v Tab.17.

Tab.17: Souhrn průměrů účinnosti analýzy reálných dat po odstranění hrubých chyb

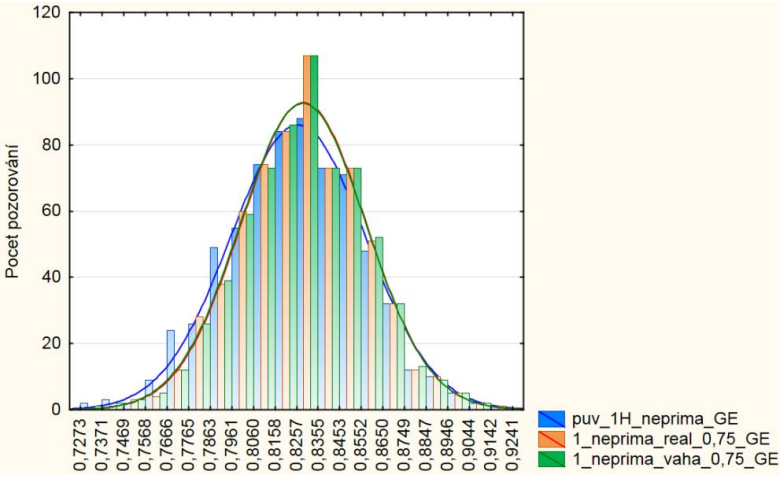
		PŮVODNÍ			VYROVNANÉ			S VAHOU		
přesnost	**interval**	**přímá**	**nepřímá**	**modif.**	**přímá**	**nepřímá**	**modif.**	**přímá**	**nepřímá**	**modif.**
0,75	1	0,8508	0,8257	0,8349	0,8351	0,8284	0,8342	0,8348	0,8281	0,8339
	3	0,8383	0,8250	0,8322	0,8310	0,8264	0,8319	0,8303	0,8255	0,8311
	5	0,8353	0,8254	0,8344	0,8303	0,8264	0,8319	0,8304	0,8265	0,8319
0,5	1	0,8508	0,8257	0,8349	0,8438	0,8407	0,8453	0,8447	0,8415	0,8461
	3	0,8383	0,8250	0,8322	0,8378	0,8359	0,8405	0,8385	0,8365	0,8411
	5	0,8353	0,8254	0,8344	0,8378	0,8362	0,8407	0,8380	0,8364	0,8409
0,35	1	0,8508	0,8257	0,8349	0,8648	0,8646	0,8681	0,8715	0,8714	0,8748
	3	0,8383	0,8250	0,8322	0,8632	0,8631	0,8666	0,8690	0,8690	0,8725
	5	0,8353	0,8254	0,8344	0,8659	0,8659	0,8693	0,8704	0,8704	0,8739

V závislosti na volené přesnosti řešení lze pozorovat jistý trend ve vyrovnání účinnosti zjišťovaných přímou a nepřímou metodou na úkor výsledků metody modifikované. Otázkou stále zůstává, zda je možné, aby zpřesněním vstupních parametrů účinnost vzrostla. V případě přesnosti p=0,35 reaguje chybový koeficient výhřevnosti zvýšením původní hodnoty přibližně o 25%, množství odpadu je naopak snižováno o necelých 20%, produkce páry nepatrně roste. Z Tab. 7 plyne, že největší význam pro výpočet (všech tří druhů) účinnosti má výhřevnost. Může se tedy stát, že „zpřesněním“ vstupních parametrů (nahrazením původních hodnot optimalizovanými) dojde ke zvýšení výpočtové hodnoty účinnosti.

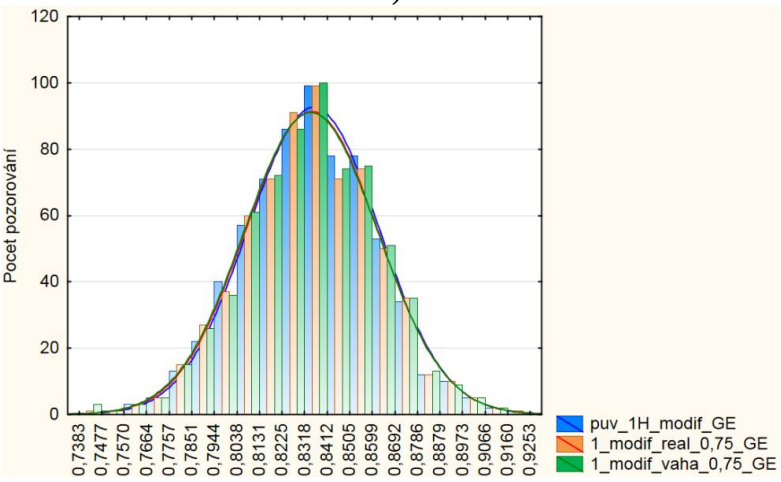
Na Obr.31-39 budou uvedeny histogramy jednotlivých účinností. V každém histogramu jsou porovnány původní hodnoty účinnosti (modře) s vyrovnanými bez (oranžové) a s použitím vah (zelené).



a)



b)

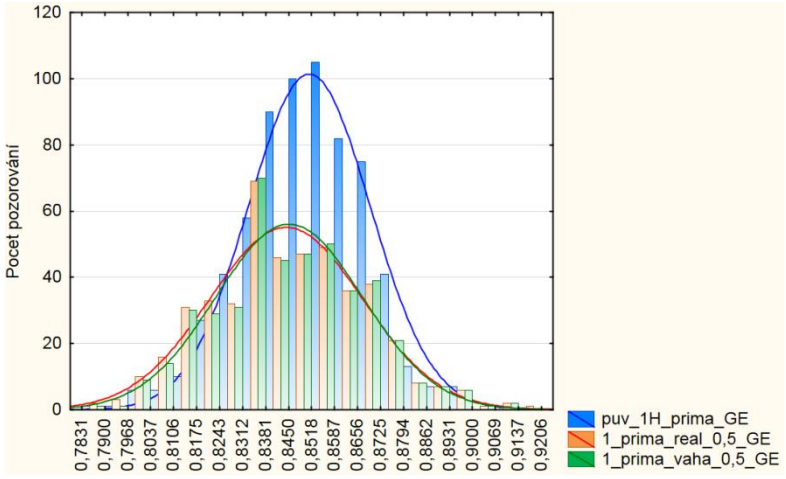


c)

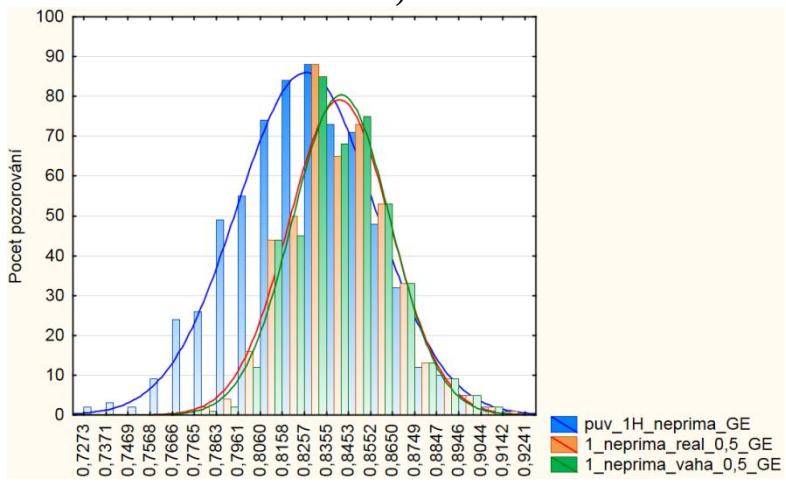
Obr.31: Hodnoty účinností pro jednohodinový interval a p=0,75 a) přímá účinnost, b) nepřímá účinnost, c) modifikovaná účinnost

Jak je plyne z Obr. 31, v případě zvolení přesnosti p=0,75 nemá použití váhy žádný význam. Výpočtový systém reaguje na vstupní nepřesnosti poměrně výrazným snížením přímé účinnosti, přičemž chybové koeficienty zvyšují výhřevnost o 1,3%, množství odpadu o 0,3%. Hodnoty nepřímé a modifikované účinnosti se naopak téměř nezmění. Zřejmě je jejich společná omezující podmínka (11) v řadě případů splněna ještě před samotným zahájením výpočtu.

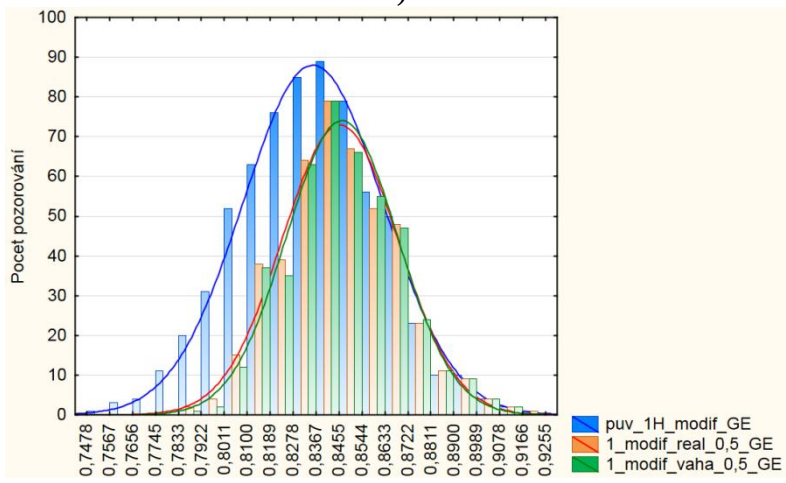
O něco zajímavější je situace na Obr.32. Zde pozorujeme již živější pohyb histogramů. Váha sice stále nemá žádný význam a chybové koeficienty se výrazně neliší od předchozího případu, přesto dochází k poměrně výraznému přepočtu všech druhů účinností. Především pak nepřímé a modifikované.



a)



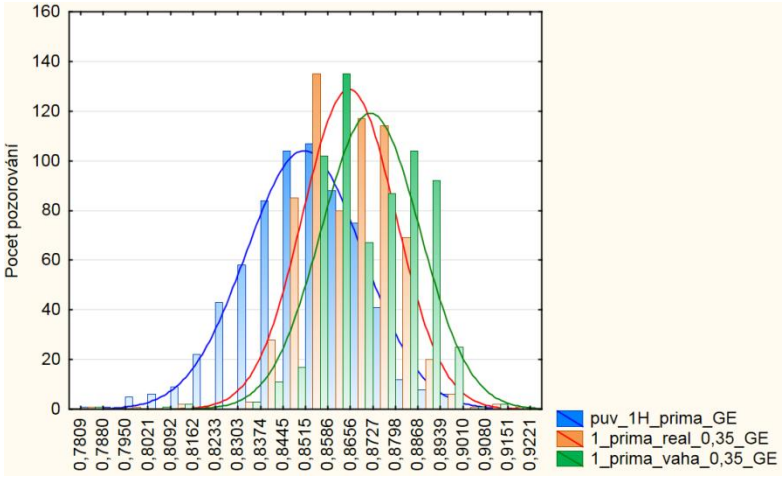
b)



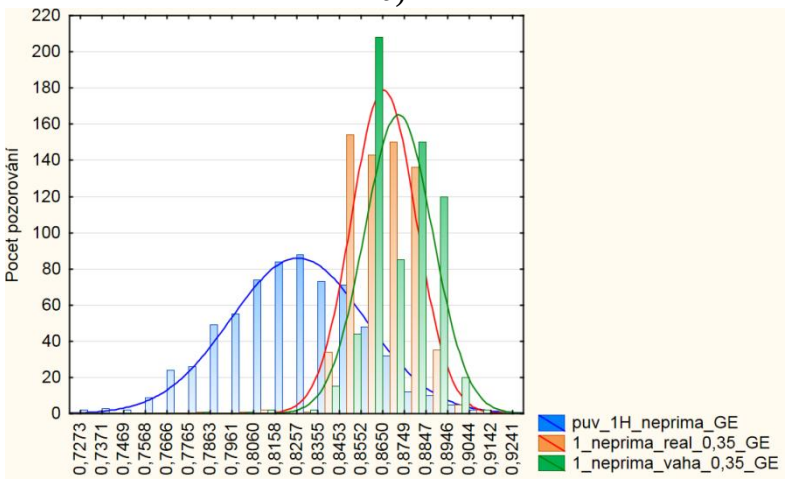
c)

Obr.32: Hodnoty účinností pro jednohodinový interval a *p*=0,5 a) přímá účinnost, b) nepřímá účinnost, c) modifikovaná účinnost

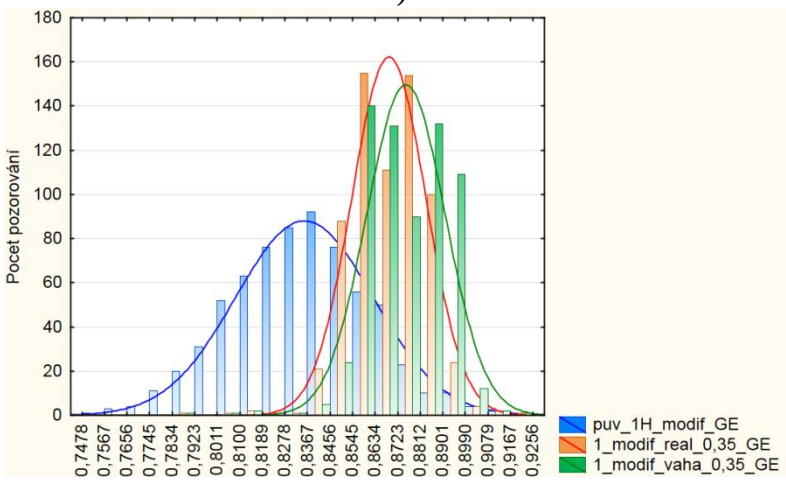
Nejdramatičtější vývoje reprezentuje Obr. 33. Nejen že se poprvé projeví vliv vah, i chybové koeficienty nabývají zajímavých hodnot. Oproti dvěma předchozím případům pozorujeme až nepatřičnou kompenzaci výhřevnosti (nárůst cca o 30%), ale také snižování množství odpadu (o cca 17-25%). Tento jev má za následek poměrně výrazný nárůst hodnot účinnosti, v případě nepřímé metody až o 4,5%. Je-li možné, že se v provozních datech vyskytují chyby těchto velikostí, pak je také možné, že dosavadní stanovování hodnot účinnosti (jakoukoliv metodou) je značně podhodnoceno.



a)



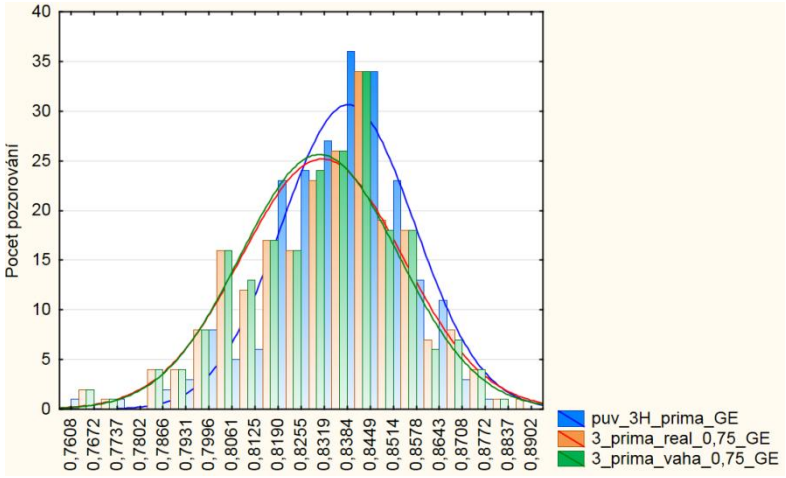
b)



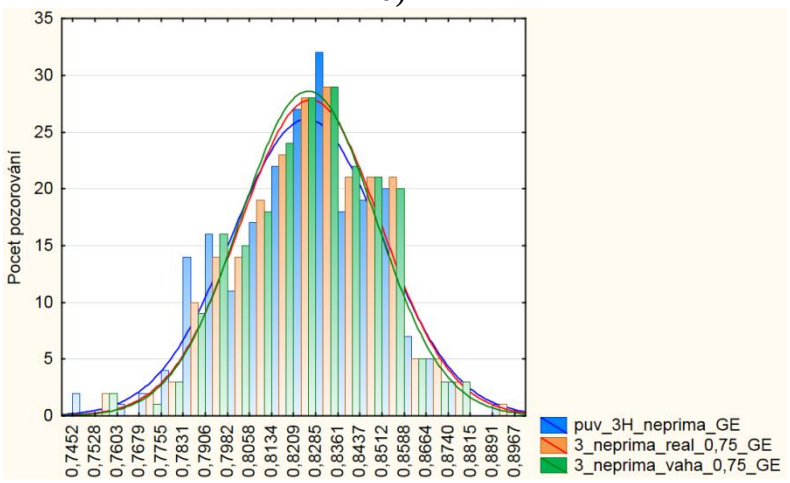
c)

Obr.33: Hodnoty účinností pro jednohodinový interval a *p*=0,35 a) přímá účinnost, b) nepřímá účinnost, c) modifikovaná účinnost

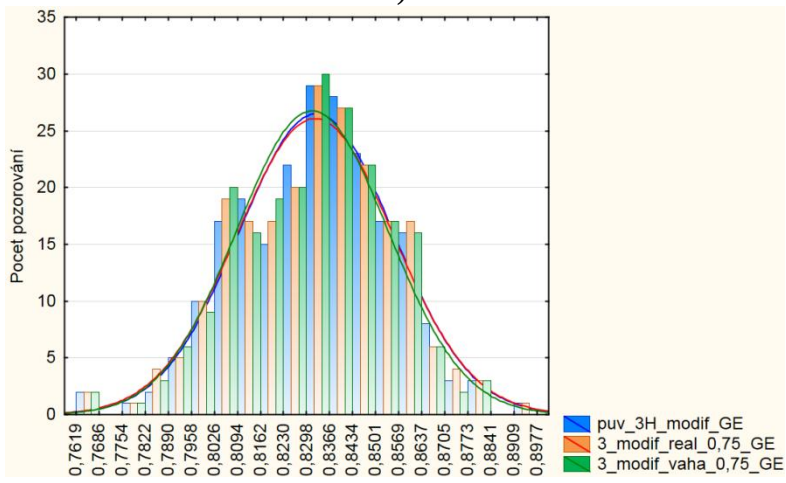
Hodnoty jednotlivých druhů účinností vzhledem k uvažovanému tříhodinovému časovému intervalu jsou znázorněny na Obr. 34-36.



a)



b)

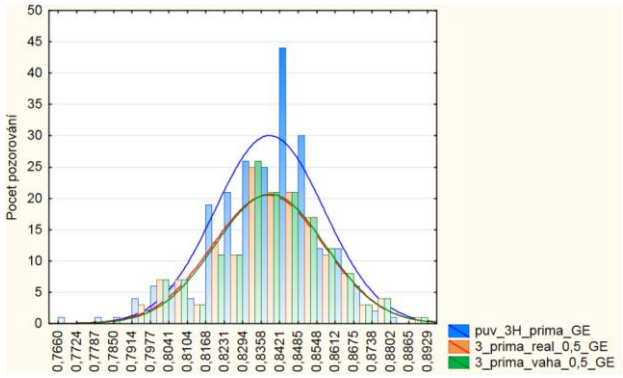


c)

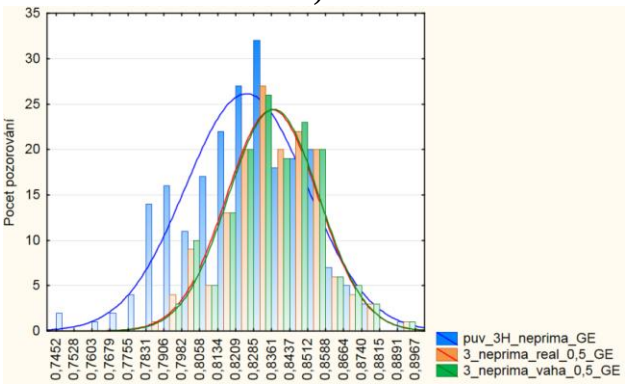
Obr.34: Hodnoty účinností pro tříhodinový interval a *p*=0,75 a) přímá účinnost, b) nepřímá účinnost, c) modifikovaná účinnost

Histogramy nepřímé a modifikované metody ukazují minimální změnu účinností. Nejvýrazněji se opět mění hodnoty účinnosti přímé. Chybové koeficienty a váhy i v tomto případě bez zásadního významu.

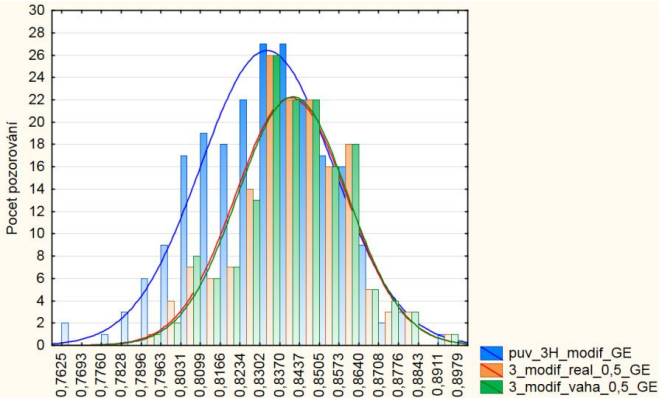
Lze pozorovat velmi podobné chování jako u jednohodinového intervalu. Jelikož do delších intervalů vstupují průměry příslušných hodnot, dochází ještě před výpočtem k jakémusi vyhlazování rozdílů. To má za následek i pozvolné vyrovnávání startovních účinností. Zajímavým námětem k případnému pokračování v tématu této práce může být tedy zkoumání vhodného intervalu průměrování dat, případně časový harmonogram odebírání informací v provozu.



a)



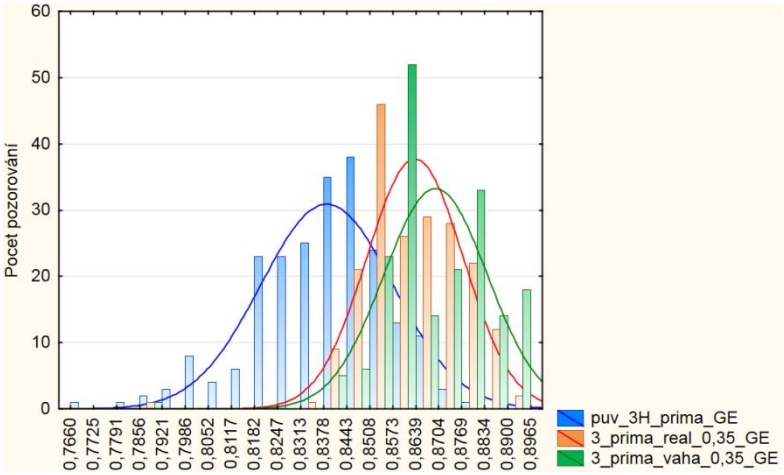
b)



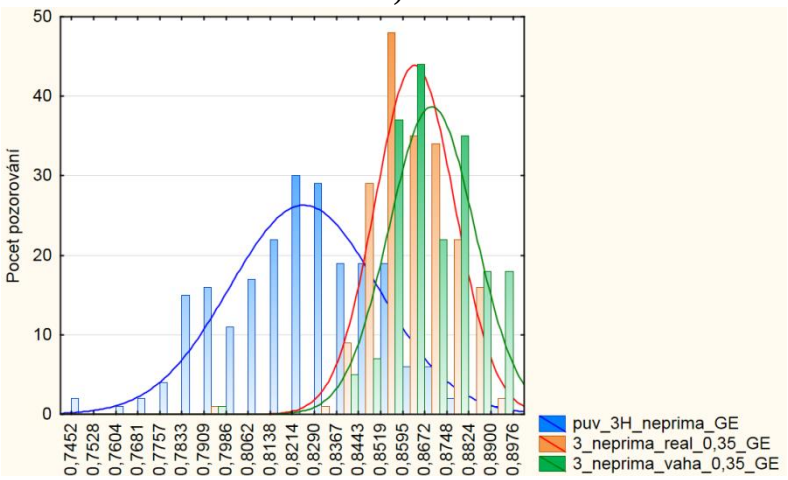
c)

Obr.35: Hodnoty účinností pro tříhodinový interval a p=0,5 a) přímá účinnost, b) nepřímá účinnost, c) modifikovaná účinnost

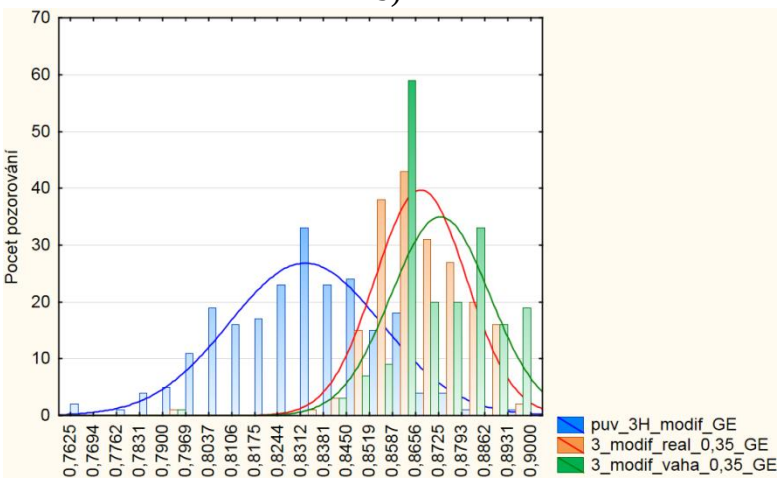
Nejzajímavější situace nastává znovu u omezení p=0,35. Opět dochází k rapidní změně účinností, i když vliv chybových koeficientů je díky průměrování vstupních hodnot o něco menší (blíží se k jedničce) než v případě jednohodinového intervalu, stále se jedná o velký nárůst hodnot účinností.



a)



b)

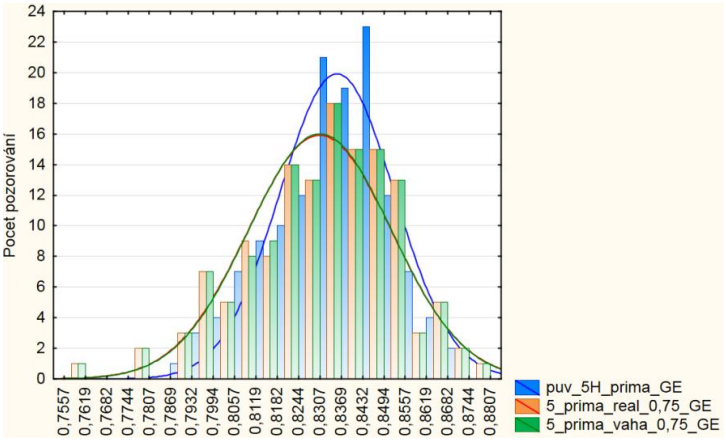


c)

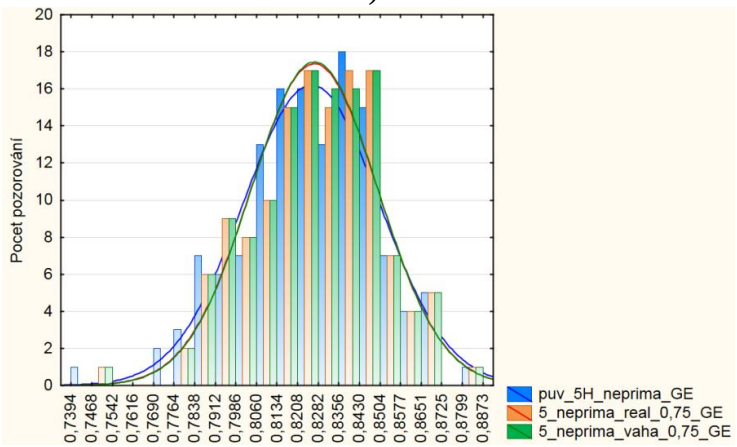
Obr.36: Hodnoty účinností pro tříhodinový interval a p=0,35 a) přímá účinnost, b) nepřímá účinnost, c) modifikovaná účinnost

Průměry přímé a nepřímé metody jsou naprosto totožné, modifikovaná metoda se pak pohybuje na horní hranici přesnosti. Použití vah má za následek jak ještě kvalitnější vyrovnání účinností, tak také větší vliv chybových koeficientů.

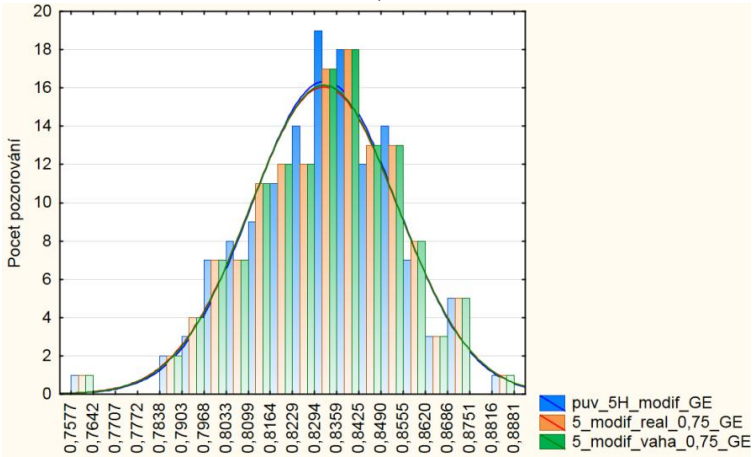
Poslední sada histogramů se věnuje hodnotám účinností se vstupními daty pětihodinových průměrů. Lze říci, že všechny tři druhy intervalů se chovají velmi podobně jako v případě intervalů předchozích, proto jsou zde uvedeny pouze obrázky bez bližšího komentáře.



a)

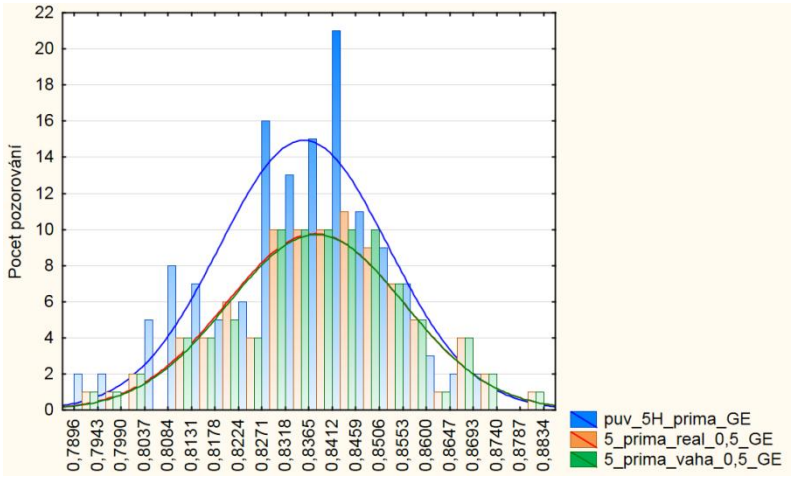


b)

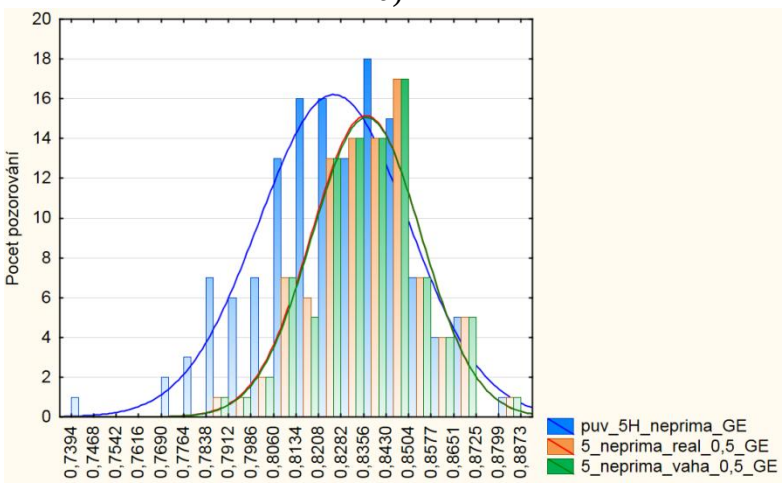


c)

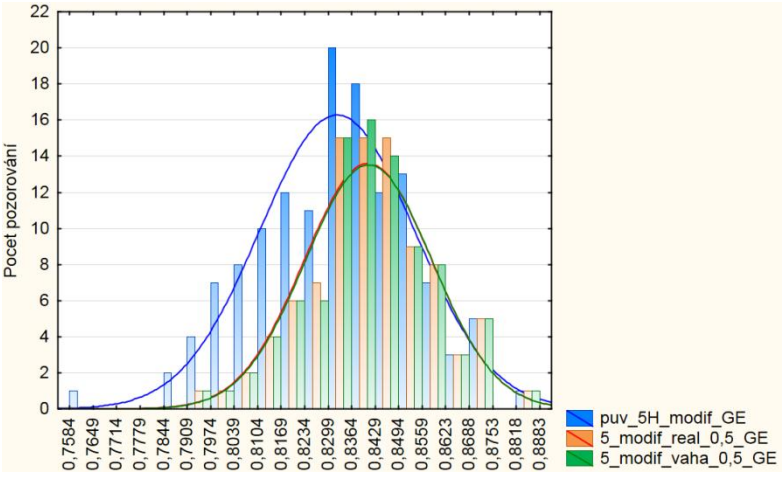
Obr.37: Hodnoty účinností pro pětihodinový interval a p=0,75 a) přímá účinnost, b) nepřímá účinnost, c) modifikovaná účinnost



a)

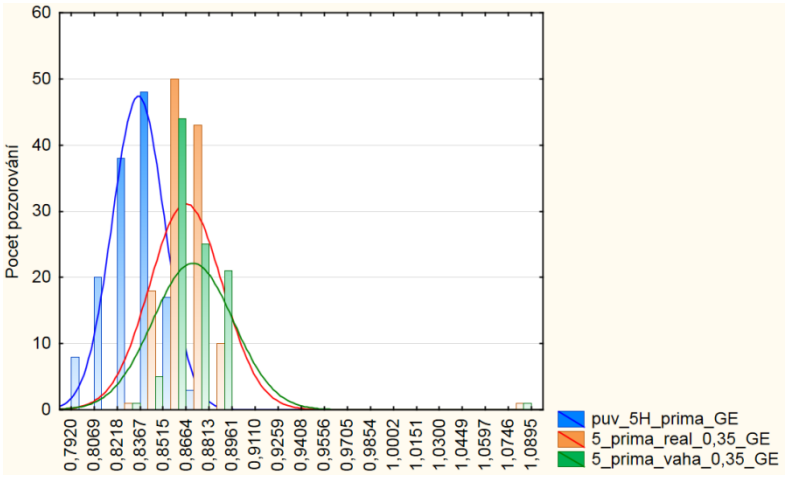


b)

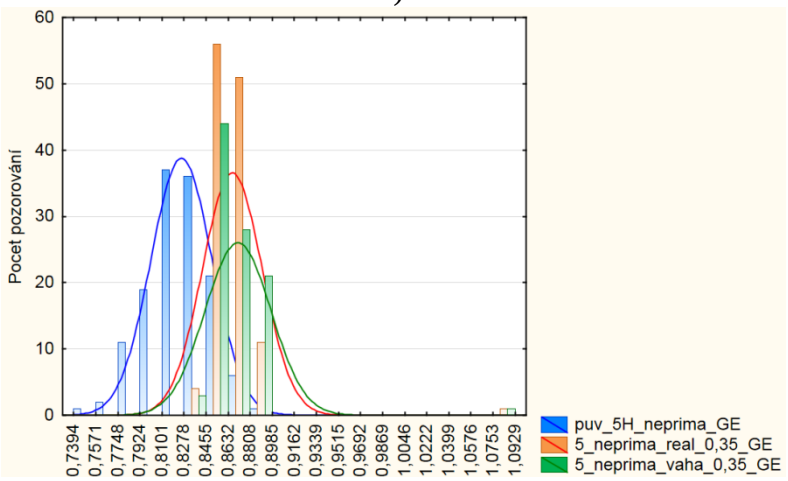


c)

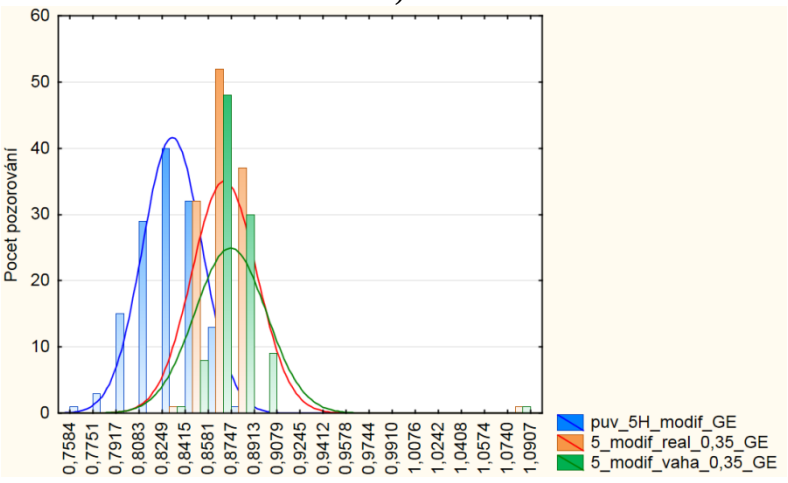
Obr.38: Hodnoty účinností pro pětihodinový interval a *p*=0,5 a) přímá účinnost, b) nepřímá účinnost, c) modifikovaná účinnost



a)



b)



c)

Obr.39: Hodnoty účinností pro pětihodinový interval a p=0,35 a) přímá účinnost, b) nepřímá účinnost, c) modifikovaná účinnost

Kvalitní vypovídací informaci o odezvě sytému lze najít v Tab. 18, kde jsou porovnány jednotlivé optimalizované hodnoty klíčových proměnných výpočtu účinnosti vůči původním vstupním (provozním) datům.

Tab. 18. Srovnání vyrovnaných v závislosti na přesnosti a délce intervalu

		1 hodina			3 hodiny			5 hodin		
přesnost	proměnná	původní	real	váha	původní	real	váha	původní	real	váha
0,75	lhv	8,4565	8,5622	8,5411	8,2978	8,3481	8,3073	8,3002	8,3347	8,3367
	mw	12,8511	12,9009	12,9378	12,9311	12,9510	13,0305	12,9522	12,9641	12,9605
	mst	32,8336	32,8127	32,8181	32,4974	32,4880	32,5394	32,5218	32,5156	32,5204
0,5	lhv	9,0487	9,1424	9,1657	8,7131	8,7573	8,7852	8,7079	8,7253	8,7387
	mw	12,5060	12,5526	12,5054	12,9577	12,9724	12,9432	12,9867	12,9901	12,9791
	mst	34,4650	34,4484	34,4949	34,3395	34,3340	34,4124	34,3044	34,3022	34,3331
0,35	lhv	8,4827	10,7904	11,4938	8,6360	10,6128	11,1931	8,5865	10,6433	11,0018
	mw	12,7525	10,5839	9,5138	12,7334	10,8042	9,8916	12,6800	10,6546	10,1414
	mst	32,7827	35,2779	33,7249	33,3419	35,5447	34,2555	33,0197	35,2714	34,5936

Hodnoty páry se v případě přesností p=0,75 a p=0,5 prakticky nemění, tendenci umělého zvyšování množství páry lze sledovat až v případě nejpřísnějšího omezení, přičemž váhovými koeficienty je tato snaha umírňována. Při vyrovnání výhřevnosti sledujeme, že model má tendenci tuto proměnnou zvyšovat, v případě využití vah se tento jev ještě umocňuje. V případě vyrovnávání hodnot odpadu pozoruje u přesnosti p=0,35 tendenci snižování jeho množství u dalších nastavení přesnosti naopak jeho množství zvyšuje.

Procentuelní hodnotu změny jednotlivých údajů shrnuje Tab.19.

Tab.19: Tendence vyrovnání dat vyjádřená v %

		1 hodina		3 hodiny		5 hodin	
přesnost	proměnná	real	váha	real	váha	real	váha
0,75	lhv	1,25	1,00	0,61	0,11	0,42	0,44
	mw	0,39	0,67	0,15	0,77	0,09	0,06
	mst	-0,06	-0,05	-0,03	0,13	-0,02	0,00
0,5	lhv	1,03	1,29	0,51	0,83	0,20	0,35
	mw	0,37	0,00	0,11	-0,11	0,03	-0,06
	mst	-0,05	0,09	-0,02	0,21	-0,01	0,08
0,35	lhv	27,20	35,50	22,89	29,61	23,95	28,13
	mw	-17,01	-25,40	-15,15	-22,32	-15,97	-20,02
	mst	7,61	2,87	6,61	2,74	6,82	4,77

Z výsledků plyne, že model je obecně funkční, nicméně je zapotřebí další studií a testování, aby byly stanoveny co nejvhodnější startovní podmínky výpočtu. Především hodnoty vah, přesnost a doba intervalu.

Závěr

Výhřevnost odpadu je zásadním parametrem pro plánování a provoz zařízení EVO. Zjišťování výhřevnosti je však značně komplikované. U existujícího zařízení lze použít zpětný výpočet z provozních dat, který ale nebere v úvahu konkrétní technologické řešení provozu a dá se tedy předpokládat, že je zatížen chybou.

V práci M. Pavlase [6] byla navržena metoda pro zpřesnění výhřevnosti zpětným výpočtem z provozních dat zařízení EVO a spolu s ní také dalších parametrů. Metoda je založena na principu vyrovnání dat a vychází z myšlenky, že účinnosti vypočítané různými způsoby by se měly pro ideální systém nezatížený chybami měření rovnat. Tam, kde toto neplatí (výpočty a reálnými měřenými daty) se rovnosti účinností snažíme dosáhnout právě úpravou (vyrovnáním) stěžejních parametrů – výhřevnosti SKO, množství spalovaného SKO a množství generované páry. Tato práce rozpracovává navrženou metodu a analyzuje její efekt pro daný účel.

Z výsledků vyplývá, že požadavek na úplnou rovnost účinností je příliš vysoký, proto je povolen určitý rozdíl (p). Díky tomu metoda výrazněji nereaguje na malou náhodnou chybu v parametrech. V případě větší systematické chyby, již dochází k reakci a metoda přibližuje vyrovnané hodnoty přesným hodnotám. Optimálního vyrovnání hodnot je docíleno použitím váhových koeficientů, které zohledňují velikost různě velkých chyb v parametrech.

Metoda má tedy jednu slabinu a to, že pro přesné vyrovnání požaduje vhodné nastavení vah. Jinými slovy požaduje určité znalosti o velikosti chyb v jednotlivých parametrech nebo alespoň o poměru mezi velikostmi. Jednou z možností je na základě odborného odhadu takový poměr stanovit. Ovšem z hlediska věrohodnosti by bylo vhodnější nalézt metodiku, která by vhodné váhy odhadla. To představuje motivaci pro další rozvoj metody v některé z dalších prací.

Při využití metody pro analýzu reálných dat bylo zjištěno poměrně velké množství hrubých chyb ve vstupních datech. Doporučuje se tedy před výpočtem provést jejich detekci a odstranění. Model obecně funguje, nicméně závěry z něj vycházející nejsou jednoznačné. Zřejmě nejdůležitější roli hraje ve výpočtu zvolená přesnost, která ovlivňuje především velikost chybových koeficientů. Z nich pak vyplývají velmi podobné účinnosti (bez ohledu na metodu výpočtu), tyto mají ovšem hodnotu až o 4,5% vyšší než účinnosti stanovené přímo z dat provozních.

Seznam použité literatury

1. European IPPC Bureau: Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, Brussles, available on http://eippcb.jrc.es, Sevilla, May, (2006)

2. Evropský parlament a Rada. Směrnice 98/2008/ES ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech, Úřední věstník Evropské unie, 2008, L 312: 3 -3

3. Parlament ČR, „Zákon č. 165/2022 Sb., o o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů ve znění pozdějších předpisů“, 2012. [Online na WWW]: http://eru.cz/user_data/files/legislativa/legislativa_CR/Zakony/zakon%20165_2012.pdf [cit.: 14-břez-2013].

4. NARASIMHAN, S.; JORDACHE C. Data reconciliation & gross error detection: an intelligent use of process data. Houston: Gulf Publishing, 2000, ISBN 0-88415-255-3-.

5. HEJL, M. Bilance provozu energetického využití odpadu. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 71 s.

6. PAVLAS, M.; TOUŠ, M.; BENÁČKOVÁ, J.; HEJL, M. Určení výhřevnosti směsného komunálního odpadu statistickou analýzou výrobních ukazatelů ze zařízení EVO. In *58. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2011*. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2011. s. 139-150. ISBN: 978-80-905035-0- 2.

7. Pavlas M., Mareš M. Ucekaj V., Oral J., Stehlík P.: Optimální nastavení výše podpory výroby elektřiny z odpadu ve vztahu k ceně elektřiny pro spotřebitele, VUT Brno, Ústav procesního a ekologického inženýrství, Brno, 2011

8. ČSN 06 3090: Zařízení pro termické odstraňování/zneškodňování a energetické využívání odpadů. Praha. 2007, 44s.

9. BENEŠOVÁ, L.; ČERNÍK, B.; HNAŤUKOVÁ, P.; KOTOULOVÁ, Z.; VRBOVÁ, M.; DOLEŽALOVÁ, M.; GAŠPAR, T.; PEŠEK T. Výzkum vlastností komunálních odpadů a optimalizace jejich využívání: Produkce a složení objemných odpadů, příloha závěrečné zprávy, Praha: Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, 2012

10. BENEŠOVÁ L., KOTOULOVÁ Z., ČERNÍK Z.: Základní charakteristiky komunálních odpadů. *Odpadové fórum,* 2011, č. 4.

11. European IPPC Bureau: Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, Brussles, Sevilla, 2006

12. REIMANN D. O. Determination and importance of characteristic numbers to the energy and plant utilization as well as to efficiencies for the waste incineration. Bamberg, Germany.

13. Acceptance testing of waste incineration plants with grate firing systems: FDBR Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau,[2000]. Guideline edition, 2000.

14. KOLÁČEK, R.: Výkonové parametry systému pro energetické využití biomasy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 73 s.

Seznam zkratek

BREF	Best available techniques reference dokument
CZT	Centrální zásobování teplem
ČSU	Český statistický úřad
EVO	Energetické využití odpadů
FSI	Fakulta strojního inženýrství
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
PCDD/F	Dioxiny a furany
SKO	Směsný komunální odpad
VBA	Visual Basic
VUT	Vysoké učení technické
$Q_{užit}$	množství tepla dodané pro ohřev vody
Q_{paliva}	množství tepla vzniklé spalováním paliva
$Q_{ztráty}$	Tepelné ztráty
lhv	Výhřevnost
$lhv_{W,B}$	výhřevnost odpadu dle BREF
$lhv_{W,R}$	výhřevnost odpadu dle Reimanna
$\dot{m}_{ST,W}$	množství vyrobené páry z odpadu bez podílu páry vyrobené
$\dot{m}_W$	množství zpracovaného odpadu
η	Účinnost
η_{kt}	Účinnost kotle
η_p	účinnost přímou metodou
η_N	účinnost kotle nepřímou metodou
η_M	účinnost kotle nepřímou modifikovanou metodou
p	Přesnost, povolený rozdíl účinností
t_{SP4}	teplota spalin na výstupu z kotle
$i_{ST,HP,NET}$	rozdíl entalpie páry na výstupu z kotle a napájecí vody
ζ_{MN}	ztráta mechanickým nedopalem
ζ_{CN}	ztráta chemickým nedopalem
ζ_f	ztráta citelným teplem tuhých zbytků
ζ_k	ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta)
ζ_{SV}	ztráta sdílením tepla do okolí
u, v, w	Váhové koeficienty
X	chybový koeficient výhřevnosti
Y	chybový koeficient množství spalovaného odpadu
Z	chybový koeficient množství generované páry
X1, Y1, Z1	Poměr ideálních hodnot ku generovaným rozhozeným

Seznam příloh

Příloha č.1

CD obsahující:

1) diplomovou práci v pdf
2) výpočtové soubory pro Microsoft Excel
   - Umele_rozhozeni.xlsx
   - Real_data.xlsx
   - Gross_error.xlsx
   - Real_data_poGE.xlsx