

APPLICATION OF NONLINEAR DATA RECONCILIATION METHOD
FOR STEAM GENERATORS DATAT. Vítek¹, V. Havlena

Summary: *In order to improve the accuracy of process data, the data reconciliation method can be used. Data reconciliation takes advantage of physical and chemical balances which can be arranged to decrease the measurement errors. Data processed by data reconciliation are in harmony with the physical model of technology which is further used for optimization of the process.*

This article claims to formulate the data reconciliation task in case of the heat system - the steam generator. The final form of problem is to minimize quadratic function subject to bilinear constraints. From various possible solutions we chose the gradient projection method and the sequential quadratic programming method (SQP). These two methods are compared in terms of efficiency and robustness in solving the reconciliation of steam generator's data.

1. Úvod

Kvalita dat získaných měření stavových veličin, která se vyskytují například v procesech průmyslových odvětví, výrazně ovlivňuje efektivnost navazujících softwarových produktů, sloužících k monitorování a optimalizaci procesů, respektive k jejich samotnému řízení.

Naměřené hodnoty, neboli data veličin určitého procesu, obsahují chyby měření, a tím znehodnocují optimalizační model, který je k řízení procesu používán. Metody sladění dat (data reconciliation) byly vyvinuty jako nástroje sloužící k eliminaci datových nepřesností tak, aby nepřesnostmi ovlivněná data po aplikaci metodiky sladění vyhovovala objektivnímu modelu sledovaného zařízení. Metody sladění dat zpracovávají naměřená data a jsou mezičlánkem mezi fyzickými senzory, které v procesu data snímají, a zařízeními, která slouží k jeho monitorování a optimalizaci. První aplikace metody sladění dat jsou známy z odvětví zpracování nerostných surovin a chemického průmyslu.

Cílem této práce je na základě analýzy odborné literatury z oblasti data reconciliation a nelineární optimalizace formulovat metodiku sladění dat s následnou aplikací pro parní generátor. Realizaci tohoto úkolu jsme rozdělili do několika částí. Jednak jsme formulovali úlohu sladění dat pro obecný model i pro konkrétní případ tepelného systému. Způsoby řešení formulované úlohy sladění dat jsme analyzovali. Testování optimalizačního systému jsme provedli jednak principiálně a dále pak k jednotlivým způsobům řešení úlohy sloužila data konkrétního parogenerátoru.

Pro opravu dat je potřeba v první řadě popsat danou technologii modelem, ve kterém označíme měřené veličiny. V druhém kroku nalezneme fyzikální omezení, které se v daném

¹Ing. Tomáš Vítek, Doc. Ing. Vladimír Havlena, CSc.: Katedra řídicí techniky, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze; Technická 2; 166 27 Praha 6; tel.: +420 777 10 98 68; e-mail: vitek2@control.felk.cvut.cz

systému uplatňují, a popíšeme tato omezení formou rovnic. Formulovaná omezení potom využíváme k výpočtu opravených hodnot.

2. Formulace problému sladění dat

Aplikace metodiky „data reconciliation“ obecně zlepšuje přesnost dat monitorujících průběh procesu tak, aby po korekci vyhovovala fyzikálním bilancím sestaveným na uvažovaném modelu dané soustavy. Hmotnostní, tepelné i jiné typy bilančních rovnic tvoří implicitní omezení, kterým by vzorky dat naměřené v soustavě měly vyhovovat. Tato fyzikální omezení jdou v každém systému formulovat jako soustava nelineárních bilančních rovnic

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, \quad (1)$$

kde \mathbf{x} je n složkový vektor systémových proměnných a $\mathbf{g}(\mathbf{x}): R^n \rightarrow R^m$ nelineární vektorové pole. Funkce $g_k(\mathbf{x})$ jsou libovolné funkce více proměnných, spojitě až do druhého řádu. Vektor naměřených hodnot $\tilde{\mathbf{x}}$ tato omezení nespĺňuje. Je možné pokusit se naměřené hodnoty opravit přičtením korekčního vektoru $\hat{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{e}$ tak, aby opravená data $\hat{\mathbf{x}}$ soustavu rovnic již splňovala

$$\mathbf{g}(\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{e}) = \mathbf{0}. \quad (2)$$

Podmínkou pro výběr vhodné korekce \mathbf{e} je požadavek, aby korekční vektor \mathbf{e} minimalizoval zvolenou normu – jeho vážená velikost byla minimální:

$$J(\mathbf{e}) = \mathbf{e}^T \mathbf{W} \mathbf{e} = (\hat{\mathbf{x}} - \tilde{\mathbf{x}})^T \mathbf{W} (\hat{\mathbf{x}} - \tilde{\mathbf{x}}). \quad (3)$$

Váhová matice \mathbf{W} je volena jako diagonální. Jednotlivé váhy kompenzují neporovnatelnost jednotek jednotlivých vektorů a jednotlivé váhy mohou potom mít fyzikální význam směrodatných odchylek, ale volba jejich velikosti může být také vykládaná jako tolerance ke změně daného parametru. Diagonální prvky matice \mathbf{W} je možné vyjádřit pomocí směrodatných odchylek σ jako

$$\mathbf{W}_{ii} = \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4)$$

Výsledná formulace problému sladění dat může být realizována minimalizací

$$\min_{\mathbf{e}} (J(\mathbf{e})), \quad (5)$$

vzhledem k omezujícím podmínkám ve tvaru

$$\mathbf{g}(\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{e}) = \mathbf{0}. \quad (6)$$

Pro aplikaci na konkrétní problém je v první řadě nutné získat soustavu omezujících podmínek a následně hledáme korekční vektor pomocí nelineárního programování.

3. Aplikace na tepelné zařízení

Výrobní procesy jsou často proluty fyzikálními a chemickými zákonitostmi. Pro tyto technologické procesy také platí zákony zachování hmoty, energie, hybnosti i zákony chemické například o stechiometrických a molárních poměrech. Jejich využití z hlediska sladění dat zkoumaného procesu je orientováno do oblasti metodiky monitorování výrobního procesu jako takového. Snažíme-li se o kontrolu správnosti funkce, je nutné znát stavové veličiny daného systému jako jsou teplota, tlak, průtok, koncentrace sálání apod. Existují měřicí metody, které jsou však zatíženy chybou. Základními prvky tepelných provozů

v těchto odvětvích jsou různé typy zásobníků, směšovačů, separátorů a tepelných výměníků, což jsou systémy se soustředěnými parametry.

Rozdělíme bilanční rovnice (bilance) dle původu do základních kategorií, pro které jsou podstatné určité druhy proměnných:

Hmotnostní bilance

Pro každý systém platí, že hmota se z něj nemůže vytratit (zákon zachování hmoty). Tedy pro každý řez v obecném systému platí rovnice kontinuity v možném zápisu

$$\sum m_{in} + \sum m_s = \sum m_{out} + \sum m_A, \quad (7)$$

kde m_{in} představuje hmotnosti nebo průtoky vstupující, m_s - hmotnost, kterou produkuje uzavřený zdroj, m_{out} - hmotnost vystupující a m_A - je hmotností akumulovanou. Jak je patrné z rovnice (7), jednotlivé hmotnosti a zdroje se sčítají, a tak hmotnostní bilance má lineární charakter.

Zákon zachování energie

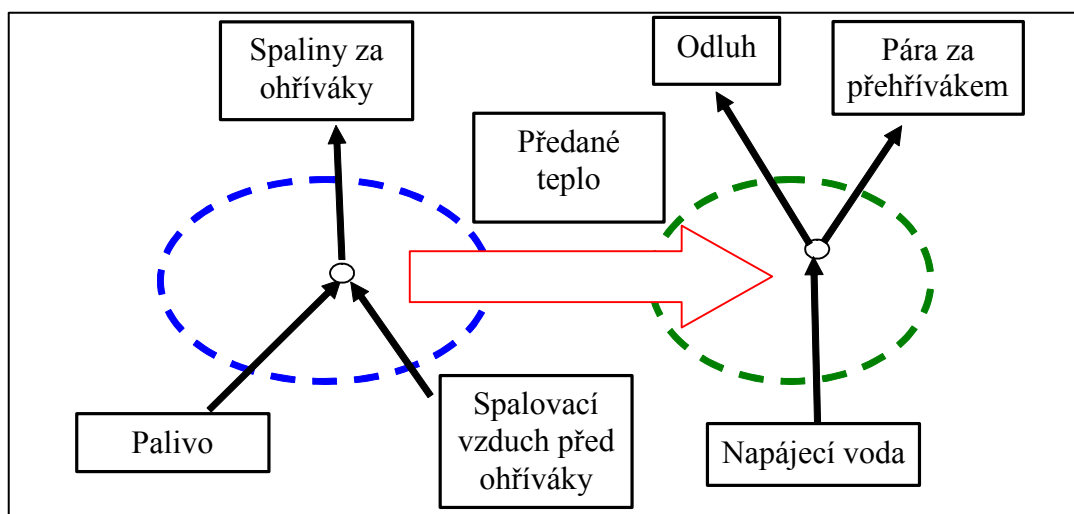
Energie je také veličinou, jejíž množství v systému se zachovává. Energie může přecházet pouze mezi jednotlivými formami, nebo se měnit v mechanickou práci a teplo. Vezmeme-li tudíž libovolný řez v systému, platí pro něj obdoba rovnice kontinuity

$$\sum E_{in} + \sum E_s + Q_{in} = \sum E_{out} + \sum E_A + W_{out}, \quad (8)$$

kde představují: E_{in} - energie a teplo, kterou přinášejí media tekoucí do zvoleného řezu, E_s - teplo nebo energii, která je uvolněna uvnitř řezu, E_{out} - teplo a energii obsažená v mediích, které z řezu vystupují, Q_{in} - teplo vstupující z okolního prostředí, W_{out} - vykonaná práce a E_A - energie akumulovaná v objemu.

4. Sestavení bilančních rovnic

Pro schéma z obr.1 chceme sestavit soustavu bilančních rovnic. O systému uvažujeme jako o tepelném systému. V tepelných systémech platí dva typy bilančních rovnic a to rovnost hmotností a zákon o zachování tepelné energie.



Obr.1, Schéma tepelné bilance kotle

Jak je z obr.1 patrné, vyskytují se v parním generátoru dva základní uzly, pro něž je možné bilanci sestavit. V obr.1 jsou naznačené řezy, pro které sestavíme bilanční rovnice.

Pro kotel je v prvním přiblížení možné vytvořit dva nezávislé řezy, ve kterých je možné sestavit tepelnou bilanci a hmotnostní bilanci. Formulace konkrétního zadání vyžaduje vyjádřit tepelné toky v rovnicích (7, 8) pomocí hmotností a teplot jednotlivých médií. Protože známe způsob jak určit entalpie a měrné tepelné kapacity jednotlivých toků, je možné vyjádřit konkrétní tepla nesená v jednotlivých tocích. Měrné tepelné kapacity medií lze určit ze specifikace parogenerátoru, která je uvedena v tab.1.

$$0 = m_{fuel} Q_i + \overbrace{m_{fuel} c_{fuel} T_{fuel}}^{Q_{fuel}} + \overbrace{m_{vv} (\sigma_p (l_{l,g} + c_{pp} \bar{T}_{vv}) + \sigma_{sv} c_{psv}) T_{vv}}^{Q_{vv}} - \underbrace{m_{vv} \sigma_p (l_{l,g} + c_{pp} T_{sp}) - (m_{vv} \sigma_{sv} - m_{fuel} m_{svmin}) c_{psv} T_{sp} Q_{sp} - m_{fuel} m_{svmin} i_0^T \frac{T_1}{T_0}}_{-Q_{sp}} - Q_{pass}, \quad (9)$$

$$0 = m_{vv} + m_{pal} - m_{sp}, \quad (10)$$

kde Q_i [kJkg⁻¹] je výhřevnost paliva, Q_{fuel} [kJ s⁻¹] je teplo v palivu obsažené (uvažujeme pouze u kapalných paliv), Q_{vv} [kJ s⁻¹] je teplo obsažené v nasávané studeném vzduchu, Q_{sp} [kJ s⁻¹] označuje teplo odnášené spalinami do okolí, Q_{pass} [kJ s⁻¹] značí teplo předávané do parního okruhu, m_{fuel} [kgs⁻¹] je průtok spalovaného paliva, m_{vv} [kgs⁻¹] je průtok nasávaného vlhkého vzduchu a m_{sp} [kgs⁻¹] je průtok spalin, které vypouštíme do okolí.

Pro stranu parního okruhu mají bilance následující tvar

$$0 = Q_{pass} - \overbrace{m_o c_o T_{bub}}^{Q_o} - \overbrace{m_{pp} \frac{i_{pp}}{\bar{T}_{pp}} T_{pp}}^{Q_{pp}}, \quad (11)$$

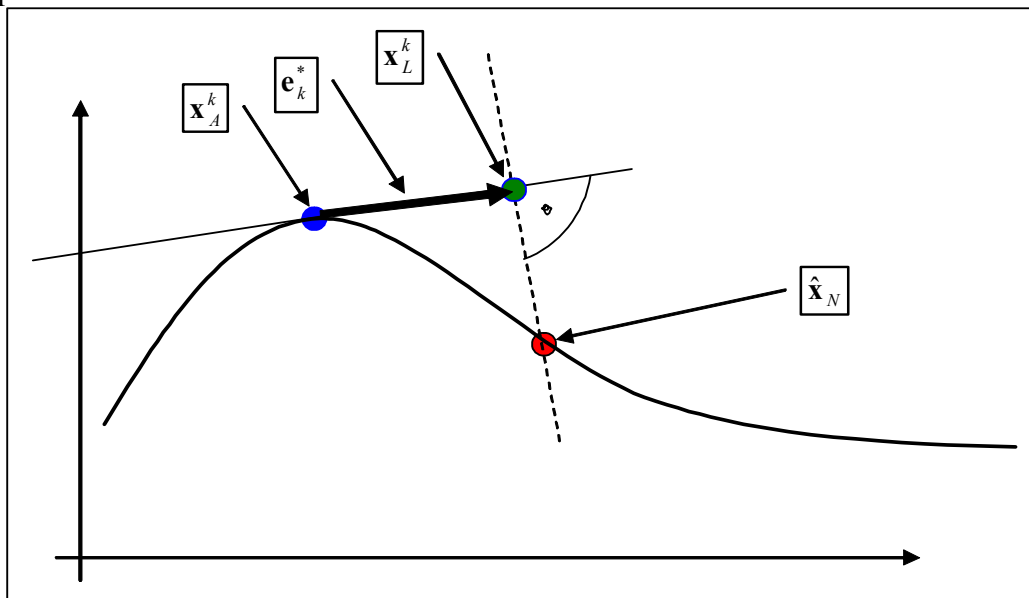
$$0 = m_{fw} - m_o - m_{pp}, \quad (12)$$

kde Q_o [kJ s⁻¹] - teplo obsažené ve vodě vypouštěné v odluhu, Q_{pp} [kJ s⁻¹] - teplo obsažené v odebírané páře za přehřívákem páry, m_{fw} [kgs⁻¹] - průtok napájecí vody, m_o [kgs⁻¹] - průtok vody odluhu a m_{pp} [kgs⁻¹] - průtok odebírané páry.

Máme tedy sestavené bilanční rovnice pro soustavu, kterou modelujeme, dalším úkolem je vyjádřit jednotlivé tepelné a hmotnostní toky pomocí veličin, které jsme schopni v systému měřit. Soustava čidel, která systém pro standardní účely monitoruje nemusí nutně snímat všechny tlaky, teploty a průtoky v systému. Některé veličiny je nutné tedy použít na základě tabulkových hodnot. Určení entalpií jednotlivých toků se zabývá [1, kap.4.4].

Jednotlivé rovnice jsou jednak lineárního a jednak bilineárního charakteru. Výsledná optimalizační úloha nemá analytické řešení. Z toho důvodu je nutné výsledný problém řešit numericky. Z možné palety numerických metod jsme řešili problém dvěma metodami. Problém jsme simulovali v prostředí matlab [5]. Jednak jsme použili metodu sekvenčního

kvadratického programování (SQP) druhou metodou, kterou jsme pro vyřešení problému testovali, byla metoda projekce gradientu. Metodu SQP jsme dále neupravovali a použili jsme standardní proceduru optimalizačního toolboxu prostředí matlab. Metoda projekce gradientu byla upravena přímo pro případ minimalizace kvadratické funkce. Tato metoda byla uvedena v [1] pod názvem linearizace omezení.

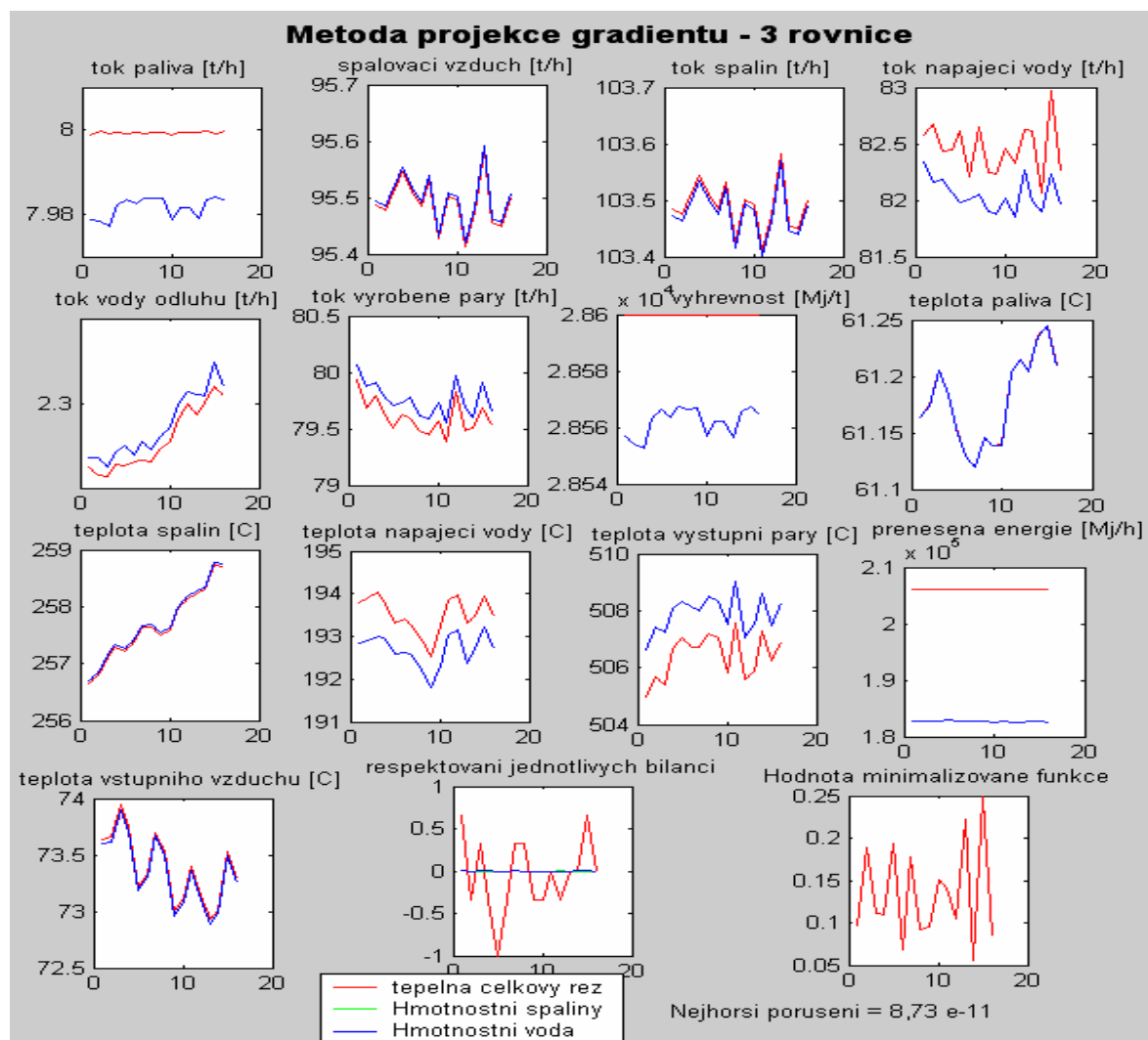


Obr.2, Projekce na omezení pro metodu projekce gradientu

Tab.1, Parametry parogenerátoru na jehož datech probíhalo testování

Název	Označení	Velikost	Jednotka
Kapalné palivo Orimulsion výhřevnost	Q_i	28600	[kJkg ⁻¹]
Průtok výstupní páry	m_{pp}	79,5	[th ⁻¹]
Průtok paliva	m_{fuel}	8	[th ⁻¹]
Průtok spalovacího vzduchu	m_{vv}	95	[th ⁻¹]
Průtok napájecí vody	m_{fw}	82	[th ⁻¹]
Průtok odluhu	m_0	2,5	[th ⁻¹]
Teplota paliva	T_{fuel}	60	[°C]
Teplota výstupní páry	T_{pp}	505	[°C]
Teplota spalovacího vzduchu	T_{vv}	75	[°C]
Teplota napájecí vody	T_{fw}	200	[°C]
Teplota v bubnu	T_{bub}	320	[°C]
Tlak výstupní páry	p_{pp}	11	[MPa]
Tlak v bubnu	p_{bub}	11	[MPa]
Teplota spalin	T_{sp}	250	[°C]
Tlak napájecí vody	p_{fw}	11,1	[MPa]

Metoda hledá korekci sekvenčně linearizováním nelineárních omezení v místě nejlepšího odhadu, následně vyřeší problém minimalizace funkce (3) vůči linearizovaným omezením, který má analytické řešení uvedené například v [1]. Toto řešení následně promítá ortogonálně zpět na omezující podmínky. Výhodou této metody je zachování lineárních omezení v nezměněném tvaru a navíc rychlý výpočet korekčního vektoru. Navíc pokud máme v soustavě obsažený parametr, pro který neznáme apriory startovací hodnotu je možné využít metodu eliminace neměřené proměnné (Crows projection method), která umožní vypočítat nejprve proměnné jejichž odhad známe a následně neměřenou proměnnou. Využití této doplňkové metody není u SQP možné.



Obr.3, Ukázka korigovaných veličin

5. Experiment

Při aplikaci metody sladění dat na parní generátor je možné použít dvě varianty řešení. V prvním případě jsme využili pro sladění dat všechny čtyři bilanční rovnice (9, 10, 11, 12) parního generátoru. V rovnicích figuruje neměřitelná proměnná Q_{pass} , pro kterou je nutné znát apriorní odhad, ke kterému pak byla následně zavedena vážená korekce. Odhad

velikosti předané energie je možné získat pomocí předpokládané energie uvolněné z paliva a účinnosti pro podobný druh spalovacího zařízení

$$Q_{pass} = \eta_p Q_i m_{fuel} \quad (13)$$

Účinnost parogenerátoru jsme uvažovali $\eta_p = 0,9$.

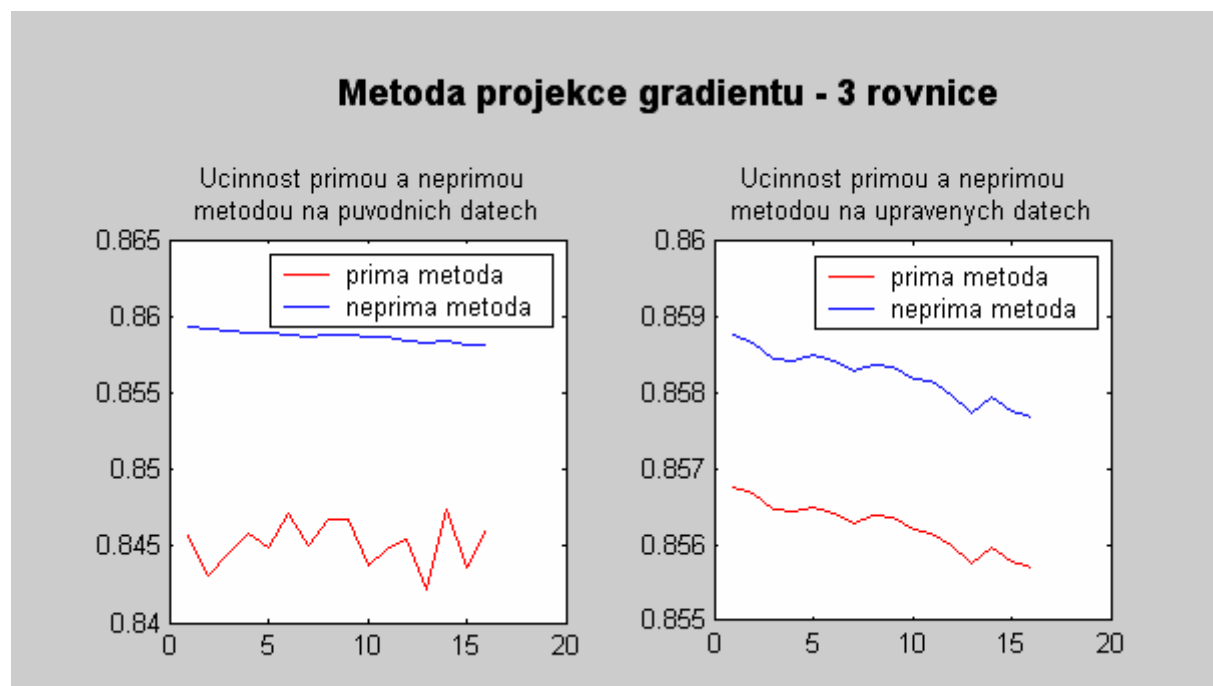
Druhou možností je eliminovat z rovnic neměřitelnou proměnou Q_{pass} . Tu je možné vyloučit z bilančních rovnic (9, 11) pro teplo sestavením jediné tepelné bilance pro celé zařízení. Výsledný počet omezujících rovnic je v tomto případě roven třem.

Kriteriem hodnocení metody je nesplnění jednotlivých bilančních rovnic a hodnota minimalizované funkce pro výslednou korekci. Z těchto důvodů jsme testovali data naměřená v několika po sobě jdoucích intervalech. Takto získaná data se od sebe jen málo lišila, a proto byly též málo odlišné i počáteční podmínky, ze kterých byl výpočet zahájen.

Sladění dat parního generátoru – výpočet účinnosti

Příklad výsledku pokusu je prezentován na obr.3. Jednotlivé grafy zobrazují veličiny sledované v procesu před a po opravě v několika po sobě jdoucích intervalech. Vstupní naměřené hodnoty a apriorní odhady neměřených veličin jsou označeny červeně. Opravená data jsou označena modře. Potvrdila se vlastnost metody SQP, pro kterou jsou rovnice při srovnatelných počátečních podmínkách porušovány s proměnlivou velikostí, kterou nelze předem odhadnout. Metoda projekce gradientu se neprojevuje podobnými výkyvy a pro předem stanovenou přesnost nalezne řešení srovnatelné s metodou SQP. Výsledky obou metod jsou pro případ použití tří i čtyř bilančních rovnic srovnatelné. Ovšem použití čtyř bilančních rovnic je v případech, kdy máme k dispozici odhad neměřených veličin, výhodnější.

Důležitým produktem sladění dat je získání odhadu pro veličiny obtížně měřitelné, jako je například výhřevnost paliva nebo teplo předané do parního okruhu.



Obr.4, Rozdíl ve výpočtu účinnosti na starých a opravených datech

Druhým kritériem pro srovnání jsme zvolili výpočet účinnosti celého zařízení. Pro vstupní neupravená data nevychází účinnost zařízení určená přímou a nepřímou shodně. Většinou je účinnost určená nepřímou metodou větší než účinnost určená metodou přímou. Sladěná data splňují hmotnostní i tepelnou bilanci zařízení. Z toho důvodu výpočty účinnosti přímou a nepřímou metodou budou poskytovat sobě navzájem bližší výsledky. Výsledné účinnosti určené na základě dat zpracovaných oběma užitými metodami tento předpoklad splňují. Ilustrace rozdílu účinností určených přímou a nepřímou metodou, před a po zpracování dat je dokumentovaná v grafech na obr.4. Rozdíl mezi účinnostmi před a po zpracování dat se zmenšil až přibližně na jednu sedminu : $(0,860-0,845=0,015)$ oproti $(0,859-0,857=0,002)$.

Poděkování : Tento výzkum byl podporován grantem GAČR_106/02/0612.

6. Literatura

- [1] Madron, F. *Measurement and Data Processing for Optimization and Retrofits*, London: EllisHorwood Limited, 1992.
- [2] Veverka, V. Balancing and Data Reconciliation Minibook equations [online]. [30.1.1997], [20.6.2003], <[Http://www.chemplant.cz](http://www.chemplant.cz)>.
- [3] Veverka, V., Madron, F. *Material and Energy Balancing in the Process Industries. From Microscopic Balances to Large Plants*, Amsterdam: Elsevier, 1997.
- [4] Narasimhan, S. - Jordache, C. *Data Reconciliation & Gross Error Detection*, Houston: Gulf Publishing Company, 2000.
- [5] Matlab Online HelpDesk [online]. [20.10.2003], <[Http://www.mathworks.com/optim.shtml](http://www.mathworks.com/optim.shtml)>.
- [6] Madron, F. Stoichiometry of industrial electrolysis of sodium chloride (in Czech), *Chemický průmysl*, 1981, vol. **31**: 114-117.
- [7] Crowe, C. M. Observability and redundancy of process data for steady state reconciliation, *Chem. Eng. Sci.*, 1989, vol. **44**: 2909-2917, 1989.
- [9] Štecha, J. *Optimální rozhodování a řízení*, Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02083-5.
- [10] Crowe, C. M., Campos, Y.A.G., Hrymak, A., Reconciliation of Process Flow Rates by Matrix Projection. I: Linear Case, 1983 *AIChE Journal* 29: 881-888.
- [11] Černý, V., Hrdlička, L., Janeba, B., Karták, J., Pikman, M.: *Parní kotle a spalovací zařízení*, Praha: SNTL, 1975.
- [13] Dlouhý, T.: *Návrhy kotlů a spalínových výměníků*, Praha: ČVUT, 1999.
- [15] Luenberger, D. C., *Linear and nonlinear programming*, Addison-Wesley Publishing Company, 1984. ISBN 0-201-15794-2.
- [16] Vítek, T. Algoritmy pro nelineární sladění dat [online]. [cit. 20.01.2003], <http://dce.felk.cvut.cz/dolezilkova/diplomky/2004/dp_2004_vitek_tomas/dp_2004_vitek_tomas.pdf>.