

## SNÍMÁNÍ FLUKTUACE TLAKU V OHNIŠTI KOTLE SPALUJÍCÍHO UHELNÝ PRÁŠEK

Petr ŠTĚPÁNEK <sup>1,2</sup><sup>1</sup>MORE, s.r.o. Podnikatelská 267, Praha 9<sup>2</sup>Fakulta strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6

e-mail: petr.stepanek@fs.cvut.cz

V USA jsou exploze/zahoření paliva nejčastější příčinou hmotných škod i zranění personálu obsluhy kotlů. K explozím/zahoření paliva dochází nejčastěji v mlecích okruzích. Nicméně exploze v ohništích způsobené momentální ztrátou stability spalovacího procesu jsou druhou nejčastější příčinou nehody v rámci kategorie exploze/zahoření paliva. Předkládaný příspěvek prezentuje možnosti monitorování stability spalování a zabývá se dalšími přínosy termoakustických měření v tepelné energetice.

*Klíčová slova:* termoakustika, hluk buzený ohništěm, fluktuační tlaku.

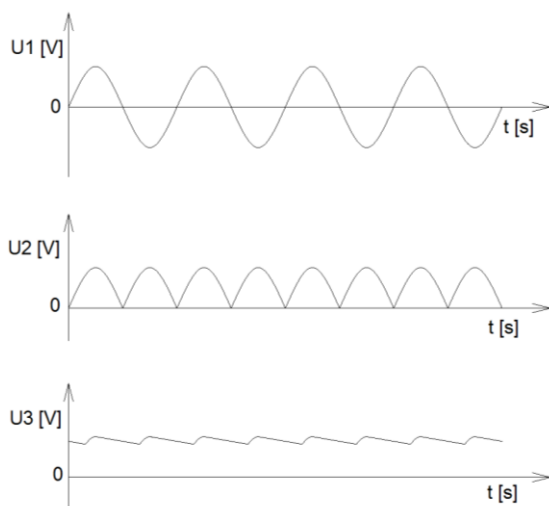
Došlo 11. 1. 2016, přijato 3. 3. 2016

## 1. Úvod

### 1.1. Fluktuační

Již samotný název příspěvku vybízí k několika otázkám, např.: Co je to fluktuační tlaku? Co nás vede ke snímání fluktuační tlaku v ohništi parního kotle?

Pro usnadnění výkladu fluktuační bude použita analogie s elektronikou. Je-li přivedeno střídavé elektrické napětí  $U_1$  na svorky stabilizátoru napětí, dojde nejprve k usměrnění napětí na tepavý průběh  $U_2$ , který se vyhladí filtračním kondenzátorem na průběh napětí  $U_3$ . Ilustrační příklady průběhů jednotlivých napětí jsou na obr. 1.



**Obr. 1** Ilustrační průběhy elektrických napětí na stabilizátoru napětí v závislosti na čase

**Fig. 1** Changes of voltage at the input of an electrical rectifier ( $U_1$ ), at the output of the rectifier ( $U_2$ ) and after stabilization ( $U_3$ )

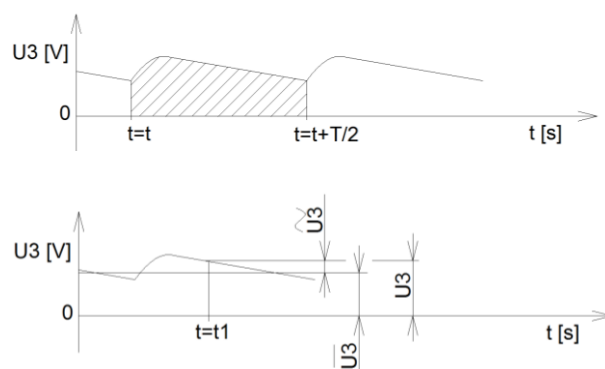
Signál elektrického napětí  $U_3$  nebude ani po usměrnění a vyhlazení filtračním kondenzátorem zcela stejnosměrný. Za předpokladu, že amplituda a kmitočet elektrického napětí  $U_1$  na vstupu do stabilizátoru se nebude

měnit, bude stejnosměrná složka napětí  $U_3$  v souladu s obr. 2 aritmetickým průměrem za dobu poloviny periody  $T$ :

$$\overline{U_3} = \frac{2}{T} \int_t^{t+T/2} U_{3(t)} dt \quad (1)$$

Pak v náhodném okamžiku  $t = t_1$  bude střídavá složka elektrického napětí  $U_3$  podle rovnice (2). Právě ona střídavá složka  $\widetilde{U_3}$  je příkladem toho, čím je v termoakustickém kontextu fluktuační veličin, jako jsou teplota nebo tlak.

$$\widetilde{U_3} = U_{3(t_1)} - \overline{U_3} \quad (2)$$



**Obr. 2** Detail průběhu elektrického napětí  $U_3$  v závislosti na čase

**Fig. 2** Detailed view of voltage  $U_3$

### 1.2. Význam fluktuační tlaku v ohništi

Fyzikální jevy, ke kterým dochází uvnitř ohniště parního kotle spalujícího uhelný prášek, jsou zdrojem nezanedbatelného hluku. Dle Bragga [2] se přibližně jedna miliontina chemicky vázané energie v palivu přivedená do ohniště přemění na akustickou energii. V tuzemských

elektrárnách častý výrobní blok osazený turbogenerátorem o instalovaném výkonu  $200\text{MW}_E$  je zapojen do série s kotlem o tepelném výkonu přibližně  $600\text{MW}_T$ . V souladu s Braggovou teorií takový kotel vyzařuje hluk o ekvivalentu výkonu  $600\text{W}$ .

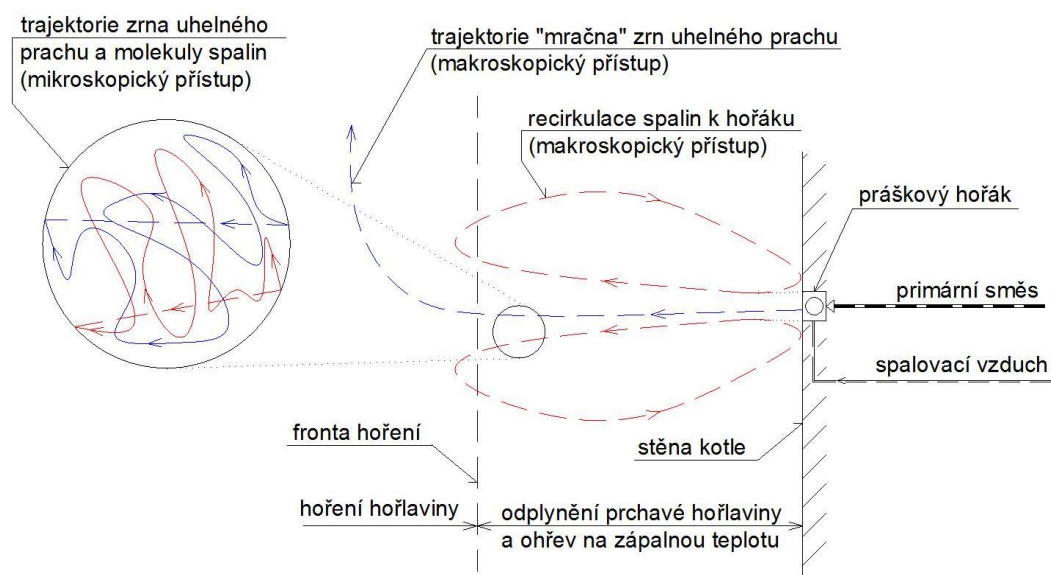
Příčinou hluku obecně jsou fluktuace tlaku – totiž akustický tlak, který se projevuje formou mechanického vlnění, jenž se šíří pevnými tělesy i tekutinou. Kromě toho, že jsou fluktuace tlaku v ohništi zodpovědné za hluk generovaný ohništěm, lze jejich snímáním a vyhodnocením diagnostikovat kvalitativní vlastnosti spalovacího procesu. Ve snaze zavést měřítka kvalitativních vlastností spalovacího procesu byla definována veličina – stabilita spalování, o níž bude podrobněji pojednáno ve druhé kapitole příspěvku. Právě snímáním a vyhodnocením fluktuací tlaku lze predikovat pokles stability spalovacího procesu a tím významnou měrou zvýšit bezpečnost provozu dotyčného spalovacího zařízení.

Různí autoři se během práce na popisu vzniku nestability spalovacího procesu dostali k pojmu zpožděný zážeh, který je popsán v [4]. Svůj matematický model na

tomto jevu definovali již v polovině osmdesátých let minulého století i odborníci z ČVUT [5]. Zpoždění zážehu je zjednodušeně řečeno doba, která uplyne od okamžiku, kdy myšlená částice paliva opustí výstupní ústí trysky hořáku do okamžiku, kdy dojde ke vzplanutí této částice.

V případě, že je rychlost proudu reaktantů na ústí trysky hořáku stejně velká jako rychlost spalování, nedochází ke zpožděnému zážehu. Nedochází-li ke zpožděnému zážehu, je generováno méně hluku a spalovací proces vykazuje vyšší stabilitu.

Aby mohlo dojít k hoření, je třeba přivést do ohniště určité množství reaktantů. Další nutnou podmínkou hoření je dosažení zápalné teploty hořlaviny. Vzhledem k heterogennímu složení hořlaviny uhelného prášku a faktu, že každá ze složek hořlaviny má jinou zápalnou teplotu, nemá fronta hoření jednoznačnou polohu. Nutno dodat, že v souvislosti s výše uvedeným tepelný tok z víru recirkulovaných spalin vykazuje fluktuace, stejně jako přívod paliva, což jsou další faktory, které ovlivňují polohu fronty hoření. Základní představu o průběhu spalování lze získat z obrázku 3.



Obr. 3 Vnitřní recirkulace spalin z ohniště k hořáku.

Fig. 3 Internat recirculation of flue gas from the combustion chamber to the burner

Předpokládá se, že k sušení paliva dojde již v mlčím okruhu. Čárkovanou linkou jsou zobrazeny makroskopické jevy, tj. pohyb větších objemů disperze (v pravé i levé části obrázku). Plnou linkou jsou naznačeny možné trajektorie jednotlivých zrn uhlénoho prášku/molekul spalin (pouze v levé části obrázku, jenž je detailem výřezu objemu ohniště z pravé části obrázku). Červenou barvou je disperze tvořená spalinami včetně jejich tuhé části. Modrou barvou je disperze primární směsi.

## 2. Stabilita spalování

V příspěvku byl již několikrát použit termín „stabilita spalovacího procesu“. Nabízí se otázka, jakým způsobem je tato veličina definována, potažmo jaký má fyzikální rozměr. Bohužel, není možno zcela jednoznačně odpovědět. Nejčastěji bývá stabilita spalování odvozena z Rayleighova kritéria [3, 6], matematická formule viz rovnice (3).

$$R = \int_0^V \int_0^t \tilde{p} \tilde{h} dt dV > 0 \quad (3)$$

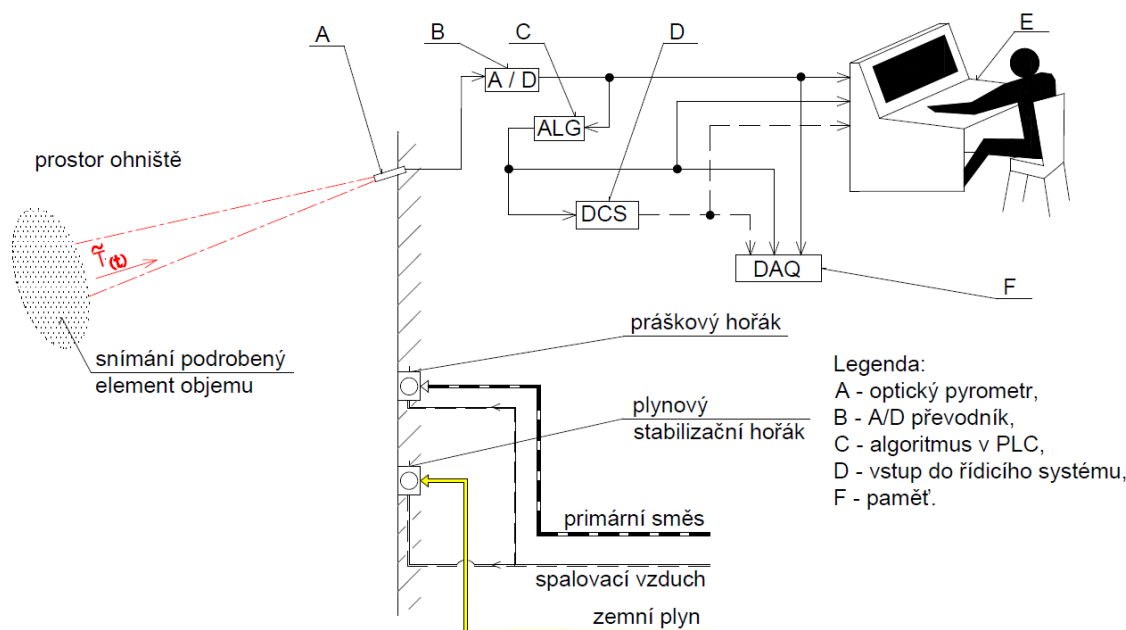
Slovy jej lze interpretovat například následujícím způsobem: „čím výraznější fluktuační tlak  $\tilde{p}$  nebo uvolněného tepla  $\tilde{h}$  v objemovém elementu ohniště  $dV$  za určitý časový úsek  $dt$ , tím je proces méně stabilní“. Na základě Rayleighova kritéria lze usuzovat, že hlavní roli při termoakustické stabilitě spalovacího procesu hrají fluktuační teploty  $\tilde{T}^1$  a fluktuační tlak  $\tilde{p}$ . Pro určení stability spalovacího procesu je nutné monitorovat a vyhodnocovat fluktuační jedné z těchto dvou veličin. Na základě níže uvedených literárních pramenů uvedených dále v textu lze tvrdit, že informace získané z obou signálů jsou lineárně závislé. Z termoakustického hlediska tedy nezáleží na tom, zda bude stabilita spalovacího procesu vyhodnocována z teploty nebo tlaku. Závislostí fluktuační tlaku na frekvenci  $\tilde{p}(f)$ , stejně jako závislostí fluktuační teploty na frekvenci  $\tilde{T}(f)$  během spalování zemního plynu a ropných produktů se zabýval Summers [7]. Summers experimentálním měřením zjistil, že gradient odezvy na změnu podmínek je u obou závislostí řádově stejný. Obdobné experimenty byly provedeny odborníky z ČVUT. Jejich experimenty byly zaměřeny na ohniště tuzemských elektrárenských kotlů spalujících tuzemská tuhá fosilní paliva. Po úvodních experimentech na poloproduktivním spalovacím zařízení na tehdejší ÚVP v Praze –

Michli [8] si vzájemnou závislost ověřili i v praxi (např. na EPRI a EMĚII, jak bylo popsáno ve výzkumné zprávě [9]).

Vyhodnocování stability spalovacího procesu nemá jednoznačně definovaný algoritmus. Způsoby, jakými je popisována kvalitativní charakteristika spalování, vychází z experimentálních měření. Např. na území ČR je stabilita definována v rozsahu  $<0; 100>\%$ , přičemž 100 % signalizuje ideální poměry v kontrolovaném objemu ohniště.<sup>2</sup>

## 2.1. Fluktuační teploty

V následujících odstavcích bude popsán stacionární diagnostický systém pro vyhodnocení stability spalování založený na snímání teploty distribuovaný společností MORE, s.r.o. Řetězec aparatury je na obrázku 3. Vyhodnocování fluktuační teploty je provedeno prostředky matematické statistiky. Z toho plyne požadavek na vysoký vzorkovací kmitočet snímačů teploty. Současně je třeba, aby potenciální snímač splňoval požadavky snadné, nenáročné údržby, byl odolný vůči prachu, dobře snášel vibrace a vyšší teploty. Těmto požadavkům vyhovují např. optické pyrometry.



**Obr. 4** Metodika snímání fluktuační teploty a vyhodnocování stability spalování s vazbou na řídicí systém

**Fig. 4** Measurement of temperature fluctuations and evaluation of combustion stability with a feedback to the control system

A – optický pyrometr, B – A/D převodník, C – algoritmus v PLC, D – vstup do řídicího systému, F – paměť

<sup>1</sup> Fluktuační teploty  $\tilde{T}$  tkví ve fluktuační rozdílu reakčních entalpií  $\tilde{h}$ .

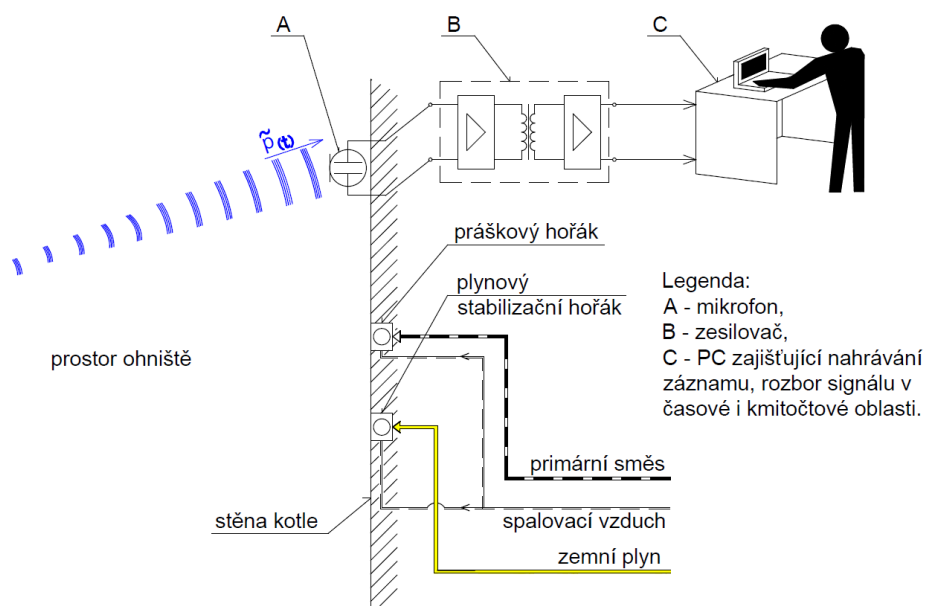
<sup>2</sup> Na některých energetických zdrojích se kvalitativní vlastnosti spalovacího procesu posuzují veličinou nazvanou „nestabilita spalování“. Rozsah této veličiny je opět  $<0;100>\%$ , avšak 0 % signalizuje ideální poměry v kontrolovaném objemu ohniště.

Teplota je snímána sérií optických pyrometrů (snímačů teploty tekutiny v určitém objemu ohniště, pozice A) a výpočetní jednotky (pozice B, C, D), která zpracovává a vyhodnocuje signály. Pyrometry jsou umístěny na stěně ohniště nad úrovní hořákového pásma. Umístění a namíření optiky pyrometru je nutno provést tak, aby v ohništi byl určitý objem tekutiny ohniště ve vztahu ke konkrétnímu práškovému hořáku. Při seřizování optiky pyrometru je nutno zvolit vhodný součinitel relativní emisivity tekutiny, jejíž teplota bude snímána. Lze jej zvolit na základě měření, jehož postup je popsán např. v literatuře [10]. Analogový signál elektrické veličiny je v převodníku (pozice B) převeden na teplotu. Algoritmus výpočtu stability spalování (viz pozice C) je založen na statistickém rozboru nasnímaného signálu každého pyrometru. Systém monitorování stability může být vybaven rozhodovací logikou (pozice D). V bloku automatického rozhodování je v komparátoru porovnává hladina automatického rozhodování s referenční hodnotou. Dojde-li ke snížení stability spalování pod určitou mez, dojde k:

- upozornění operátora výrobního bloku (pozice E),

- reakci automatického rozhodování.

Výstupem automatického rozhodování je série binárních signálů. Na základě určitého snížení stability spalování může být do řídicího systému poslán binární signál, který zapálí kombinaci plynových stabilizačních hořáků (dále jen PSH). Děje se tak na základě předpokladu, že po najetí PSH se fluktuace výše popsaných veličin zatlmí, čímž dojde ke zvýšení stability spalování. Při významném snížení stability spalování dojde k automatickému zablokování najetí PSH. Důvodem je riziko spočívající v tom, že se v ohništi během snížení stability spalování nahromadilo palivo a okysličovadlo, které díky poklesu teploty v ohništi pod zápalnou teplotu nevyhořelo a zapálení PSH by mohlo iniciovat výbuch. Dojde-li k ještě významnějšímu snížení stability spalování, dojde k automatickému odstavení kotle a automatickému několikanásobnému provětrání objemu ohniště. Po úspěšném ukončení provětrávání ohniště jsou PSH uvolněny pro zapálení. Toto automatické rozhodování může vést k významnému zvýšení bezpečnosti provozovaných spalovacích zařízení.



**Obr. 5** Metodika použitá pro snímání fluktuace tlaku

**Fig. 5** Methodology of pressure fluctuations measurement

A – microphone, B – amplifier, C – PC for data acquisition and analysis in time and frequency domain

## 2.2. Fluktuace tlaku

Zatímco diagnostické systémy vyhodnocování stability spalování založené na snímání teploty v ohništi jsou jak v ČR, tak i v zahraničí velmi rozšířené, aplikace aparátů založených na snímání tlaku je podstatně méně. Příkladem těchto aparátů může být systém distribuovaný společností Emerson Process Management (resp. její dceřině společnosti Rosemount) viz [11]. Obecně v případě vyhodnocování fluktuací tlaku se nabízí rozbor v časové a kmitočtové oblasti.

Rozbor v časové oblasti je zaměřen na odhalení nízkofrekvenčních kmitů, které jsou více nebezpečné, neboť

mohou vést až ke zhasnutí kotle. Takový rozbor lze provést na velině nahlédnutím do grafického prostředí řídicího systému, který umožňuje sledovat grafické průběhy snímaných veličin v čase. Vzorkovací kmitočet zobrazovaných signálů bude řádově 1 až 10 sekund, nicméně pro sledování nízkofrekvenčních kmitů tyto podmínky vyhovují.

Naproti tomu rozbor v kmitočtové oblasti je podmíněn vysokým vzorkovacím kmitočtem. Ten je třeba zvolit podle Nyquistova teorému v souladu s kmitočty, které jsou předmětem zájmu. Samotné vyhodnocení se provede prostředky Fourierovy transformace, což lze dnes

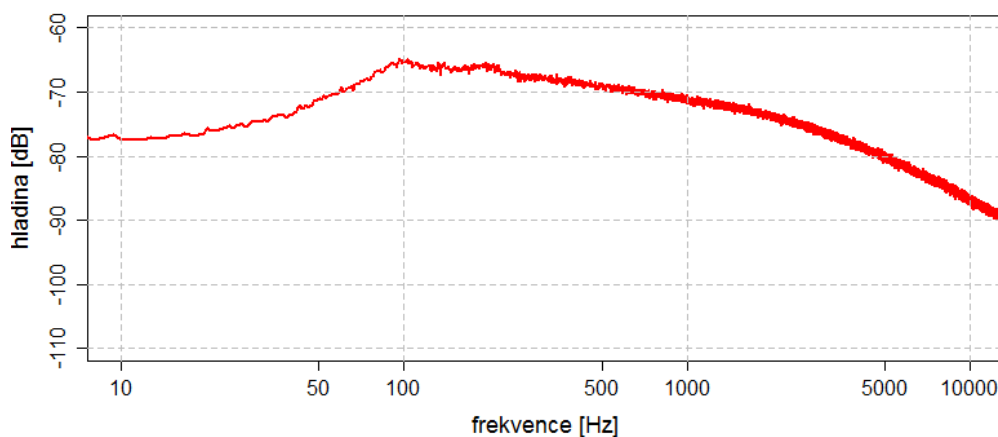
řešit řadou softwarů. Nevýhodou rozboru v kmitočtové oblasti je nemožnost sledování vývoje v reálném čase. Výsledky rozboru v kmitočtové oblasti lze využít spíše k vyhodnocování opotřebení vybraných dílů, případně odhalení jejich nevhodného návrhu.

Příklad rozboru tlakové fluktuace v kmitočtové oblasti je v literatuře [12, 13]. Autoři zde prezentují měřením zjištěné intenzivní fluktuace. Následně provedou doporučení na provedení konstrukčních úprav vedoucí ke zvýšení stability spalování. Po realizaci konstrukčních úprav měřením potvrzují správnost svých předpokladů – intenzita fluktuací se snížila.

### 3. Snímání a vyhodnocení tlakové fluktuace

Na jednom z komplexně obnovených bloků Elektrárny Průněřov II byly experimentálně snímány fluktuace tlaku. Měřicí/vyhodnocovací řetězec je na obrázku 4.

Pozice A reprezentuje snímač tlaku, v tomto případě kondenzátorový mikrofon. Nutno dodat, že interval kmitočtů, na němž je odchylka hladiny garantovaná výrobcem menší než 3dB je  $\langle 20, 22000 \rangle$  Hz. Vzhledem k tomu, že použitý mikrofon není přímo určen pro měřicí účely, byl v audiovizuální laboratoři katedry radioelektroniky FEL ČVUT komparativně kalibrován, čímž vznikla korekční křivka. Následující obrázky spekter jsou již po korekci. Získané výsledky jsou reprezentativní na intervalu kmitočtů  $\langle 30, 5000 \rangle$  Hz. Mikrofonem naměřená elektrická veličina je převedena na hladinu akustického tlaku a zesílena v zesilovači (pozice B). Signál v digitální formě je přenášen do PC (pozice C), kde je nahrávka ukládána a ex-post vyhodnocena softwarem. Ilustrační příklad závislosti hladiny akustického tlaku na kmitočtu je na obrázku 6.



**Obr. 6** Ilustrační příklad grafického výstupu spektrální analýzy reprezentativní nahrávky hluku v ohništi  
**Fig. 6** Output of spectral analysis of a noise recorded in the combustion chamber

#### 3.1. Hodnocení výsledků spektrální analýzy

Z obrázku je patrné nevýrazné absolutní maximum hladiny na úrovni  $\sim 110$  Hz. Tento kmitočet zhruba odpovídá transportu primární směsi ventilátorovým mlýnem. Mlecí kolo ventilátorového mlýna je vybaveno 12ti mlecími deskami a mlecí kolo v době snímání rotovalo otáčkami  $560 \text{ min}^{-1}$ . Kmitočet tlakové pulzace primární směsi vystupující z mlýna je tedy přibližně 112 Hz. Lokální maximum na intervalu  $\langle 20, 30 \rangle$  Hz může poukazovat na vlastní kmity charakteristických rozměrů kavity ohniště. Vzhledem k tomu, že se toto lokální maximum nalézá blízko hranice kalibrovaného intervalu kmitočtů, je třeba brát tento údaj s rezervou. Tvar spektra svým charakterem a trendy odpovídá spektru emitovaném při rozpadu vírových struktur různé velikosti, k čemuž reálně v ohništi dochází.

Analýzou záznamu hluku ohniště lze odhalit nebezpečné pulzace, např. periodickou diskontinuitu ventilace mlýna, tzv. přimílání mlýna. To může vést k poklesu stability spalování (pulzace o kmitočtech řádově  $10^{-1}$  až  $10^0$  Hz). Tyto nízkofrekvenční kmity je snazší hodnotit spíše na základě rozboru v časové oblasti než kmitočtové.

Ilustračním případem tohoto druhu byl kotel elektrárny Ptolemais v Řecku [14]. Po aplikaci denitrifikačních opatření (spojené s výměnou mlýnů) nebylo možno jej provozovat. Důvodem byly nepřiměřené fluktuace termoakustických veličin, které svými projevy budily pulzování tepelného výkonu uvolněného v ohništi, potažmo tepelný výkon předaný paro-vodnímu traktu kotle. V závislosti na pulzech těchto dvou veličin došlo k rozkmitu většiny akčních členů, jako jsou polohy klapky vzducho-spalinového traktu. Jiným příkladem aplikace může být analýza chvění ventilátoru, které nastane zpravidla při nedodržení technologické kázně výroby nebo montážního postupu. Eventuálně lze rozbořem v kmitočtové oblasti zjistit rezonanci objemu tekutiny v kavitě na bázi Helmholtzova rezonátoru.

### 4. Závěr

Snímání hluku v ohništi a jeho následný rozbor v kmitočtové oblasti bývá používán např. při podezření na nevhodný provoz mlecích okruhů s přímým foukáním uhelného prášku nebo nevhodný koncept ohniště.

Nicméně tuzemské kotle, které prošly komplexní obnovou, těmito provozními potížemi zjevně netrpí.

### Poděkování

Práce byla realizována se souhlasem managementu ČEZ, a.s. a MORE, s.r.o.

### Literatura

1. Reeves, W.L.: How to Destroy a Boiler – Part 1. Bulletin of The National Board of boiler & pressure vessel inspectors, Vol. 1 (winter) / 1999.
2. Bragg, S.L.: Combustion noise, Journal of the Institute of Fuel, 36, 1963, page 12- 16.
3. Strutt, J.W.: The Theory of Sound, McMillan&CO., London, 1877.
4. Seebold, J.G.: Combustion-Driven Oscillation in Process Heaters. IFRF Combustion Journal, 2005, Article number 200507, ISSN 1562-479X.
5. Černý, V., Karták, J., Hrdlička, F.: Výzkumná zpráva č.: Z 344/84, Procesové charakteristiky ohnišť parních kotlů (IV.), 1984, Katedra tepelných a jaderných energetických zařízení při strojní fakultě ČVUT.
6. Putnam, A. A.: Combustion Driven Oscillations in Industry, Elsevier Pub. Co., New York, 1971.
7. Summers, I.R.: Combustion noise – Measurements on single oil drops and other diffusion flames. Applied acoustics, Vol. 13/1980, No.6, 1980, page 441-448.
8. Černý, V., Karták, J., Hrdlička, F.: Výzkumná zpráva č.: Z 344/84, Procesové charakteristiky ohnišť parních kotlů (IV.), 1984, Katedra tepelných a jaderných energetických zařízení při strojní fakultě ČVUT.
9. Hrdlička, F.: Výzkumná zpráva č.: Z 376/86, Měření stability hoření, 1986, Katedra tepelných a jaderných energetických zařízení při strojní fakultě ČVUT.
10. Zadání úlohy [online]. Studijní podklady VŠB-TUO [vid. 30.12.2014]. Dostupné z: <http://if.vsb.cz/Studium/FAST/Studium4/uloha10.pdf>
11. Miller, P.J.: Furnace flames instability detection with advanced pressure diagnostics [online]. Web společnosti Emerson Process Management [vid. 13.5.2015]. Dostupné: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/pm%20rose-mount%20documents/00840-0500-4801.pdf>
12. Propagační materiály: Flame instability (combustion-driven oscillation) mitigation [online]. Web společnosti DEICON [vid. 1.4.2015]. Dostupné: [http://www.deicon.com/wp-content/uploads/2014/11/FLAME\\_INSTABILITY-1.pdf](http://www.deicon.com/wp-content/uploads/2014/11/FLAME_INSTABILITY-1.pdf)
13. Propagační materiály: Mitigating combustion-driven oscillation (Thermoacoustic instability) in industrial combustors [online]. Web společnosti DEICON [vid. 19.3.2015]. Dostupné: [http://www.deicon.com/wp-content/uploads/2014/02/combustion\\_driven\\_oscillation\\_mitigation.pdf](http://www.deicon.com/wp-content/uploads/2014/02/combustion_driven_oscillation_mitigation.pdf)

14. Eric, D.M.; Cvetnovic, B.D.; Stefanovic, L.P.; Radovanovic, M.P.; Zivkovic V.N.: Investigation of pressure pulsations in the furnace and flue gas tract of the pulverized coal combustion utility boiler. Thermal Science, 2010, Vol. 14, No. 1, pp. 261-270.
15. Talanda, M. Sýkora, J.: Systém sledování stability hoření – ochrana kotle a zefektivnění spalovacího procesu. Sborník konference Kotle a energetická zařízení 2013. Brno, 2013.

### Summary

*Petr Štěpánek*

#### *The measurement of fluctuation of pressure in furnace of pulverized coal-fired boiler*

In the USA, explosion/burning of fuel is the most frequent accident occurring upon furnace operation, that may cause injuries to personnel and financial losses. In most cases, coal dust explode inside mills or piping. The second most frequent case is an explosion inside a boiler furnace during local increase of thermoacoustic instability. Methods of thermoacoustic measurement and diagnostics in thermal powerplants are presented in the article.