## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2019

Jiří Klimeš



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## **GRANULOMETRIE PEVNÝCH ČÁSTIC**

**GRANULOMETRY OF SOLID PARTICLES** 

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE AUTHOR Jiří Klimeš

VEDOUCÍ PRÁCE SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

**BRNO 2019** 



## Bakalářská práce

bakalářský studijní obor Automatizační a měřicí technika

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Jiří Klimeš Ročník: 3 *ID:* 197716 *Akademický rok:* 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

#### Granulometrie pevných částic

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je ověření metody pro online odhad granulometrie pevných částic v průtokovém kanále. Zadání práce lze rozdělit do následujících bodů:

1. Zpracujte rešerši týkající se problematiky online měření granulometrie pevných částic.

 Ověřte vhodnost snímače založeného na měření akustických projevů pohybujících se částic při jejich nárazu na překážku porovnáním s procesními veličinami.

3. Proveďte základní měření, navrhněte a ověřte metody zpracování signálu ve frekvenční a časové oblasti.

4. Diskutujte dosažené výsledky.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

DALLY, J.W., RILEY, W.F. - Instrumentation for Engineering Measurements. John Wiley and Sons, New York, 1993.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 20.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D. Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc. předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá měřením hrubosti proudícího granulátu v realném čase pomocí snímačů pracujících na principu akustické emise. Práce je konkrétně zaměřená na měření hrubosti uhlí v tepelných elektrárnách. V práci je představena série metod v časové a frekvenční oblasti popisujících granulometrii materiálu. V druhé části práce byl proveden experiment s určováním parametrů pro referenční vzorky granulátu. Třetí částí práce je hledání korelací mezi získanými parametry ze záznamů z granulometrů instalovaných v tepelné elektrárně a procesními veličinami týkajícími se přípravy paliva.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Granulometrie, měření granulometrie v reálném čase, měření průtoku paliva, průtok dvoufázového média, hrubost uhlí

### ABSTRACT

This bachelor thesis deals with a real-time granulometry measurement of granulate flow with acoustic emission sensors. Thesis is focused on coal granulometry measurement in thermal power stations. Parameters were introduced in time and frequency domain describing the granulometry of measured medium. The second part is focused on granulometry measurement experiment. Parameters were calculated for reference samples of material and they were evaluated. Third part of this thesis deals with finding correlations between process variables and selected parameters

### **KEYWORDS**

Granulometry, real time granulometry measurement, fuel flow measurement, two-phase medium flow, coal granulometry

KLIMEŠ, Jiří. *Granulometrie pevných částic*. Brno, 2019, 46 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Vysázeno pomocí balíčku thesis verze 3.03; http://latex.feec.vutbr.cz

### PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma "Granulometrie pevných částic" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu semestrální práce panu doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D., za odborné vedení, konzultace a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora

## Obsah

Ú	vod 1			10	
1	Teo	reticka	á část bakalářské práce	12	
	1.1	Použí	vané metody měření granulometrie	12	
		1.1.1	Prosévací zkouška	12	
		1.1.2	Měření granulometrie pomocí optických snímačů	12	
		1.1.3	Elektrostatické snímače hrubosti paliva	12	
	1.2	Konst	rukce měřicího zařízení	13	
		1.2.1	Mechanická část měřicího zařízení	13	
		1.2.2	Elektronická část měřicího zařízení	13	
	1.3	Metoo	ly zpracování zvukového signálu	14	
		1.3.1	Časová oblast	14	
		1.3.2	Frekvenční oblast	17	
	1.4	Metoo	ly stanovení korelací signálů	18	
<b>2</b>	Výs	ledky	bakalářské práce	19	
	2.1	Paran	netry signálu ve časové oblasti	19	
		2.1.1	Střední hodnota	19	
		2.1.2	Efektivní hodnota	19	
		2.1.3	Variační koeficient	21	
		2.1.4	Šikmost a špičatost	22	
		2.1.5	Crest faktor	23	
		2.1.6	Rozptyl a směrodatná odchylka	23	
		2.1.7	Analýza impulzní akustické emise	23	
	2.2 Parametry signálu ve frekvenční oblasti				
	2.3	Měřer	ní granulometrie pro referenční vzorky granulátu	30	
	2.4	Korela	ace parametrů signálu s procesními veličinami	36	
3	Záv	ěr		40	
Li	terat	ura		42	
$\mathbf{Se}$	znar	n přílo	bh	43	
٨	Oh	h nži	leženého souhomu		
A	xkli	me43_	_granulometrie.zip	44	
в	Výŀ	Výkres měřicí soustavy			

### C Snímač Schaller

## Seznam obrázků

1.1	Konstrukce měřicí soustavy	13
1.2	Blokové schéma měřicí soustavy	14
1.3	Koeficient šikmosti	15
1.4	Koeficient špičatosti	16
1.5	Parametry impulzní akustické emise	17
2.1	Zobrazení zvukových záznamů	19
2.2	Střední hodnota signálů	20
2.3	Efektivní hodnota signálů	20
2.4	Variační koeficient signálů	21
2.5	$\check{S}ikmost\ sign\acute{a}l\mathring{u}\ \ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ $	22
2.6	Špičatost signálů	22
2.7	Určení Crest faktoru signálů	23
2.8	Určení rozptylu signálů	24
2.9	Určení směrodatná odchylka signálů	24
2.10	Impulzní charakter signálu MO41	25
2.11	Spojitý charakter signálu MO44	25
2.12	Obálka signálu	26
2.13	Výpočet efektivní hodnoty signálu v intervalech	27
2.14	Histogram energetických špiček	27
2.15	Zesílení frekvencí v oblasti 9 kHz	29
2.16	Frekvenční charakteristika snímače	29
2.17	Uspořádání testovací soustavy	32
2.18	Piezoelektrický podavač granulátu	32
2.19	Zobrazení vybraných testovacích testovacích záznamů	33
2.20	Efektivní hodnota testovacích záznamů	33
2.21	Variační koeficient testovacích záznamů	34
2.22	Histogram energetických špiček	34
2.23	Frekvenční charakteristika záznamu nejjemnější frakce	35
2.24	Frekvenční charakteristika záznamu nejhrubší frakce	36
2.25	Výkon signálu ve frekvenčních pásmech	36
2.26	Korelace efektivní hodnoty s průtokem primárního vzduchu	37
2.27	Porovnání efektivní hodnoty signálu a průtoku primárního vzduchu .	38
2.28	Srovnání efektivní hodnoty signálu a variačního koeficientu	38
B.1	Výkres měřicí soustavy	45
C.1	Snímač Schaller	46

## Seznam tabulek

2.1 Poměr výkonů ve frekvenčních pásmech 0-4 kHz a 8-12 kHz . . . . . 35

## Úvod

Jedním ze základních procesů v tepelných elektrárnách je příprava paliva, hnědého uhlí. Příprava probíhá ve dvou fázích. Nejdříve uhlí projde sušicí komorou, kde se vlivem vysoké teploty uhlí zbaví přebytečné vlhkosti a následně je rozemleto na velmi jemný prach (částice o velikosti 0,5-0,01 mm) v uhelných mlýnech. Jemné částice uhelného prachu jsou z mlýna vynášeny proudem vzduchu práškovody do spalovací komory a hrubé částice, které proud vzduchu nevynese, zůstávají v mlýnu a dále se melou.

Při požadavku na zvýšení výkonu kotle se zvýší průtok vzduchu a z mlýnu je vyneseno větší možství paliva. Tím se mlýn uvolní ze zátěže, čímž klesne jeho proudový odběr. Systém regulace množství uhlí v mlýnu je nastavený na regulaci na konstantní proudový odběr. Následně tedy dojde ke zvýšení otáček podavače a do mlýnu je dodáno uhlí tak, aby se mlýn dostal do zátěže a vyreguloval tím pokles v proudovém odběru. Analogicky při požadavku na snížení výkonu kotle je průtok vzduchu nižší, tím pádem množství vynášeného uhlí je menší, mlýn se dostane do zátěže a sníží se otáčky podavače.

Z tohoto principu je zřejmé, že hrubost vynášeného uhelného prachu není v žádném kroku přípravy předmětem regulace avšak hrubost uhlí má zásadní vliv nejen na kvalitu spalování, ale i na plynulý chod celého systému dodávání uhlí (zanášení práškovodu velkými částicemi). Můžeme se domnívat, že při zvýšení průtoku vzduchu je z mlýnu vynášena mimo jemnou složku rozemletého uhlí i hrubší složka, naopak při snížení průtoku vzduchu je vynášena pouze jemná složka.

V praxi však nebylo možné tyto domněnky směrodatně potvrdit či vyvrátit. Jednou z možností, jak stanovit hrubost uhelného prachu je provedení prosévací zkoušky, která však nenabízí real-time vyhodnocení hrubosti a její provedení je často problematické. Další možností je určení hrubosti uhelného prachu pomoci laserového granulometru, jehož pořizovací cena je však příliš vysoká, řádově miliony korun za jedno měřicí zařízení. Osazení takového měřicího zařízení při čtyřek práškovodech na jeden kotel je nereálné.

Perspektivní metoda pro měření hrubosti částic je měření hrubosti pomocí akustické emise. Princip metody spočívá v umístění akustického snímače do prostředí proudících částic a analyzování získaného akustického signálu. Toto téma bylo zpracováno v článku [1] Measurement of Particle Size Distribution by the Use of Acoustic Emission Method, kde bylo potvrzeno, na základě Hertzovy teorie kontaktu, že dopad dvou různě velkých částic stejného materiálu pohybujících se stejnou rychlostí na kmitavý nosník způsobuje vybuzení kmitů o různých frekvencích a různých amplitudách. Ze získaného akustického signálu by tedy mělo být možné provést odhad hrubosti měřeného média. Měřicí zařízení pro tuto metodu bylo sestaveno a je možné získat zvukový signál pro stanovení odhadu hrubosti. Cílem této práce je tedy představení série metod pro určení parametrů získaného zvukového signálu. Následně bude posouzeno, která z metod má největší vypovídající hodnotu při měření granulometrie částic v práškovodu při realizaci metody ve stávajícím hardwaru a bude posouzeno, zda-li existují metody, které lépe popisují granulometrii částic pro jejichž realizaci by bylo nutné navrhnout hardware nový, popř. navrhnout novou konstrukci snímače. Bude vyjádřena korelace pro nalezení závislostí mezi granulometrií a procesními veličinami.

## 1 Teoretická část bakalářské práce

## 1.1 Používané metody měření granulometrie

### 1.1.1 Prosévací zkouška

Prosévací zkouška je metoda stanovení granulometrie (dále označované také jako hrubost), kdy je vzorek materiálu prosit skrz několik sít postupně o větší jemnosti. Z množství jednotlivých frakcí je poté možné sestavit rozsevovou křivku, která popisuje četnost částic v závislosti na jejich velikosti. Je to metoda časově náročná, samotné získání uhelného vzorku je složité, především kvůli náročným pracovním podmínkám v okolí spalovací komory, a je téměř nemožné s ní popsat vývoj hrubosti uhelného prachu v čase.

### 1.1.2 Měření granulometrie pomocí optických snímačů

Existují snímače měřící granulometrii uhlí opticky. Granulometrií paliva v tepelných elektrárnách se zabývá firma EUTech. Tato firma vyvinula měřicí zařízení EUcoalsizer, který pomocí laseru a optovláknových detektorů a měření doby průchodu částice sledovanou štěrbinou, dokáže určit velikost a rychlost procházející částice. Systém je schopný detekovat částice o velikosti od 20  $\mu m$  až 4 mm v rychlostech do 50  $ms^{-1}$ . Díky měření rychlosti proudění a velikosti proudících částic může být vypočten i hmotnostní průtok paliva nebo poměr vzduchu a paliva AFR (air-fuel ratio). Princip je popsán ve zprávě z konference Power-Gen 2008 [5], dostupné na stránkách firmy EUTech. Jednoznačnou nevýhodou je cena zařízení pohybující se v řádech milionů korun. Velkým úspěchem by bylo získat podobné výsledky s pomocí akustického granulometru.

### 1.1.3 Elektrostatické snímače hrubosti paliva

Existují snímače průtoku paliva na principu měření elektrostatického náboje nashromážděného na stěnách proudícího kanálu. Tento typ snímačů je většinou používán pouze pro měření celkového průtoku paliva měřeným kanálem. Existuje varianta snímače, kdy médium proudí skrz dvě kolena lišící se v poloměru ohybu. V obou kolenech je umístěn snímač náboje. Těžší částice budou v kolenu vynášeny více k okraji kanálu, což se projeví na nashromážděném náboji. Z nábojů lze potom spočítat velikost proudících částic.

## 1.2 Konstrukce měřicího zařízení

### 1.2.1 Mechanická část měřicího zařízení

Výkres mechanické části je přiložen v příloze B.1. Snímací plocha je se snímačem spojena kovovým nosníkem usazeným na gumových těsněních ve stínící trubici v koaxiálním uspořádání. Soustava je vybavena objímkou pro instalaci měřicí sondy do práškovodu. Elektronika snímače je umístěna v krabici na konci měřicí soustavy.



Obr. 1.1: Konstrukce měřicí soustavy

### 1.2.2 Elektronická část měřicího zařízení

Blokové schéma měřicího zařízení je zobrazeno v obr. 1.2.2. Jako měřicí snímač je použit piezoelektrický snímač Schaller Oyster S/S Passive Internal Mount Piezo Pickup. Signál ze snímače prochází nejdříve hardwarově řízeným zesilovačem a následně softwarově řízeným zesilovačem. Pro získávání signálu pro analýzu je vyveden výstup za hardwarově řízeným zesilovačem, aby nedocházelo k ovlivňování absolutní hodnoty signálu. Jako výpočetní jednotka je použit mikroprocesor ATmega328. Jedná se o 8bitový mikročip od firmy Atmel. Výpočetní výkon mikroprocesoru je 20 MIPS při 20 MHz.



Obr. 1.2: Blokové schéma měřicí soustavy

## 1.3 Metody zpracování zvukového signálu

### 1.3.1 Časová oblast

Parametry signálu získané z časové oblasti jsou z hlediska náročnosti na výpočetní výkon výhodnější.

#### Střední hodnota

Obecně je střední hodnota diskrétního signálu určena vztahem

$$S(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i$$
 (1.1)

kde N je počet vzorků.

Při použití obecného vztahu pro výpočet střední hodnoty signálu se S blíží nule, protože nárazem vyvolaný impulz tlumeně symetricky kmitá kolem nuly. Proto je pro výpočet parametru použita absolutní hodnota získaného signálu. Parametr je tedy určen vztahem

$$S(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |x_i|$$
(1.2)

Pro výpočet dalších statistických parametrů signálu je použita střední hodnota určená vztahem 1.1, vzhledem k významu parametru ve vzorci.

#### Efektivní hodnota

Efektivní hodnota diskrétního signálu je určena vztahem

$$E(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i^2}$$
(1.3)

kdeNje počet vzorků.

#### Variační koeficient

Variační koeficient určuje míru variability rozdělení hodnot v určitém souboru dat. Variační koeficient je určen vztahem

$$V(x) = \frac{s_x}{\overline{x}} \tag{1.4}$$

kde $\boldsymbol{s}_{\boldsymbol{x}}$ je směrodatná odchylka signálu určená vztahem

$$s_x(x) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \overline{x})^2}$$
(1.5)

kde  $\overline{x}$  je střední hodnota signálu a N je počet vzorků.

#### Šikmost

Koeficient šikmosti určuje kterým směrem je soubor dat rozložený v porovnání s Gaussovým rozložením.



Obr. 1.3: Koeficient šikmosti

Šikmost je určena vztahem

$$\gamma_1(x) = \frac{\mu_3(x)}{\sigma(x)^3} = \frac{\mu_3(x)}{\mu_2(x)^{\frac{3}{2}}} \tag{1.6}$$

kde $\mu_k$ je k-tý centrální moment určený vztahem

$$\mu_k(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \overline{x})^k$$
(1.7)

kde k je řád momentu a N počet vzorků.



Obr. 1.4: Koeficient špičatosti

#### Špičatost

Koeficient špičatosti určuje míru zastoupení vysoce a nízko četných hodnot v porovnání s Gaussovým rozložením. Špičatost je určena vztahem

$$\gamma_2(x) = \frac{\mu_4(x)}{\sigma(x)^4} - 3 = \frac{\mu_4(x)}{\mu_2(x)^2} - 3 \tag{1.8}$$

kde  $\mu_k$ je k-tý centrální moment určený podle vztahu 1.7.

#### Rozptyl

Rozptyl udává, jak moc jsou v daném souboru dat hodnoty rozptýleny.

$$R(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \overline{x})^2$$
(1.9)

kde N je počet vzorků a  $\overline{x}$ je střední hodnota signálu.

#### Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka udává, jak moc se v daném souboru dat hodnoty typicky liší.

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \overline{x})^2}$$
(1.10)

kde N je počet vzorků a  $\overline{x}$  je střední hodnota signálu.

#### Crest faktor

Crest faktor porovnává maximální hodnotu signálu vůči efektivní hodnotě signálu, čímž vyjadřuje jak výrazná jsou maxima v signálu. Crest faktor je určen vztahem

$$C(x) = \frac{x_{max}}{E(x)} \tag{1.11}$$

kde  $x_{max}$  je maximální hodnota v signálu a E(x) je efektivní hodnota signálu.

#### Analýza impulzní akustické emise

Pokud při zobrazení signálu z měřicího zařízení můžeme rozpoznat jednotlivé nárazy, tedy

$$t_{utlum} << (t_{i+1} - t_i) \tag{1.12}$$

můžeme akustickou emisi považovat za impulzní. Opakem impulzní emise je emise spojitá, kde

$$t_{utlum} >= (t_{i+1} - t_i) \tag{1.13}$$



Obr. 1.5: Parametry impulzní akustické emise

Při analýze impulzní emise může být využito možnosti popsat jednotlivé nárazy různými parametry. Nejvýznamnější parametry impulzní emise jsou čas trvání události, maximální hodnota, doba nebo strmost náběhu, počet překmitů a celková energie, viz obr. 1.5. Všechny tyto parametry však přímo závisí na určení prahové úrovně, vůči které je porovnáván signál a na základě porovnání je vyhodnoceno, zda-li se jedná o pulz. Pokud by prahová úroveň byla nastavená příliš nízko, do výsledných hodnoty by byly započítávány i parametry šumu.

### 1.3.2 Frekvenční oblast

Pro analýzu ve frekvenční oblasti předpokládáme, na základě Hertzovy teorie nárazu, že při předpokladu, že se částice dopadající na měřicí sondu pohybují stejnou rychlostí, hmotnější částice způsobí větší výchylku měřicí sondy, čímž vyvolá kmit o nižší frekvenci než částice méně hmotná. Toto téma bylo ověřeno v článku [1] Measurement of Particle Size Distribution by the Use of Acoustic Emission Method.

#### Oktávová analýza

Frekvenční spektrum můžeme rozdělit do tzv. oktáv. Oktávy jsou intervaly ve frekvenční oblasti pro které platí

$$\frac{f_{i+1}}{f_i} = 2 \tag{1.14}$$

Při oktávové analýze jsou určovány výkony v jednotlivých oktávách. Určený výkon může být jako parametr vzatý absolutně, nebo může být porovnaný vůči absolutnímu výkonu signálu, nebo výkonu v jiné oktávě. Výhodou takového poměru může být větší citlivost na změnu hrubosti. Nevýhodou je ztráta informace o absolutním výkonu. Oktáva může být popsána frekvencí vypočtenou jako

$$f_m = \sqrt{f_i f_{i+1}} \tag{1.15}$$

### 1.4 Metody stanovení korelací signálů

Při určování vzájemné závislosti dvou signálů hovoříme o korelaci. Posouzení závislosti procesní veličiny na výstupním parametru granulometru provádíme vyčíslením korelačního koeficientu, který určuje lineární závislost mezi signály X a Y.

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2 \sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y})^2}}$$
(1.16)

Korelační koeficient může nabývat hodnot v intervalu  $k \in (-1, 1)$ . Pro koeficienty s hodnotou |k| > 0.6 můžeme hovořit o vysoké míře závislosti mezi jednotlivými signály.

Při určování korelací mezi dvěma signály, mezi kterými je určité zpoždění, hovoříme o vzájemné korelaci (cross-correlation). Korelace v případě, že změna signálu X se projeví na signálu Y s určitým časovým zpožděním hledáme tak, že se signály vůči sobě posouvají a při každém posunutí signálu je vypočten korelační koeficient. Takto dostaneme závislost korelace na posunutí signálu a jde v podstatě o hledání maxima v této závislosti.

Exaktní přístup k věci však není vždy správnou cestou. V případě vysoce zašuměných signálů korelační koeficient v určitých případech vychází vyšší i přesto, že dané signály spolu souviset nemohou anebo z optického posouzení signálů je zjevné, že vyšší míra korelace je spíše náhodným jevem. Proto je nutné korelace přímo porovnat vykreslením signálů.

## 2 Výsledky bakalářské práce

## 2.1 Parametry signálu ve časové oblasti

Pro zpracování příznaků byly nahrány čtyři zvukové záznamy, o délce přibližně čtyři minuty. Záznamy pocházejí ze čtyřech různých práškovodů a jsou zaznamenány v různém čase. Ze změřených signálů můžeme odhadnout časovou konstantu změny hrubosti v práškovodu. Časová konstanta byla odhadnuta na 20 s. S touto periodou je dále pracováno, v grafech je označena jako sample window, a vyjadřuje časové okno, ve kterém byl daný parametr určován a následně byl vynesen jako bod do grafu. Procesní veličiny, při kterých byly záznamy pořízeny, jsou uvedeny v tabulce



Obr. 2.1: Zobrazení zvukových záznamů

### 2.1.1 Střední hodnota

Střední hodnota signálu byla určena podle vztahu 1.2. Výpočet byl realizován v programu MATLAB ve funkci GStredH.m, viz A. Graf vypočítaných středních hodnot pro čtyři zvukové signály je uveden v grafu č. 2.2.

### 2.1.2 Efektivní hodnota

Efektivní hodnota signálu byla určena podle vztahu 1.3. Výpočet byl realizován v programu MATLAB ve funkci GEfektH.m, viz A. Graf vypočítaných efektivních hodnot pro čtyři zvukové signály je uveden v grafu č. 2.3.



Obr. 2.2: Střední hodnota signálů



Obr. 2.3: Efektivní hodnota signálů

Při porovnání efektivní a střední hodnoty signálu je zřejmé, že oba parametry jsou velmi podobné. Rozdílem mezi dvěma parametry je, že efektivní hodnota zesiluje výrazné signály, na druhou stranu tím v podstatě potlačuje malé nárazy. Proto se signály MO11 a MO12 v efektivní hodnotě překrývají. Při porovnání signálů MO11 a MO12 je zřejmé, že signál MO12 je méně výrazný a bylo by dobré, aby to parametr postihoval. Proto bychom mohli konstatovat, že střední hodnota v tomto případě lépe vystihuje výraznost signálu.

Problematická je dvojí reprezentace těchto parametrů, podobně jako všech ostatních jedno číselných parametrů. Pokud se zvýší efektivní/střední hodnota signálu, může se tak dít kvůli nárůstu počtu malých částic nebo nárůstu velikosti částic. Pokud však budeme předpokládat, že v každém čase můžeme u letících částic určit střední velikost, šířka rozložení částic bude přibližně konstantní a při změně hrubosti se změní střední velikost částice a šířka rozložení zůstane přibližně stejná, můžeme předpokládat, že změna v efektivní hodnotě signálu byla způsobena změnou hrubosti, nikoli nárůstu počtu letících částic. Tuto úvahu by bylo možné ověřit dlouhodobým měřením. Pokud by se časem (například kvůli opotřebení mlýnských kamenů) změnila efektivní hodnota výstupního signálu při určeném referenčním průtoku primárního vzduchu, bylo by zřejmé, že změna je způsobena změnou hrubosti uhlí.

#### 2.1.3 Variační koeficient

Výpočet variačního koeficientu byl realizován v programu MATLAB ve funkci GV-Koef.m, viz A. Určení variačního koeficientu bylo realizováno v praxi. Pokud na senzor dopadají hrubé částice, zvětší se sice směrodatná odchylka signálu, ale podstatně se zvětšuje střední hodnota signálu, proto ve výsledku variační koeficient klesá. Tento jev byl pozorován při měření parametru v praxi. Celkově jsou hodnoty variačního koeficientu pro různé signály velmi neměnné a pro různé práškovody podobné. Takovýto výsledek by mohl znamenat, že pokud je zvýšen průtok primárního vzduchu mlýnem, je vynášeno větší množství paliva, a variační koeficient signálu zůstává stejný, dojde ve směsi k nárůstu počtu velkých částic úměrně se zvýšením střední hodnoty signálu kvůli malým částicím. To znamená, že pokud se zvýší průtok primárního vzduchu, dojde z nárůstu počtu velkých částic ve směsi.



Obr. 2.4: Variační koeficient signálů

### 2.1.4 Šikmost a špičatost

Byly určeny parametry šikmost a špičatost pro získané signály. Výpočet byl realizován v programu MATLAB ve funkci GSikmost.m a GSpicatost.m, viz A. Výsledek při určení šikmosti byl předpokládaný. Rozložení vzorků je symetrické, proto se koeficienty šikmosti blíží nule. Hodnoty při určení špičatosti byly malé, kladné, což znamená, že se v signálu vyskytuje malé množství výrazných impulzů. Čím menší je koeficient špičatosti, tím více je v signálu výrazných impulzů. Při malém absolutním počtu pulzů však koeficient prudce narůstá, což by mohlo být nežádoucí.



Obr. 2.5: Šikmost signálů



Obr. 2.6: Špičatost signálů

### 2.1.5 Crest faktor

Výpočet byl realizován v programu MATLAB ve funkci GCrest.m, viz A. Nevýhodou Crest faktoru je jeho snadé ovlivnění náhodnými výraznými impulzy. Řešením by bylo crest faktor průměrovat za delší časové období. Z grafu 2.7 je vidět, že získané signály jsou velmi nestálé, obzvlášť u signálů s malou střední hodnotou, protože střední hodnota při výpočtu ve jmenovateli náhodné vysoké pulzy ještě zesiluje.



Obr. 2.7: Určení Crest faktoru signálů

### 2.1.6 Rozptyl a směrodatná odchylka

Výpočet byl realizován v programu MATLAB ve funkci GRozptyl.m a GStd.m, viz A. Rozptyl, viz obr. 2.8, a směrodatná odchylka, viz obr. 2.9 se velmi blíží střední a efektivní hodnotě (směrodatná odchylka je téměř totožná s efektivní hodnotou, což je zřejmé i z výpočtu). Obě dvě metody zvýhodňují výrazné impulzy, díky druhé mocnině v jejich vzorci. Metody nepřinášejí žádnou výhodu oproti efektivní hodnotě.

### 2.1.7 Analýza impulzní akustické emise

Pro analýzu impulzní akustické emise je třeba určit, zda získané signály splňují předpoklad 1.12. Při detailním pohledu na obr. 2.10, tj. první graf v obr. 2.1, může být tento signál považován za impulzní emisi. Při detailním pohledu na obr.2.11, tj. čtvrtý graf v obr. 2.1, který je z čtyřech měřených signálů nejvýraznější, se signál blíží spíše emisi spojité. Jedná se o extrémní případ. V záznamu K4MO44956 se vyskytují i oblasti s charakterem impulzní emise. Jak se spojité části signálu projeví do



Obr. 2.8: Určení rozptylu signálů



Obr. 2.9: Určení směrodatná odchylka signálů

výsledné impulzní analýzy, by bylo potřeba stanovit pokusem, nicméně navrhnout a zrealizovat takový pokus není jednoduché. Lze předpokládat, že by bylo zaregistrováno méně impulzů. Rozsah granulometru, co se týče přechodu impulzní do spojité emise, lze rozšířit upravením konstrukce tak, aby doba útlumu byla co nejkratší. Řešením by bylo snížit setrvačnou hmotnost soustavy na minimum a přesunout snímač co nejblíže k citlivé části snímače. Jedná se o podobné úpravy, jako pro odstranění rezonancí z frekvenčního spektra.

Pro analýzu impulzní akustické emise je zásadní, jak již bylo předestřeno v teoretickém úvodu, rozlišení, zda-li se jedná o pulz nebo ne. Jednoduché řešení v podobě



Obr. 2.10: Impulzní charakter signálu MO41



Obr. 2.11: Spojitý charakter signálu MO44

hledání lokálních extrému není možné. Z jednoho impulzu by bylo určeno několik lokálních maxim, nejen způsobených kmitáním při tlumení pulzu, ale i tím, že je signál modulovaný vyššími harmonickými složkami, viz obr. 2.12.

Bylo otestováno několik metod, které by mohly být použity k proložení signálu tak, aby měl jeden impulz pouze jedno maximum.

Signál může být proložen obálkou. Toto řešení se není použitelné kvůli vyšším harmonickým složkám, kterými je signál modulovaný, viz obr. 2.12.



Obr. 2.12: Obálka signálu

Další možností bylo filtrování signálu klouzavým průměrem. Bylo otestováno několik šířek oken a metoda byla optimalizována. Optimální šířka okna byla určena na 150 vzorků. Tato metoda se ukázala jako lepší než vytvoření obálky, nicméně vlivem vyšších harmonických složek jsou v proložení stále patrná lokální maxima. Částice s větší energií vytvoří impulz s větší amplitudou. Proto jako další metoda bylo vyzkoušeno počítání energie v periodicky opakujících se intervalech. Efektivní hodnota zároveň zvýrazňuje vliv velkých částic, což je v dané aplikaci žádoucí. Délka intervalu byla určena na polovinu doby útlumu signálu. Nevýhodou tohoto řešení je, že pokud hranice intervalu vyjde uprostřed pulzu, rozloží se energie do dvou oken a výsledný pulz je zaznamenán menší než ve než ve skutečnosti. Šířka intervalu byla určena na 500 vzorků.

Nejlepším řešením, které bylo otestováno, je spojení vlastnosti klouzavého průměru a výpočtu efektivní hodnoty signálu a proložení signálu efektivní hodnotou signálu v posouvajícím se intervalu. Šířka intervalu byla optimalizována na 250 vzorků a posuv intervalu byl stanoven na 20 vzorků. S menšími hodnotami posuvu vzrůstá výpočetní náročnost. Zároveň byla minimální hodnota pulzu určena na hodnotu 300 (při rozsahu hodnot -32768 až 32767) a délka trvání pulzu byla určena na 800 vzorků.

Ze signálu proloženého metodou klouzavého energetického intervalu byly vyhodnoceny maxima energií jednotlivých impulzů. Z výsledného souboru energetických špiček byl vytvořen histogram (četnost špiček o velikosti spadající do jednoho z 200 ekvidistantních intervalů). Porovnání histogramů jednotlivých zvukových záznamů



Obr. 2.13: Výpočet efektivní hodnoty signálu v intervalech

je v obr. 2.14. Zda-li rozložení energetických špiček v histogramu odpovídá skutečnému rozložení granulometrie je ověřeno pokusem v kapitole Měření granulometrie pro referenční vzorky granulátu. Tato metoda se jeví velmi perspektivně.



Obr. 2.14: Histogram energetických špiček

Z grafu je možné odečítat rozložení velikosti částic. Je zajímavé, že nevýrazný signál MO11 má největší množství malých částic. Při porovnání dvou nejvýraznějších signálů MO13 a MO14 můžeme zjistit, že signál MO14 obsahuje větší množství hrubých částic, ale menší množství jemných částic.

Je několik výhod využití analýzy impulzní akustické emise. Pro opakovatelné výsledky není třeba, aby jednotlivá měřící zařízení měla naprosto stejnou frekvenční charakteristiku. Bylo by dobré, kdyby soustava přenášela jednotlivé frekvence se stejným zesílením, ale nemá to na výsledek tak zásadní vliv, jako u analýzy ve frekvenčním spektru. Celkově je analýza impulzní emise tolerantní ve vztahu k rozdílům v konstrukci snímačů více, než analýza ve frekvenčním spektru, která by poskytovala podobné informace o signálu. Další výhodou je tolerance na okolní zvukové rušení. Pokud bude v práškovodu přítomno zvukové rušení s konstantní frekvencí, projeví se to výraznou špičkou ve frekvenčním spektru. Pokud bude prahová úroveň nárazu vyhodnocena výše než je síla rušení, vůbec se rušení do impulzní analýzy neprojeví. Šumovou úroveň by bylo možné vyhodnocovat v průběhu analýzy.

### 2.2 Parametry signálu ve frekvenční oblasti

Bylo vypočítáno frekvenční spektrum signálu ze čtyřech získaných zvukových záznamů. Signály byly rozděleny do intervalů po 10 sekundách a z každého intervalu bylo zvlášť spočítáno spektrum. Příklad získaného spektra je na obr. 2.24.

Z obrázku jsou patrná rezonanční převýšení. Tato převýšení komplikují určení velikosti částic přímým odečtem amplitudy z frekvenčního spektra. Pro přímé určení granulometrie z frekvenčního spektra by musela být upravena konstrukce snímače tak, aby se rezonanční převýšení odstranila nebo posunula mimo z pracovní oblast snímače. Toto řešení je však poměrně komplikované. Musela by být upravena konstrukce tak, aby citlivá část měřicího zařízení měla velmi malou setrvačnou hmotnost. Nejlepší výsledek by byl pravděpodobně dosažen při umístění piezoelektrického měniče přímo do práškovodu bez jakéhokoli přenosového nosníku.

Druhou variantou je použít rezonance měřicí soustavy jako filtr a soustředit se pouze na amplitudu některých z rezonančních převýšení. Opět má takové řešení svoje nevýhody. Pravděpodobnost, že dvě měřicí zařízení budou mít rezonanční převýšení na stejných frekvencích je velmi malá. To se potvrdilo i při vypočtení spekter pro záznamy získané z instalovaných práškovodů v procesu. Nejen, že se neshodují rezonance ve frekvencích, ale frekvenční charakteristiky různých měřicích zařízení vypadají různě.

Toto zjištění motivovalo pokus, kdy byla citlivá část snímače buzena piezoelektrickým elementem v rozsahu slyšitelného spektra za účelem vytvoření představy o frekvenční charakteristice snímače. Buzený zvukový signál plynule zvyšoval svoji frekvenci od 10 Hz do 20 kHz, takže vlevo v grafu 2.15 je vidět přenos nízkých frekvencí a vpravo přenos vysokých frekvencí. Mechanická část značně ovlivňuje frekvenční charakteristiku snímače.



Obr. 2.15: Zesílení frekvencí v oblasti 9 kHz



Obr. 2.16: Frekvenční charakteristika snímače

Další možností jak přistupovat k vyhodnocení výsledků z frekvenčního spektra je rozdělení spektra na pásma, a určovat výkon v jednotlivých pásmech. Tato metoda bude rozvinuta v kapitole Měření granulometrie pro referenční vzorky granulátu.

Ověření, že se jedná o rezonance v mechanické části snímače, bylo provedeno dvěma způsoby. Snímač byl buzen pulzy s větší šířkou frekvenčního pásma tak, aby se vybudily rezonance na vyšších frekvencích. Následně bylo ze zvukového záznamu vypočítáno spektrum. Potvrdilo se, že špičky ve spektru se objevují na stejných místech a při vybuzení pulzy s větší šířkou dojde k vybuzení i vyšších rezonancí.

Druhá metoda ověření, že se jedná o rezonanci způsobenou šířením mechanického

vlnění v konstrukci snímače, byl výpočet vlastních kmitů měřicí sondy snímače. Z konstrukce snímače může být předpokládáno, že spojení měřicí sondy se stínící trubkou přes gumové kroužky je pružné natolik, že se měřicí sondou může šířit příčná vlna a že sonda kmitá jako oboustranně volný nosník. Rezonanční frekvence pro tenké nosníky být určena podle vztahu 2.1

$$f_1 \approx 1.021 \frac{a}{L^2} \sqrt{\frac{Y}{d}} \tag{2.1}$$

kde a tloušťka nosníku, L je délka nosníku, Y je Youngův modul a d hustota materiálu, a vyšší harmonické složky mohou být vypočteny podle vztahu

$$f_n \approx 0.441(n+0.5)^2 f_1 \tag{2.2}$$

Z hodnot bylo zřejmé, že rezonance je způsobená složením různých vlnění. Pokud by bylo k výpočtu přistupováno opačně a ze známé základní rezonanční frekvence by měla být vypočítána tloušťka materiálu, tloušťka nosníku by vyšla na přibližně 16 cm. Nosník se jeví podstatně tužší, to znamená, že vlny, které se v nosníku šíří, se šíří rychleji než příčné vlnění.

Bylo uvažováno, pokud nejrychleji šířící se vlna v materiálu je vlna podélná, s rychlostí šíření odhadovanou na 5000  $ms^{-1}$ , při délce sondy 1 m by vlna vybudila impulz na snímači s frekvencí 2.5 kHz. Změřená základní frekvence (přibližně 880 Hz) není vyšší než by byla frekvence buzená vlněním podélným. Řádově tedy rezonanční frekvence odpovídají. Rezonance mohou být způsobené jedním z mnoha mechanických vlnění, např. Lambovou vlnou nebo Loveho vlnou. Přesné určení typu a parametru vlny však není předmětem této práce.

## 2.3 Měření granulometrie pro referenční vzorky granulátu

Signály získané ze snímačů instalovaných v práškovodech lze porovnávat s procesními veličinami a hledat tak závislosti mezi granulometrií uhlí a proudovou zátěží mlýna, teplotou v sušicí komoře apod.. Pod pojmem granulometrie je myšlen výstup měřicí soustavy a může jím být například efektivní hodnota signálu, rozptyl nebo parametry z impulzní analýzy. Tyto parametry jsou závislé na hrubosti uhlí, ale jakým způsobem je prozatím neznámo, tudíž pří hledání korelací by byly hledány závislosti mezi dvěma relativně abstraktními signály. Pro vytvoření představy, jak ovlivňuje hrubost měřeného vzorku které výstupní parametry, byl navržen experiment. Experiment spočíval v navržení testovací měřicí soustavy, výběru vhodného materiálu pro provedení testovacího měření granulometrie s různými hrubostmi testovacího materiálu a vyhodnocení jednotlivých parametrů pro naměřené signály.

Měřicí soustava se skládala z několika částí, viz 2.17. Hlavní část tvořil piezoelektrický podavač granulátu, viz 2.18, sestavený již dříve na ústavu automatizace pro sypání křemičitého písku v podobné aplikaci. Podavač se skládá ze dvou piezoelektrických měničů. Na horní měnič je umístěna plastová obruba tak, aby se po nasypání granulátu nesypal materiál z měniče pryč. V plastové obrubě je otvor o rozměru přibližně 1x1 mm, kterým se granulát odsypává. Při použití jednoho měniče nebylo možné dosáhnout požadované rovnoměrnosti sypání, proto byl použit druhý piezoelektrický měnič umístěný pod měnič s obručí.

Oba měniče byly vybuzeny na jejich rezonanční frekvenci harmonickým signálem (přibližně 650 Hz). Vibrace vyvolané rezonancí rozpohybovaly částice granulátu a ten se začal postupně odsypávat ze zásobníku.

Bylo otestováno několik granulátů. Prvním testovaným granulátem byl vzorek uhelného prachu odebraného z práškovodu na tepelné elektrárně Mělník. Uhlí je mleto na velmi jemný prach (částice o velikosti cca 0,06 mm) a jeho použití v experimentu se nakonec ukázalo jako nevhodné, protože při dopadu na snímač nevytvářel dostatečné výrazné zvukové impulzy. Dalším typem odzkoušeného granulátu byl křemičitý písek. Oproti uhelnému prachu byl podstatně hrubší (částice až 0,3 mm) a při testování vybuzoval zaznamenatelné impulzy na snímači. Třetím použitým granulátem byla sůl s velikostmi zrn (částice až 1 mm). Výhodou soli byla její dostupnost, zastoupení širokého spektra částic a výskyt velikých zrn. Proto bylo rozhodnuto použít pro experiment granulát sůl.

Granulát byl postupně prosit skrz dvě síta tak, aby se jednotlivé frakce objemově rozdělily přibližně na třetiny. Velikost nejhrubší frakce byla přibližně 0,7 - 1,1 mm, střední frakce přibližně 0,3 - 0,7 mm a u nejjemnější frakce 0,05 - 0,3 mm.

Pro zaznamenávání signálu byl ze sondy byl vyveden výstup za primárním zesilovačem. Přes zvukovou kartu v počítači byly zaznamenávány jednotlivé zvukové záznamy. Byla zvolena vzorkovací frekvence 44100 Hz. Bylo pořízeno několik zvukových záznamů samotných frakcí a poté byly vybrané frakce objemově smíchány v poměru 1:1 a byly pořízeny zvukové záznamy takovýchto vzorků.

Přestože efektivní hodnota signálů kolísá, variační koeficient se v podstatě nemění. Při dávkování granulátu piezoelektrický sypač dávkoval nerovnoměrně, ale protože vzorky granulátu obsahovaly částice přibližně stejné velikosti, zůstal variační koeficient přibližně konstantní. Stejné chování je pozorováno na granulometrech instalovaných v práškovodech. Variační koeficient byl pozorován delší dobu a téměř se nemění, na rozdíl od efektivní hodnoty, která pracuje v závislosti na množství paliva proudícího do kotle.



Obr. 2.17: Uspořádání testovací soustavy



Obr. 2.18: Piezoelektrický podavač granulátu

Zvukové záznamy pro referenční vzorky granulátu byly zanalyzovány algoritmem pro vypočtení rozložení energetických špiček. Výsledky jsou zobrazeny v grafu 2.22. Z grafu je patrné, že granulometr nezaznamenal u nejjemnější frakce 1 největší množství záznamů, pravděpodobně kvůli citlivosti. Z histogramu je patrné, že není využit celý rozsah měřicího zařízení, proto pro příští pokus bude zvoleno větší zesílení. Pro granulát č. 2, tzn. středě hrubý vzorek, načítal algoritmus největší počet částic okolo hrubosti 1000. Při porovnání záznamů 2 a 3+2 je u vzorku 3+2 dobře



Obr. 2.19: Zobrazení vybraných testovacích testovacích záznamů



Obr. 2.20: Efektivní hodnota testovacích záznamů

vidět pokles množství částic okolo hrubosti 1000, ale nárůst velkých částic s hrubostí 3000-4000. Pokud se podíváme na grafy efektivních hodnot nebo variačních koeficientů, není možné tuto skutečnost vyhodnotit. Bylo by možné získat tuto informaci z frekvenčního spektra, nicméně jak je popsáno dál, informace je rozptýlena v šířce vybuzeného pulzu a rezonancích. Proto je analýza energetických špiček hodnocena velmi přínosně.

Pro vzorky byly vypočteny frekvenční spektra pro posouzení, zda-li bude hrubost frakce patrná ve spektru. Ve spektru jsou opět vidět rezonanční převýšení. Byly spočítány výkony v určitých intervalech a bylo otestováno vyjádření hrubosti



Obr. 2.21: Variační koeficient testovacích záznamů



Obr. 2.22: Histogram energetických špiček

vzorku pomocí poměru výkonů v intervalech. Výkony ve frekvenčních pásmech byly zaneseny do tabulky, stejně tak i vypočtený poměr.

Pro výpočet podílu mezi částicemi byly vybrány intervaly 8-12 kHz a 0-4 kHz. Z vyhodnocení pomocí podílu výkonů v jednotlivých intervalech je vidět, že tato metoda nevede závěru. Pokud na snímač dopadají velké částice, projeví se to ve spektru sice nárůstem výkonu v intervalu 0-4 kHz, ale výkon v ostatních intervalech se také zvětší. Frekvenční charakteristiky záznamů s malými a velkými částicemi se liší v celkovém výkonu ve spektru, nijak znatelně však ve frekvenci. Největší výkon ve spektru se v obou případech pohybuje kolem 9 kHz, kde z pokusu vyplynulo, že celá

Hrubost	0-4 kHz	4-8 kHz	8-12 kHz	12-16 kHz	16-20 kHz	Podíl
vz. 1	12936	19367	25333	12312	9880	1,96
vz. 2	19144	39769	60876	21044	13849	3,18
vz. 2+1	20560	47269	7980	22673	16028	3,68
vz. 3	23605	59170	91729	28666	18252	3,88
vz. 3+1	27389	68667	115650	33804	22472	4,22
vz. 3+2	28758	79218	129490	36801	22716	4,50

Tab. 2.1: Poměr výkonů ve frekvenčních pásmech 0-4 kHz a 8-12 kHz



Obr. 2.23: Frekvenční charakteristika záznamu nejjemnější frakce

soustava signál zesiluje, viz 2.15. Nestálá frekvenční charakteristika granulometru celou analýzu ve frekvenční oblasti velmi komplikuje.

Dalším jevem, se kterým je potřeba uvažovat, je zachycování akustického rušení z okolí. Toto lze pozorovat na obrázku 2.23, kde jsou patrné velmi vysoké špičky na frekvenci 2230 Hz (a na vyšších harmonických frekvencích). Jedná se o rušení z piezoelektrického podavače granulátu, který přestože byl od snímače vzdálený přibližně 1 m a jeho hlasitost nebyla příliš vysoká, způsobil svojí konstantní frekvencí výraznou špičku (a vyšší harmonické špičky) ve spektru. V praxi se ukázalo, že zvukové rušení v práškovodech je problémem. Bylo zjištěno, že při testovacích měřeních, kdy byl kryt granulometru odinstalován, byly záznamy velmi ovlivněny hlukem z blízkých procesů elektrárny. Při instalování krytu nebylo rušení pozorováno, nicméně nelze vyloučit, že z práškovodu jsou přenášena do granulometru jiná rušení.



Obr. 2.24: Frekvenční charakteristika záznamu nejhrubší frakce



Obr. 2.25: Výkon signálu ve frekvenčních pásmech

## 2.4 Korelace parametrů signálu s procesními veličinami

Jsou dva hlavní přínosy této práce. Kotel má čtyři práškovody, z nichž každý se dále dělí do 4 větví, takže do kotle je uhlí přiváděno celkem 16 přívody. V současné chvíli není způsob jak monitorovat, jestli uhlí jednotlivými větvemi proudí rovnoměrně nebo jestli vůbec proudí. Může se stát, že se práškovod ucpe velikými částicemi, které proud vzduchu není schopný vynést. To znamená samotná informace, jestli částice proudí nebo neproudí (vyhodnocení efektivní hodnoty) je přínosné. Další otázkou je, jestli po rozbočení práškovodu do čtyřech větví se uhlí rozdělí rovnoměrně mezi větve nebo jestli většina paliva letí jednou nebo dvěma větvemi.

Druhým přínosem by mělo být nalezení souvislostí mezi granulometrií (výstupním parametrem granulometru) a procesními veličinami za účelem optimalizace procesu. Exaktní přístup k věci přes korelace je jednou cestou. Výsledkem je však velké množství dat. Pokud budeme uvažovat 4 signály, 4 parametry pro jeden signál a 15 procesních veličin, dostaneme 240 korelací, s tím že pokud by daná procesní veličina byla v průběhu záznamu neměnná, bylo by složité korelaci určit. Proto by bylo efektivnější určit procesní veličiny u kterých bude pravděpodobnost korelace vysoká a poté provést test s manipulací s procesní veličinou a pozorováním výstupního parametru. Přínosné je i jistě i vytvoření metody pro jednoduché vypočtení korelací, protože je do budoucna počítáno s testováním nových parametrů, pro které bude nutné korelace určovat. Program pro výpočet korelací byl vytvořen v programu MATLAB je přiložen v příloze.

Byly vybrány dva parametry, které byly naprogramovány do měřicích zařízení instalovány v elektrárně a byly provedeny dvě měření se záznamem vybraných procesních parametrů. U procesních parametrů se jednalo o teplotu za třídičem, průtok primárního vzduchu, proudové zatížení mlýna, otáčky podavače, výška vrstvy paliva, množství paliva, tepelný výkon kotle, tlak v sušicí šachtě, teplotu primárního vzduchu, tlak v práškovodu a teplotu paliva.

Pro efektivní hodnotu signálu měl nejvyšší míru korelace průtok primárního vzduchu, pro který při zpoždění 30 s dosahovala korelace 0,873. Graf vzájemné korelace a přímé porovnání signálů je na obrázku 2.26 a 2.27.



Obr. 2.26: Korelace efektivní hodnoty s průtokem primárního vzduchu



Obr. 2.27: Porovnání efektivní hodnoty signálu a průtoku primárního vzduchu



Obr. 2.28: Srovnání efektivní hodnoty signálu a variačního koeficientu

S průtokem primárního vzduchu koreluje z principu několik veličin, například otáčky podavače nebo tlak v sušicí šachtě, takže efektivní hodnota koreluje i s nimi, ale pouze s koeficientem přibližně 0,7. Pro variační koeficient byla vyhodnocena největší korelace také pro průtok primárního vzduchu, avšak pouze 0,22, takže nelze hovořit o směrodatné závislosti. Byl sledován výskyt vysokých špiček u efektivní hodnoty signálu a variačního koeficientu viz 2.28. Tyto špičky jsou pravděpodobně způsobeny nárazy velkých částic. V záznamech se vyskytují náhodně. Při další analýze bude zkoumáno, kdy jsou velké částice vynášeny, jestli se jedná o jev zcela náhodný nebo jestli se špičky objevují s nějakou pravidelností. Protože dlouhodobá měření s instalovanými granulometry v práškovodu jsou časově náročná a není vždy možné provést libovolná testovací měření kvůli požadavkům na regulaci výkonu kotle, další měření budou provedena s dalšími vybranými parametry v závislosti na provedených analýzách. Dalším elementem který komplikuje výzkum je vysoká prašnost prostředí, kvůli kterému není možné nechat ke granulometru připojený počítač delší dobu a dělat tak analýzu z dlouhodobého hlediska. Vždy je nutné přeprogramovat procesor v granulometru a tím nabývá výzkum na časové náročnosti.

Pro vedení parametrů do řídicího centra jsou v současné chvíli dostupné 2 proudové smyčky 4-20 mA. Při přenášení jedno číselných parametrů jsou dvě smyčky dostačující. Jedním z parametrů může být přenášena informace o rozložení granulometrie a druhou informace o celkovém množství proudícího paliva. Pro přenos celé charakteristiky rozložení granulometrie by však bylo výhodné využít komunikační protokol, například protokol HART. V budoucnu, kdy budou známé souvislosti mezi granulometrií a procesními veličinami, může být z vyhodnoceného rozložení granulometrie přenášena jedno číselná informace vypovídající například o počtu částic o určité velikosti, nicméně pro ladění by použití protokolu HART bylo přínosné.

## 3 Závěr

Byla posouzena řada metod generování příznaků ze zvukových signálů získaných z práškovodů. Pokud je cílem popsat rozložení velikosti částic, jedno číselné parametry mají nevýhodu v dvojí reprezentaci. Pokud bude předpokládáno, že se změny procesních veličin projeví na granulometrii prouděním většího množství částic se stejnou šířkou rozložení velikosti částic, efektivní hodnota signálu se jeví jako parametr, který by mohl granulometrii popisovat. Tato úvaha je podpořená dlouhodobým měřením rozptylu velikosti částic, kdy se rozptyl téměř nemění, přestože efektivní hodnota ano. Pokud je intenzita vstupního signálu malá, střední hodnota se jeví jako lepší parametr, protože malé nárazy nezmenšuje.

Věnovat se v současné chvíli analýze signálu ve frekvenční oblasti pravděpodobně není správnou cestou. Z frekvenčních charakteristik je patrné, že se ve spektrech vyskytuje velké množství rezonančních špiček a zesílení signálu se na různých frekvencích velmi liší. Nabízí se řešení vyhodnocovat výkony v jednotlivých frekvenčních pásmech, avšak při pokusu bylo zjištěno, že se pásmová výkonová charakteristika spektra pouze zesiluje nebo zeslabuje podle intenzity signálu a nelze z ní odečítat informace o velikosti dopadajících částic. Je to ovšem jediná metoda, která by byla schopná poskytnout informaci o přesném rozložení velikosti proudících částic, pokud by se signál blížil spojité emisi. Řešením problému s frekvenční charakteristikou by bylo navržení nové konstrukce, kdy by musel být kladen důraz na malou setrvačnou hmotnost citlivé části měřicího zařízení, čímž by se vlastní rezonance soustavy posunuly na vyšší frekvence. Pokud by nedošlo k dostatečnému zlepšení frekvenční charakteristiky, bylo by nutné použít i jiný snímač.

Oproti tomu impulsová analýza se ukázala jako velmi zajímavá, protože výsledky metody klouzavého energetického průměru testovacích nahrávek přesně odpovídaly hrubosti jednotlivých referenčních frakcí a náročnost metody na konstrukci měřicího zařízení je podstatně nižší. Impulzní analýzou je možné přesně stanovit granulometrii materiálu, přičemž výsledky je možné uvažovat absolutně, kdy by v budoucnu bylo možné například vyhodnocovat celkové množství proudícího paliva a získávat tak informaci o poměru vzduchu a uhlí proudícího do kotle, nebo relativně, což by bylo méně náročné na kalibraci měřicí soustavy.

Při hledání korelací byla nalezena závislost mezi průtokem primárního vzduchu a efektivní hodnotou signálu. Bylo pozorováno, že variační koeficient signálu se v čase téměř nemění. Je možné, že by určité změny ve variačním koeficientu byly pozorovatelné při opotřebení mlýnských kamenů. To bude v budoucnu ověřeno.

Dalším krokem v práci by mělo být pokračování v hledání závislostí s procesními veličinami netýkajících se pouze přípravy paliva ale i veličinami procesů kvality spalování. Pro aplikaci metody klouzavého energetického průměru by měla být metoda optimalizována, to znamená najít metodu pro určování prahové úrovně šumu, zauvažovat, zda-li by nebylo vhodné zvětšit rozsah měřicího zařízení, protože většina dopadajících částic je tak malá, že ji snímač pravděpodobně ani nezaznamená, a přidat do zařízení blok zajišťující komunikaci přes HART protokol. Dále by bylo dobré zamyslet se nad mechanickou částí měřicího zařízení, zda nezměnit konstrukci tak, aby celá soustava nerezonovala, protože rezonance podstatně prodlužují dobu útlumu nárazu a signál se potom blíží spojité emisi i při dopadu menšího počtu částic.

## Literatura

- UHER, M.; BENEŠ, P. Measurement of Particle Size Distribution by the Use of Acoustic Emission Method. 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2012) Proceedings. 1. 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08855- 1331 USA: IEEE Service Center, 2012. s. 1194-1198. ISBN: 978-1-4577-1771-0.
- [2] ZHANG, J.;HU, H;. DONG, J.; YAN, Y. Concentration measurement of biomass/coal/air three-phase flow by integrating electrostatic and capacitive sensors. In *Flow Measurement and Instrumentation*, 2012, vol. 24, s. 43-49. ISSN 0955-5986.
- [3] BENEŠ, P.; ZEHNULA, K. New design of the two-phase flowmeters. Sensors and Actuators, 2000, roč. 2000, č. 86, s. 220-225. ISSN: 0924- 4247.
- [4] KADLČÁK, J. Obrazová analýza a současné metody granulometrie. Rešeršní část k diplomové práci, Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, 2014.
- [5] SCHREIBER, M.; HAUG, M.; STARKE, M.; KOCK, R.; TURONI, F. Online measurement of coal fineness and air-fuel ration inside the coal pipe. In *PowerGen International 2008*, December 2-4, 2008, Orlando, FL, USA.

## Seznam příloh

Α	Obsah přiloženého souboru	
	xklime43_granulometrie.zip	44
в	Výkres měřicí soustavy	45
С	Snímač Schaller	46

## A Obsah přiloženého souboru xklime43\_granulometrie.zip

V přiloženém souboru jsou realizovány jednotlivé funkce pro generování příznaků. Dále je přiložen spouštěcí soubor, pomocí něhož lze funkce volat a tisknout grafy. Funkce byly odzkoušeny ve verzi Matlab R2018b.

Dále jsou přiloženy čtyři nahrané zvukové soubory z práškovodu, na nichž byla analýza provedena a pomocné zvukové soubory, které byly použity pro testování funkcí.

Ve složce graphic jsou poskytnuty vygenerované grafy spouštěcím souborem v plné kvalitě.

xklime45\_granulometrie.zip

audiozvukové soubory použité pro analýzu
graphic grafy vygenerované spouštěcím souborem
matlabzdrojové kódy funkcí a spouštěcího souboru
GCrest.m
GEfektH.m
GFFT.m
GImpA.m
GMain.mán garametrů
GRozptyl.m
GSikmost.m
GSpicatost.m
GStd.m
GStredH.m
GVKoef.m
CorrMain.m korelací

B Výkres měřicí soustavy



Obr. B.1: Výkres měřicí soustavy





Obr. C.1: Snímač Schaller