

Analýza akustických a vibračných meraní v procese rozpojovania

Eudmila Ušalová¹

Analysis of the Acoustic and Vibration Measurement in the Disintegration Process

In the last thirty years there have been many developments in the use of acoustical and vibration measurement and their analysis for monitoring the condition of rotating machinery. These have been in three areas of interest the: detection of machinery pieces faults, the diagnosis and the prognosis. Of these areas, the diagnosis and prognosis still require an expert to determine what analyses to perform and to interpret the results. Currently much effort is being put into the automated fault diagnosis and prognosis. Major benefits come from the ability to predict with a reasonable accuracy how long a machine can safely operate (often a matter of several months from incipient faults are first detected). This article briefly summarizes selected signal processing methods, which are possible to be suggested for the vibroacoustical measurements evaluation. These techniques are presented with a reference to their use in the rock disintegration process. Simultaneously, several cases are discussed where a great care must be taken in setting up input parameters or very misleading data would be produced.

Key words: rotating machines, drilling, acoustical and mechanical waves, frequency domain, spectrum

Úvod

Vŕtný stand, slúžiaci na rozpojovanie horninových vzoriek vrtnou korunkou s priemerom 23-46 mm by nespôsobil žiadne chvenie, ak by sa celá jeho energia premenila na užitočnú prácu. V praxi toto chvenie pri prevádzke vrtných súprav je považované za nežiadúce a snahou je ho eliminovať. Chvenie vzniká ako vedľajší produkt normálneho prenosu dynamických síl mechanickou sústavou. Prvky stroja vzájomne reagujú a v sústave dochádza k rozptylu energie formou mechanického chvenia. Vibračný signál je prejavom funkcie zariadenia, jeho stavu a pôsobenia na horninu, ktoré je hlavným predmetom nášho výskumu. Analýza tohoto signálu umožňuje získať informácie zo stroja v prevádzkovom stave, bez nutnosti jeho odstavenia. Tento aspekt je využiteľný pri výskume rozpojovania hornín, kde znalosti o charakteristikách horniny/horninového masívu ako aj o opotrebení rozpojovacieho nástroja počas mechanického rozpojovania hornín (vŕtaním, razením) sú dôležitými informáciami v priebehu rozpojovacích prác. Preto patria k hlavnému predmetu výskumu zameraného na rozbor vibračných meraní. Proces mechanického rozpojovania hornín považujeme za stochastický, z dôvodu nehomogenít v rozpojovanej hornine ako aj v materiály rozpojovacieho nástroja, náhodnosti v toku chladiacej kvapaliny a nevyhnutnej asymetrie rezných hrán, vplyvom ich obrusovania. Pri rozpojovaní je teda veľa "rušivých momentov" a dokonca proces ako taký môže byť realizovaný s použitím rôznych režimových parametrov. Preto je analýza signálov potrebná pre oddelenie hľadanej informácie od ostatného "šumu".

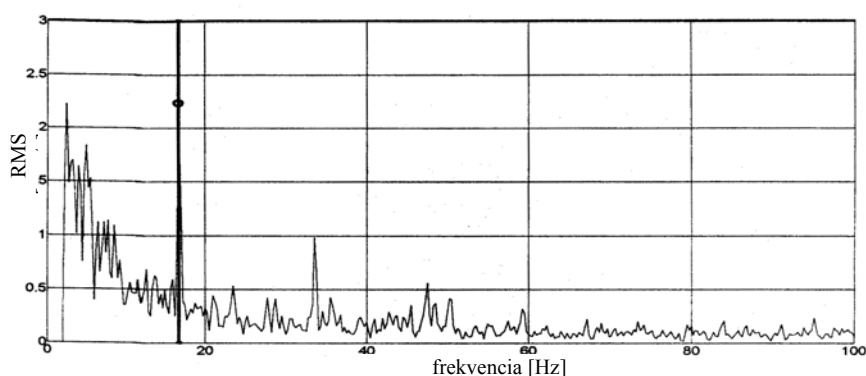
Vibrácie môžu byť roztriedené podľa frekvenčného rozsahu. Jednoduché "vibrácie" monitorujú frekvenčné pásmo od 1 do 10 Hz. "Hluk" je definovaný hranicou ľudského sluchu, 20 Hz-20 kHz. Pásmo "ultrazvukových kmitov" je v rozsahu 20 kHz - 80 kHz, a "akustická emisia" všeobecne zahŕňa všetko od 80 kHz do 1 MHz (Jantunen, 2002). Určitou odlišnosťou je, že zvukové vibrácie sú nesené vzduchom, kým ostatné typy sú mechanické. Preto je zvuk citlivejší na hluk pozadia a na iné náhodné skreslenia. Každá kategória má svoje vlastné typy senzorov a svoje výhody aj nevýhody. Obtiažnosťou pri analýze vibrácií je extrahovanie užitočných informácií zo zmesi dát, ktoré získame pri monitorovaní. Rozpojovanie vŕtaním spôsobuje vznik mimoležiacich amplitúd a informačne nezdierateľných vibrácií. Je náročné nájsť charakteristické "vibračné podpisy" (vibration signatures). Okrem toho existujú rôzne techniky pre analýzu vibračných signálov, o ktorých článok ďalej pojednáva. Štúdium identifikácie typu horniny (jej charakteristík) a opotrebenia nástroja určite nepatrí k novým. Doterajší výskum bol zameraný na meranie krútiaceho momentu, príkonu a iných indikátorov, popisujúcich prácu rozpojovacieho zariadenia. Nová metóda však predpokladá, že rôzne typy hornín, ako aj rôzne stupne opotrebovania nástroja, vykazujú odlišnosti vo vibráciách. Naším cieľom je zákonitosti odsledovať a využiť na nepriamu identifikáciu procesu rozpojovania hornín vŕtaním. V prípade úspešnosti by možné využitie malo smerovať k implementácii systému, ktorý by rýchlo a automaticky monitoroval tieto vibrácie a detekoval ich.

Spektrálna výkonová hustota

Vibračné signály monitorujúce podmienky rozpojovania hornín vŕtaním môžeme popísať v amplitúdovej oblasti hustotou pravdepodobnosti alebo distribučnou funkciou, v časovej oblasti autokorelačnou funkciou alebo

¹ Ing. Eudmila Ušalová, Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice, usalova@saske.sk
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 15. 11. 2004)

autokovariačnou funkciou a vo frekvenčnej oblasti výkonovou spektrálnou hustotou. Techniky spracovania vo frekvenčnej oblasti - FFT spracovanie, patrí k najdôležitejším algoritmom číslicového spracovania signálov v meraní. Existuje veľa typov vibračných, resp. akustických signálov, od veľmi jednoduchých - sínusových až po zložité. Pre sínusový signál je charakteristická jedna dominantná frekvencia alebo tón. V praxi bežnejšími signálmi sú náhodné vibrácie, resp. hluk, ktoré majú výrazný priebeh na viacerých frekvenciách v rovnakom čase. Sú to zmesi užitočného signálu skresleného vyššími harmonickými zložkami a šumom, ktorý sa väčšinou k signálu pripočíta (aditívny šum). Môže ísť o elektronický šum, kvantizačný šum vznikajúci pri prevode analógového signálu na signál číslicový, alebo o rušivé signály, ktoré sa do meracieho obvodu dostávajú elektromagnetickou indukciou alebo kapacitnou väzbou (Sedláček, Šmíd, 2004). Existujú dve základné charakteristiky popisujúce skreslenie signálu: celkové harmonické skreslenie (THD – Total Harmonic Distortion), t.j. závislosť veľkosti vyšších harmonických vzhľadom k základnej harmonickej a pomer signálu k šumu (SNR – Signal to Noise Ratio), t.j. odstup signálu od šumu. Obvyklým spôsobom popisu náhodného signálu vo frekvenčnej oblasti je spektrálna výkonová hustota (PSD - Power Spectral Density). Tento názov je odvodený z jej prvotného využitia – pre štúdium vplyvov náhodných zmien príkonu v elektrickom obvode. Základná teória je však plne aplikovateľná aj pre analýzy pracujúce s akustickými a mechanickými vibráciami, preto sa toto pomenovanie zachovalo a nemení sa v závislosti od analyzovanej premennej.



Obr. 1. Frekvenčné spektrum (400 zložkově, 4x spriemereně, váhovaně okienkom Hanning) vibračného signálu rýchlosti pri rozpojovaní vrtaním andezitu pri režimových parametroch: prítlak 7500 kN a otáčky 16,67 s⁻¹
Fig. 1. Frequency spectrum (400 lines, 4 times averaging, Hanning window) of vibration signal(velocity) at andesite drilling, regime parameters: thrust 7500kN and revolution 16,67s⁻¹

Základnou jednotkou PSD je Unit².Hz⁻¹. Pre jej pochopenie je vhodné vedieť ako je mechanizmus pre frekvenčnú analýzu náhodných signálov realizovaný. Meraný signál sa rozdeľuje do malých frekvenčných segmentov zvaných frekvenčné zložky (frequency bins). Každá zložka je len niekoľko málo hertzov (Hz) široká, teda poskytuje informácie spojené s úzkym pásmom frekvencií a je označená prislúchajúcou strednou frekvenciou. Z dôvodu vyhnutia sa situáciám, kde by väčším frekvenčným pásmam zodpovedala vyššia hodnota PSD, bol zavedený normalizačný faktor, t.j. podiel amplitúdy každej frekvenčnej zložky jej prislúchajúcou šírkou pásma. Častým typom spektra je aj výkon s efektívnymi zložkami, označovaný RMS (Root Mean Square), kde jednotkou je Unit, na ilustráciu týchto pojmov je na obr. 1 znázornený priebeh vibračného spektra pri vrtaní andezitu.

Frekvenčné spracovanie signálov v praxi

Všeobecne by sa FFT spracovanie malo používať iba pre stacionárne dáta. Inými slovami, dáta sa nesmú meniť vo frekvencii ani v štatistických charakteristikách. Navyše, toto spracovanie je určené len pre vyšetrenie harmonických dát. Ak by tieto pravidlá boli presne dodržiavané, potom by FFT nemohla byť tak populárnym nástrojom, akým sa stala. Preto je dôležité si uvedomiť, že ak spracovávame podľa vyššie uvedeného princípu, 'nekorektné' dáta, musíme byť opatrní pri nastavovaní parametrov analýzy, aby sme sa vyhli vážnym chybám pri interpretácii.

Frekvenčné rozlíšenie spektra priamo súvisí s dĺžkou záznamu a nepriamo so šírkou pikov. Chybná predstava je, že vyššie frekvenčné rozlíšenie je tá správna voľba pre presné určenie dominantných frekvencií. Prívetký počet frekvenčných zložiek zaberá dlhší časový úsek signálu pre výpočet spektra. Počas tohto času sa môžu amplitúda aj frekvencia dramaticky meniť. Preto sa stáva, že maximálne frekvenčné hodnoty nezodpovedajú rozkmitu spracovávaného signálu (Randall, 2004). Získať vysoké rozlíšenie mnohokrát vyžaduje zdĺhavé spracovávanie vstupných dát. Treba si uvedomiť, že nie je potrebné zvyšovať rozlíšenie ale minimalizovať čas pre spracovanie, samozrejme do tej miery, aby to nebolo na úkor výsledov.

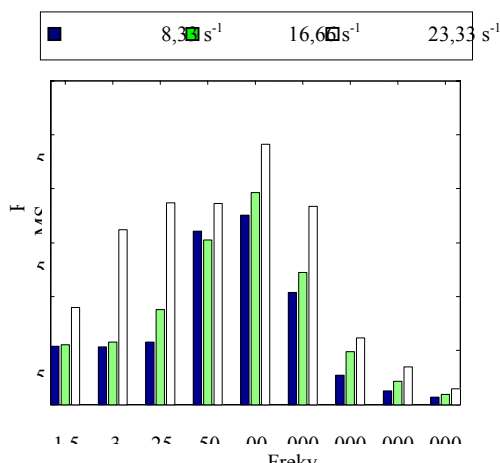
V ideálnom prípade by všetky signály mali ležať v strede príslušnej FFT zložky a táto poloha by sa nemala meniť počas času zberu dát. Táto situácia nastáva, ak je splnená podmienka koherentného vzorkovania, t.j. synchronizovanie intervalu odoberania vzoriek s periódou sledovaného priebehu. V reálnych podmienkach však je táto požiadavka bohužiaľ ťažko splniteľná, čo sa v spektre prejaví ako jeho “presakovanie” (spektral leakage) do susedných frekvenčných binov. Spektrum sa takto deformuje. Metóda, umožňujúca čiastočné potlačenie tohto javu, a tým získanie správneho spektra bez skreslenia, je váhovanie signálu oknom ešte pred FFT transformáciou. Tým pojmom sa rozumie vynásobenie navzorkovanej časti signálu okienkovou funkciou (window function), ktorá má rovnakú dĺžku ako signál, je osovo súmerná podľa osy prechádzajúcej stredom okna a monotónne klesá k obojom koncom. Signál upravený oknom je amplitudovo modulovaná verzia originálneho signálu, spektrálne piky sú obklopené postrannými pásmami, ktoré sú však menej rušivé ako pôvodne. Okienkových funkcií už dnes existuje veľké množstvo a ich parametre sa menia v závislosti od rôznych aplikácií (Zimmerman, 2002; Wickramarachi, 2003). V spojení s okienkovými funkciami sa využíva aj prekrývanie časových segmentov (overlapping), čím sa vyvažuje strata informácií utlmená na začiatku a konci takto upraveného signálu. Veľkosť prekrývania sa vzťahuje k dĺžke časového intervalu a intervalu prekrytia (vyjadruje sa percentuálne).

Ak je signál frekvenčne modulovaný, pohybuje sa cez niekoľko frekvenčných zložiek počas zberu dát. V reálnych podmienkach môže ísť napr. o kolísanie otáčok vrtného standu počas merania. V takýchto prípadoch, dochádza tiež ku skresleniu veľkosti reálnej amplitúdy vplyvom ‘rozšírenia piku’. Riešením je redukcia rozlíšenia spektra buď výberom vyššej maximálnej frekvencie alebo zredukovaním počtu frekvenčných zložiek. To bude mať za následok zvýšenie šírky frekvenčnej zložky, ponúkajúcej lepšie obsiahnutie signálu vnútri prislúchajúceho pásma.

Naopak, existujú prípady, kedy je potrebné zvýšiť frekvenčné rozlíšenie, t.j. ak je potrebné ‘urobiť deal’ v užšom frekvenčnom pásme, pretože normálny frekvenčný rozsah FFT spektra je od nuly do polovice vzorkovacej frekvencie (Shannon-Kotelnikov teorém). Pre potreby zväčšenia rozlíšenia vo vybranom pásme frekvenčného spektra sa využívajú algoritmy tzv. frekvenčnej lupy (Zoom-FFT) (Thrane, 1980; Randall, 1987), ktoré využívajú dva základné prístupy: frekvenčná lupa s posuvom frekvencie (Real-Time Zoom) a frekvenčná lupa so záznamom signálu (Non-destructive Zoom). Prvý algoritmus pracuje na princípe zmenšenia vzorkovacej frekvencie použitím decimácie a druhý využíva zväčšenie dĺžky záznamu a jeho rozdelenie na jednotlivé časti, pričom spektrum vybraného pásma získame kombináciou čiastkových FFT transformácií (Ušalová, 2003).

Ako bolo uvedené, FFT poskytuje veľmi účinný nástroj pre získanie frekvenčného spektra s lineárnym frekvenčným škálovaním, t.j. s konštantnou absolútnou šírkou pásma (Constant Bandwidth). Toto škálovanie je výhodné pre diagnostické ciele. V prípade vzájomného porovnávania spektier v odlišných prevádzkových podmienkach sa výhodnejšie používa oktávová analýza, obr. 2, charakterizovaná konštantnou relatívnou šírkou pásma (CPB - Constant Percentage Bandwidth - logaritmická frekvenčná os) z nasledujúcich dôvodov (Frarey, 2002):

- CPB analýza obsiahne širšie pásmo v rámci rovnakého počtu frekvenčných zložiek,
- CPB analýza zahŕňa v rámci svojho algoritmu kompenzáciu napr. malých rýchlostných zmien, na úkor postranných pásiem v spektre, čo znamená že menšie zmeny budú zahrnuté v pásme.



Obr. 2. Oktávová analýza zvukového signálu počas prevádzky standu naprázdno

Fig. 2. Acoustic signal octave analysis of idle run

Ďalšou technikou, veľmi často využívanou pri frekvenčnej analýze, je priemerovanie (averaging) určitého počtu spektrálnych záznamov s rovnakým počtom frekvenčných zložiek. Adekvátny počet spriemerovní vyhladí nestálosť v amplitúde diskretného signálu, ktorá sa bude blížiť nule a zároveň spriemeruje aj veľkosť signálu na hodnotu bližšiu jeho aktuálnej amplitúde. Určenie počtu spriemerovaných spektier sa realizuje prvotnou produkciou spektra a potom v závislosti na jeho charaktere sa mení počet frekvenčných zložiek a počet priemerovní, pri ktorom by šumová úroveň ovplyvňovala diskretný frekvenčný signál akceptovateľným podielom. Existuje aj priemerovanie v časovej oblasti, resp. časovo-synchronne priemerovanie, ktoré vyžaduje tachometer, s cieľom synchronizácie vzoriek časového záznamu k chodu strojného zariadenia. Priemerovanie v časovej oblasti sa aplikuje na redukciu náhodných šumových komponentov v spektre, alebo na redukciu efektov, prípadne iných miešajúcich sa signálov, ako sú komponenty susediacich strojných častí a iné vonkajšie vplyvy.

Záver

Analýza akustických a vibračných signálov, získaných zo strojných zariadení počas prevádzky, má k dispozícii veľké množstvo techník. Článok si kladol za úlohu predstaviť praktické aspekty FFT analýzy. Uvádza techniky predspracovania signálu ako aj samotné nastavenie parametrov FFT spektier. V súčasnosti sú na našom pracovisku využívané pre identifikáciu procesu rozpojovania hornín vrtaním analýzou snímaného akustického aj vibračného signálu (Krepelka et al, 2004 ; Chlebová et al, 2003).

Literatúra -References

- [1] Fraey, J. L.: Pitfalls in the Analysis of Machinery Vibration Measurements. *Sound & Vibration Magazine, september 2002.*
- [2] Chlebová, Z., Futó, J., Krepelka F.: Acoustical Diagnostics Possibilities of Technical Systems. In.: *Zb. z 11. medzinárodnej vedeckej konferencie CO-MAT-TECH 2003, 16.-17. október, 2003, Trnava, s. 59.*
- [3] Jantunen E.: A Summary of Methods Applied to Tool Condition Monitoring in Drilling. *Internation Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002), p. 997-1010.*
- [4] Krepelka, F., Chlebová, Z., Zahradníček, R.: Výstavba letísk – štúdium mechanizmu rozpojovania pomocou vibračného frekvenčného spektra. *Acta Avionica, ročník VI, č. 10, 2004, s. 63-66.*
- [5] Randall, R. B., Tech. B.: Frequency Analysis, *3rd Edition, Brüel & Kjaer, 1987.*
- [6] Randall, R. B.: State of the Art in Monitoring Rotating Machinery – Part 1. *Sound & Vibration Magazine, march 2004.*
- [7] Randall, R. B.: State of the Art in Monitoring Rotating Machinery – Part 2. *Sound & Vibration Magazine, may 2004.*
- [8] Sedláček, M., Šmíd, R.: Matlab v měření. *Praha, Vydavatelství ČVUT, 2004, s. 204.*
- [9] Zimmermann, J.: Spektrografická a škálografická analýza akustického rečového signálu. *Prešov, Vydavateľstvo Náuka Prešov, 2002, s. 168.*
- [10] Ušalová, L.: Frekvenčné metódy hodnotenia signálov pri rozpojovaní hornín. *Práca aspirantského minima, Košice, UGt, máj 2003, s. 44*
- [11] Thrane, N. – Zoom-FFT. Technical Review, *Brüel & Kjaer, č. 2, roč. 1980.*
- [12] Wickramarachi, P.: Effects of Windowing on the Spectral Content of a Signal. *Sound & Vibration Magazine, january, 2003.*
- [13] Leško, I., Futó, J., Krepelka, F., Pandula, B., Mockovčiaková, A.: Control with acoustic method of disintegration of rock by rotary drilling Metallurgy, *Zagreb, 2/2004, ISSN 0543-5846, s119-121.*