

## Metódy a algoritmy spracovania akustického signálu z procesu rozpojovania hornín rotačným vrtaním

Flegner Patrik · Elektrotechnika

02.05.2011



Hlbinné vrtanie je špecifickým odvetvím banskej činnosti. Patrí medzi najrozšírenejšie spôsoby rozpojovania horniny a dotýka sa aj širších oblastí geotechnológií. Existuje niekoľko spôsobov a modifikácií hlbinného vrtania. Tento príspevok sa zaoberá rotačným vrtaním, ktoré spočíva v prekonaní síl pútajúcich k sebe jednotlivé čiastočky horniny.

Táto technológia rozpojovania je dopĺňaná rôznymi modifikáciami.

Teoretický výskum rozpojovania hornín rotačným vrtaním a následné experimenty na vrtnom stande ukázali, že existuje optimálny režim vrtania z hľadiska mernej spotreby energie  $w$  ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ ), z hľadiska opotrebovania rozpojovacieho nástroja, ale aj z hľadiska rýchlosti vrtania  $v$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Tieto tri kritéria optimálneho režimu sú splnené približne v jednom (efektívnom) pracovnom režime (optimálne otáčky  $n_{\text{opt}}$ , optimálny prítlak  $F_{\text{opt}}$ ). Tieto skutočnosti vedú k myšlienke optimálneho riadenia procesu vrtania. Vzhľadom na špecifické problémy súvisiace priamo s procesom rozpojovania horniny budeme v ďalšom uvažovať reálnejšie o efektívnom riadení procesu vrtania.

### 1. Definovanie problému

Otázka riadenia procesu rozpojovania horniny má svoje špecifiká. Hlavným problémom je skutočnosť, že aj keď technologickým zariadením je vrtná súprava, technologickým procesom v ňom prebiehajúcim je vnútorne komplikovaný proces rozpojovania samotnej horniny, ktorého stavové veličiny sú štandardnými metódami nemerateľné. Napriek tomu pri riešení úlohy riadenia je žiaduce dodržať systémový prístup, ktorý sa opiera o niekoľko základných pojmov a princípov.

Kľúčovou otázkou na začiatku riešenia riadiaceho systému procesu rozpojovania je dostatok informácií o vplyve režimu vrtania na samotný priebeh rozpojovania konkrétnej horniny. Hlavnými riadiacimi veličinami sú prítlak vrtného nástroja na čelo vrtu  $F$  (N), otáčky vrtného nástroja  $n$  ( $\text{ot} \cdot \text{s}^{-1}$ ), prietok výplachu za časovú jednotku  $Q$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) a kvalita výplachu, ktorá je daná jeho fyzikálno-chemickými parametrami. Všetky tieto zložky sú na sebe nezávislé, je možné ich v priebehu vrtania samostatne regulovať. Znalosť režimov vrtania je základom poznania procesu rozpojovania hornín rotačným vrtaním. Zo systémového hľadiska je proces vrtania horniny možné zjednodušiť chápať ako systém, na vstupe ktorého sú tieto riadiace veličiny:

- otáčky vrtného nástroja  $n$  ( $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ) alebo  $n$  ( $\text{ot} \cdot \text{s}^{-1}$ ),

- kontaktná sila (prítlak)  $F$  (N),
- množstvo výplachu vrtu vodou  $Q$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Výstupom zo systému sú riadené, resp. stavové veličiny:

- rýchlosť odvrtu  $v$  ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ),
- krútiaci moment  $M_k$  (N.m),
- špecifická práca rozpojovania  $w$  ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ ),
- pracovná schopnosť nástroja  $\varphi$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),

pričom  $w$  a  $\varphi$  sú stavové veličiny procesu, ktoré nie sú v reálnych podmienkach priamo merateľné. Na proces rozpojovania vplyvajú aj ďalšie stavové veličiny:

- vlastnosti indentora (vrtného nástroja),
- geomechanické vlastnosti práve rozpojovaného horninového masívu.



Obr. 1: Proces rozpojovania horniny ako objekt riadenia, riadený systém

V procese rozpojovania hornín dochádza k distribúcii príkonu na:

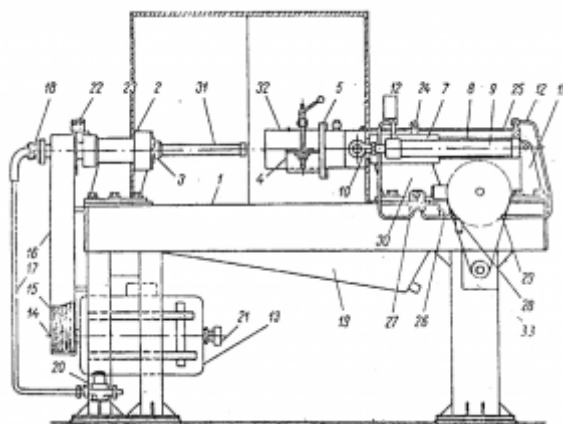
- rozpojenie horniny,
- premenu podstatnej časti príkonu na teplo,
- opotrebenie nástroja,
- vibrácie vrtných zariadení,
- akustický prejav rozpojovania.

Z nameraných hodnôt príkonu  $W$  a hĺbky odvrtu  $l$  je možné vypočítať špecifickú prácu rozpojovania  $w$  a následne určiť pracovnú schopnosť rozpojovacieho nástroja  $\varphi$ . V rámci výskumných prác na školiacom pracovisku a na ÚGT SAV sa už niekoľko rokov rieši otázka snímania a vyhodnocovania sprievodného akustického signálu pre účely identifikácie a riadenia procesu rozpojovania. Preto je súčasťou monitorovania procesu aj záznam sprievodného akustického signálu  $x(t)$  (tzv. akustická emisia), ktorý vzniká počas experimentov pri jednotlivých režimoch vrtania [1].

Navrhované riešenia sa opierajú o spracovanie sprievodných akustických emisií z procesu vrtania. V rámci výskumu na pracovisku ÚRaIVP, Fakulty BERG, TU v Košiciach, v spolupráci s ÚGT SAV je už dlhšiu dobu skúmaná možnosť využitia sprievodného akustického signálu ako integrovaného informačného zdroja o stave procesu rozpojovania hornín rotačným vrtaním.

Východiskom je predstava, že na rozhraní indenter-hornina dochádza v procese vrtania k periodickým mechanickým vibráciám a tiež k stochastickým mechanickým rázom, ktoré zodpovedajú elementárnym mechanickým procesom rezania a

vyštepovania materiálu. Tieto vibrácie a rázy následne vyvolávajú odpovedajúci hluk. Na základe tejto predstavy vznikol predpoklad, že ako signál mechanických vibrácií, tak aj sprievodný signál hluku, obsahujú v sebe informácie o podmienkach a o stave procesu rozpojovania, ktoré by bolo možné využiť pre riadenie procesu vŕtania [2].



Obr.2: Schéma skúšobného vŕtacieho standu ÚGt SAV v Košiciach. Niektoré dôležité uzly: 1-ocelový rám, 2-vreteník, 3-jadrovka, 4-držiak vzorky, 7-hydraulický posuv, 13-elektromotor, 31-korunka, 32 vzorka [3].

## 2. Modelovanie procesu rozpojovania hornín rotačným vŕtaním

Cieľom modelovania procesu je jeho model, ktorého využitie môže byť rozličné. Stretávame sa s modelmi pre účely simulácie, identifikácie, riadenia, experimentovania a pod. V prípade procesu vŕtania je možné predpokladať potrebu modelu pre účely riadenia. K tvorbe takéhoto modelu je možné pristupovať viacerými spôsobmi. V nasledujúcom sú uvedené dva prístupy.

Prvý prístup vychádza z empiricky získaných zákonov publikovaných v odbornej literatúre. Tieto modely sa opierajú o teoretické aspekty porušovania hornín. Aj keď sú v príspevku charakterizované, nebola im venovaná väčšia pozornosť, pretože neumožňujú pružne reagovať na dynamicky sa meniace podmienky rozpojovania.

### Teoretické aspekty porušenia a rozpojenia hornín

Existuje nespočetné množstvo faktorov, ktoré generálne alebo okrajovo ovplyvňujú procesy porušovania a rozpojovania hornín. Študuje ich vedná oblasť, ktorá bola nazvaná mechanika porušovania. Tieto teórie sa nazývajú tiež teórie pevnosti. Iné teórie, ktorých základným reprezentantom je teória Griffitha, študuje vnútorný mechanizmus a matematický model porušenia. Pritom vychádzajú z fyzikálnych parametrov hornín. Predpokladajú, že obsahujú defekty vo forme mikrotrhlín, ktoré sa za určitých podmienok a pri určitom zaťažení telesa stávajú nestabilnými, šíria sa, a v konečnom dôsledku spôsobujú katastrofické makroskopické porušenie, t.j. rozpojenie horniny.

### Energetické aspekty porušovania a rozpojovania

Rozpojovanie je proces, pri ktorom pôsobenie síl prekoná väzobnú energiu stavebných častíc materiálu a vytvorí nové povrchy, Levenson (1953). Toto je najjednoduchšia definícia rozpojovania. Kým ale k rozpojovaniu dôjde, sily pôsobiace na materiál

spôsobujú jeho deformáciu až k medzi pevnosti a vykonávajú deformačnú prácu. Štúdiom problematiky funkčných vzťahov medzi energiou dodanou rozpojovanému materiálu prostredníctvom pôsobiacich síl a rozpojovacou dispergačnou prácou, vyjadrenou novovzniknutými povrchmi, rozpojeným objemom alebo tzv. stupňom redukcie, má dnes už viac ako storočnú tradíciu.

### Teórie porušovania a rozpojovania hornín

Proces rozpojovania hornín, pri ktorom pôsobíme rotujúcim valcovým telesom na makroskopický objekt-horninu kolmým tlakom v snahe narušiť jej štruktúru budeme nazývať vrtnie. Snaha popísať tento jav z mechanického a energetického hľadiska vyústila už viac ako pred sto rokmi do sformulovania energetických teórií rozpojovania, ako to už bolo predostreté v úvode tejto podkapitoly energetické aspekty porušovania a rozpojovania. Jednou z prvých bola Rittingerová teória (1867). Dospel k názoru, že energia potrebná k rozpojovaniu pevnej fázy je úmerná novovytvoreným povrchom. Matematické pojetie:

$$W = k_1 \Delta S, \quad (J.m^{-3}) \quad (1)$$

Z geometrického modelu rozdelenia pôvodnej kocky, na menšie o hrane  $x_0$  a objemu  $x_0^3$  na  $n$  kociek o hranách  $x$ , určil pre intenzitu energie rozpojovania výraz:

$$w = k_1 \left( \frac{1}{x} - \frac{1}{x_0} \right) = k_1 \frac{n-1}{x_0}, \quad (J.m^{-3}) \quad (2)$$

kde  $n=x_0/x$  predstavuje stupeň redukcie.

Na ďalšom stupni bola sformulovaná Kick Kirpičevova Objemová teória, ktorá sa v niekoľkých úpravách používa dodnes. Okrem novovzniknutých povrchov zahrnuli do modelu aj hypotézu o určitej deštrukcii v materiáli, ktorá na svoj vznik spotrebuje taktiež energiu. Vychádzal z predpokladu, že deformačná sila pri rozpojení ťahom je vždy úmerná prierezu namáhaného telesa a práca deformačných síl pri konštantnom priereze je úmerná dĺžke telesa. Z toho vyplýva, že energia potrebná na rozpojenie je úmerná objemu telesa, t.j.:

$$W = k_2 \Delta V, \quad (J.m^{-3}) \quad (3)$$

Pri mechanickom rozpojení hornín je základom procesu rozpojovania kontaktné silové pôsobenie indentora na horninu. Pritom vznikajú v kontaktnom okolí horniny a indentora napätia a deformácie. Pri dosiahnutí určitej kritickej hodnoty napätí, ktoré vyvolajú v závislosti od vlastností horniny prislúchajúce kritické deformácie, dochádza k rozpojení danej horniny. Z hľadiska rozpojenia hornín a stability banských a inžinierskych podzemných diel majú najväčší význam pevnostné vlastnosti horniny.

Pevnosť horniny vyjadruje odpor resp. odolnosť horniny proti trvalému porušeniu jej celistvosti účinkom vonkajšieho mechanického, tepelného a iného pôsobenia. Číselne pevnosť vyjadrujeme napätím, pri ktorom sa skúmaná látka poruší na dve alebo viac častí. Súčasne tieto sily resp. napätia pri deformovaní horniny a jej následnom vyštepovaní vykonávajú prácu, ktorou je možné proces rozpojovania kvantifikovať z hľadiska energetickej náročnosti.

Pre kvantifikáciu sa najčastejšie používa tzv. merná objemová práca rozpojovania, t.j. práca (energia) potrebná na rozpojovanie jednotkového objemu horniny. Je vyjadrená vzťahom (5). Táto merná práca charakterizuje deformovanie a porušenie horniny len do vzniku trhlín. Merná objemová práca rozpojovania kvantifikuje z energetického hľadiska efektívnosť rozpojovania danej horniny. Je možné ju využiť:

- pre stanovenie optimálnych hodnôt prítlaku na diskovú hlavu s cieľom optimálne riadiť proces rozpojovania horniny, pretože jej hodnoty sú silne ovplyvňované fragmentáciou vznikajúcich úlomkov pri vyštepovaní horniny,
- pre predikciu náhlych zmien pevnostných vlastností horniny na čelbe, pretože pri vylúčení vplyvu zmien režimu rozpojovania horniny (matematickými postupmi), jej hodnoty korelujú s pevnostnými vlastnosťami rozpojovaných hornín,
- pre nepriame hodnotenie stavu opotrebovania funkčných plôch rozpojovacích nástrojov, pretože jej hodnoty korelujú s intenzitou opotrebovania.

Z energetického hľadiska je ďalej možné povedať, že merná objemová práca rozpojovania  $w$  je veličinou zloženou z dvoch samostatných výstupných veličín procesu rozpojovania hornín, ktoré závisia od prítlaku (a tiež od otáčok), a to od rozpojovacieho výkonu  $P$  a okamžitej rýchlosti postupu  $\nu$ . Rozpojovací výkon  $P$  je podľa poznatkov pri rozpojení horniny s konštantnými vlastnosťami a pri konštantných otáčkach lineárne závislý od prítlaku. Analytickým postupom z predpokladu (3) odvodili pre energiu rozpojenia a intenzitu objemovej energie rozpojenia vzťahy:

$$W = \frac{\sigma_M^2}{2E} V, \quad (J.m^{-3}) \quad (4)$$

$$w = \frac{\sigma_M^2}{2E}, \quad (J.m^{-3}) \quad (5)$$

kde  $\sigma_M$  je napätie v okamihu porušenia. Vzťah (5) sa stal základom tzv. energetickej teórie pevnosti, ktorá má v súčasnosti široké uplatnenie v praxi pri hodnotení energetickej náročnosti procesu rozpojovania hornín. Hlavná časť energie sa podľa súčasných interpretácií tejto teórie spotrebuje na tvorbu nových povrchov vznikajúcich produktov rozpojenia alebo na plastické deformácie.

Podľa Rodionova a Melnikova, hlavný podiel energie rozpojenia ide na procesy porušenia v okolitej zóne vzniku napätí a deformácií, t.j. v kontaktnej zóne. Novik udáva pre hodnotenie intenzity energie rozpojenia formálne zhodný vzťah, ale definované napätie je tlakové.

Fyzikálne je korektnosť tejto teórie zaručená len vtedy, keď za procesom pružnej deformácie nasleduje plastická deformácia a nie ihneď porušenie. Preto sa v mnohých prácach predpokladá, že pri rozpojení existuje aj štádium plastickej deformácie aspoň na mikroúrovni, Rodionov, Oksanič, Mironov. Ďalšou teóriou bola Rebinderova teória. Rebinder rozborom teórií Rittingera a Kick Kirpičeva prišiel k záveru, že pri pôsobení mechanických síl na makroskopické teleso, nové povrchy porušenia vznikajú až po predchádzajúcom naakumulovaní deformačnej energie v objeme telesa, a po prekročení medze pevnosti sa len časť energie transformuje na tieto povrchy. Ostatná časť deformačnej energie sa po zániku napätí uvoľní vo forme tepla. Tento záver formálne vyjadril výrazom:

$$W = \gamma \Delta S + Q, \quad (J.m^{-3}) \quad (6)$$

kde  $\gamma$  je merná povrchová energia a  $Q$  je teplo úmerné deformovanému objemu. Rebinder a kol.(1941) rovnicu (6) pretransformovali na tvar:

$$A = A_D + A_S = \frac{\sigma^2}{2E}V + \gamma\Delta S, \quad (J) \quad (7)$$

z ktorej vidieť, že vznikla syntézou výrazov (5) a (1). V rovnici (7) je  $A_D$  práca pružných deformácií a  $A_S$  práca spotrebovaná na tvorbu nových povrchov. Základné postuláty týchto energetických koncepcií porušenia a rozpojenia využívajú ďalšie teórie [4, 5].

Druhý prístup k tvorbe modelov procesu rozpojovania je špecifickejší, pretože sa opiera o samotný sprievodný akustický signál. Pre isté účely, napr. aj pre účely riadenia, je možné definovať tzv. parametrické modely, ktoré síce svojou štruktúrou nezodpovedajú skutočnej štruktúre modelovaného procesu, ale kvantitatívne vystihujú buď jeho niektoré vlastnosti alebo identifikujú a klasifikujú jeho aktuálny stav. Tento druhý prístup je v rámci výskumu realizovaný.

### 3. Experimenty a riešenia využitia akustického signálu pre riadenie procesu vŕtania

Výskum problematiky efektívneho riadenia procesu rozpojovania hornín rotačným vŕtaním vychádza z predstavy, že proces vŕtania horniny je možné definovať vo vhodne zvolenom stavovom priestore. Potom metódou vektorového kvantovania tohto stavového priestoru pri určitom nominálnom režime vŕtania je možné rozlišovať a klasifikovať kategórie rozpojovaných hornín podľa ich geomechanických vlastností. Ako efektívny režim vŕtania aktuálnej rozpoznej horiny sa následne automaticky stanovuje režim z tzv. kódovej knihy vzorov, kde sa vyberie optimálny režim práve rozpoznej kategórie. Jadrom výskumu je hľadanie vhodných stavových veličín procesu medzi rôznymi parametrami sprievodného akustického signálu.

Úlohou vektorového kvantovania je realizovať zobrazenie  $F_C$  množiny všetkých vstupných vektorov  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  zo spojitého (v amplitúde) vektorového priestoru  $V_n(R)$  do konečnej diskretnej množiny  $A_L$  vektorov  $a_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}]^T$  toho istého vektorového priestoru. Symbolicky toto zobrazenie vyjadríme zápisom:

$$F_C : \{x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T\}_{i=1}^{\infty} \rightarrow \{a_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}]^T\}_{i=1}^L \quad (8)$$

kde  $x_i, a_i \in V_n(R)$ . Toto zobrazenie je dané predpisom, ktorý vyjadruje optimálnu hodnotu vhodne zvoleného kritéria podobnosti medzi vstupným vektorom  $x_k \in V_n(R)$  a jemu priradeným vzorom  $a_{ck} \in A_L \subset V_n(R)$ . Index  $k$  tu vyjadruje skutočnosť, že algoritmus zobrazenia sa realizuje cyklicky v diskretných časových krokoch. Vhodným kritériom výberu vzoru pri definovanom zobrazení môže byť napr., minimálna vzdialenosť medzi vstupným vektorom a jemu priradeným vzorom v zmysle vzťahu (8):

$$\begin{aligned} a_c : |x_k - a_{ck}| &= \min\{|x_k - a_{ik}|\}_{i=1}^L = \\ &= \min\{(\sum_{j=1}^n (x_{jk} - a_{ij})^2)^{0.5}\}_{i=1}^L \end{aligned} \quad (9)$$

Vo vzťahu (9) je  $x_k$  aktuálny vstupný vektor v časovom kroku  $k$ ,  $a_{ck}$  je priradený vzor splňujúci podmienku minimálnej vzdialenosti k vstupnému vektoru v porovnaní so všetkými ostatnými vzormi z množiny  $A_L$ . Inými slovami povedané, vstupný vektor  $x_k$  je

aproximovaný jemu najbližším vzorom  $a_{ck}$ . Kľúčom k úspešnosti klasifikácie touto metódou vektorového kvantovania je návrh kvalitnej kódovej knihy  $A_L$ .

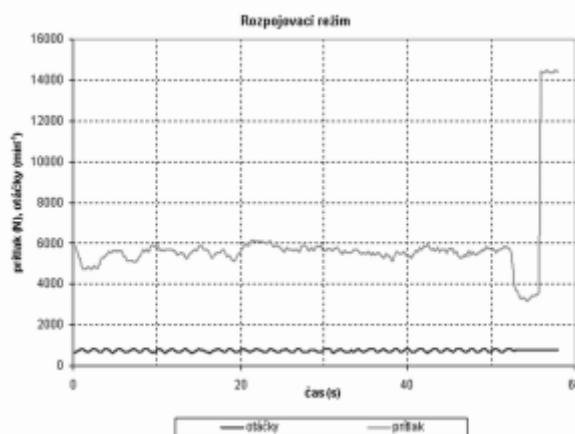
Ťažiskom doterajšieho výskumu v tejto oblasti, založenej na riešení úlohy efektívneho riadenia rozpojovania horniny v stavovom priestore procesu, bolo hľadanie takých metód a algoritmov spracovania sprievodného akustického signálu, ktorých výsledky by preukazovali dostatočnú citlivosť na geomechanické vlastnosti hornín a na samotný režim vrtania. Takéto výsledky spracovania signálu je potom možné využiť ako prvky stavového vektora  $x(t)$  pre účely vektorového kvantovania stavového priestoru procesu vrtania. Pozitívne výsledky boli dosiahnuté pri definovaní stavového vektora procesu, ktorý by v dostatočnej miere charakterizoval špecifické vlastnosti procesu rozpojovania jednotlivých tried hornín [6, 7, 8]. V rámci výskumu boli využité metódy a algoritmy z týchto oblastí:

- výpočet štatistických charakteristík časového priebehu signálu pri nominálnom režime (dané otáčky a prítlak),
- spektrálna analýza akustického signálu, algoritmus frekvenčnej lupy (DFT zoom),
- vizualizácia spektrogramu signálu a vybrané metódy jeho spracovania ako obrazu,
- parametrické modelovanie procesu rozpojovania pomocou Wienerovho filtra.

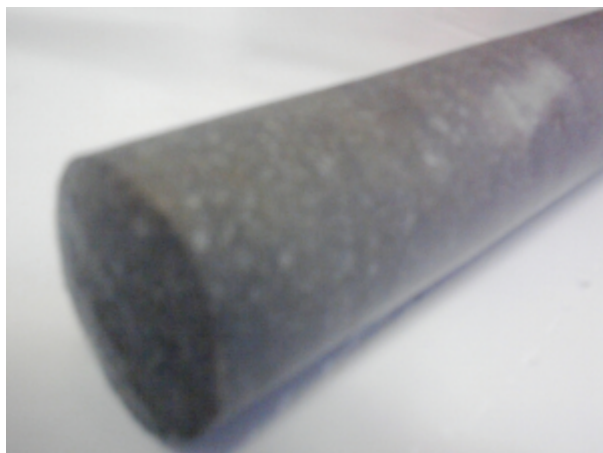
V uvedených oblastiach boli skúmané viaceré dielčie algoritmy spracovania signálu. Výsledkom sú aj niektoré nové modifikácie klasických postupov, čím sa zvýšil predpoklad úspešnej klasifikácie hornín na základe sprievodného akustického signálu.

#### a) časový priebeh signálu pri nominálnom režime (dané otáčky a prítlak)

Na výskum vlastností sprievodného akustického signálu z procesu rozpojovania boli použité záznamy signálov, nameraných na vrtnom stande v spolupráci s pracovníkmi ÚGT SAV v Košiciach. Analýza akustických signálov bola prevedená na troch tried hornín, a to andezit, vápenec a žula. Horniny boli rozpojované pri rôznych pracovných režimoch vrtania, pričom snahou bolo meniť prítlak, ale otáčky stabilizovať. Samotné meranie bolo realizované vždy po dobu  $t=50s$  s frekvenciou vzorkovania  $f_{vz}=44100Hz$ , teda s periódou vzorkovania  $T_{vz} = 23\mu s$ . Na ( Obr.3 ) je znázornený jeden z režimov rozpojovania horniny, ak otáčky a prítlak sú udržiavané v priebehu vrtania na konštantnej hodnote.



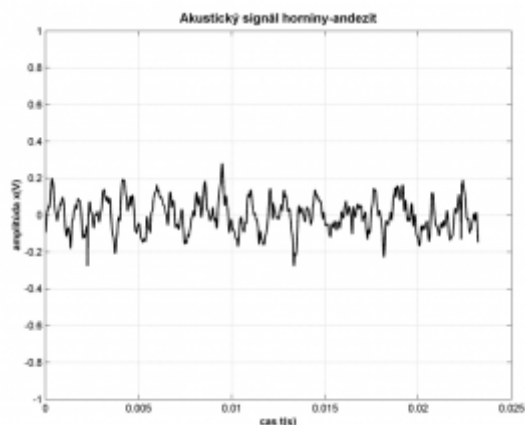
Obr. 3: režim rozpojovania andezitu



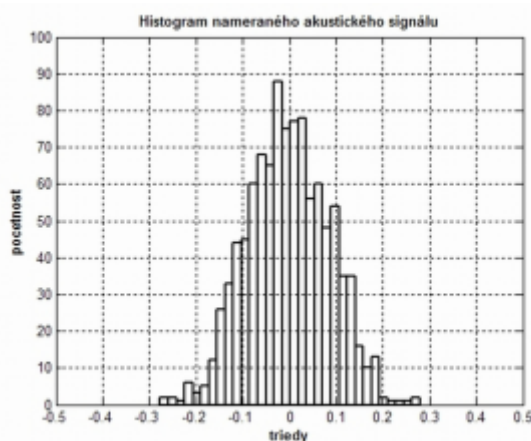
*Obr. 4: hore andezit Ruskov, dole vŕtané jadro andezitu*

V nasledujúcom je na príklade rozpojovania andezitu demonštrovaný postup pri spracovaní akustických signálov v časovej oblasti. Rozpojovanie andezitu bolo realizované pri rozpojovanom režime s prítlakom  $F=5825\text{N}$  a otáčkach  $n=762\text{ ot.min}^{-1}$ . Analyzovaný segment signálu je daný voľbou dĺžky okna, teda počtom vzoriek. V našom prípade sme zvolili  $n=1024$  vzoriek. Z týchto  $n$  vzoriek boli vypočítané štatistické charakteristiky, ktoré v tomto príspevku neuvádzam. Pre názornosť uvediem časový priebeh akustického signálu s  $n=1024$  vzoriek (Obr. 5).

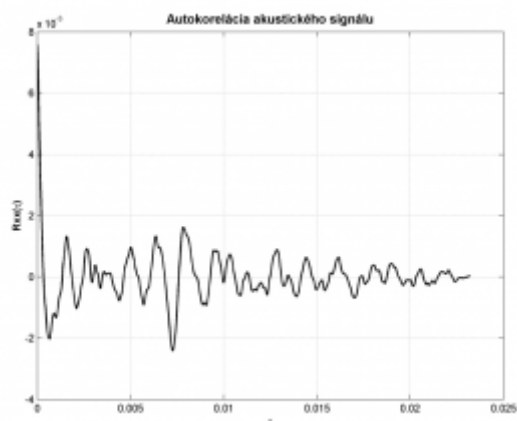
Dôležitým ukazovateľom charakteru akustického signálu  $x(t)$  v časovej oblasti je histogram (Obr. 6). Ďalšou dôležitou štatistickou charakteristikou v časovej doméne je autokorelačná funkcia  $R_{xx}(\tau)$  zosnímaného akustického signálu  $x(t)$ . Autokorelačná funkcia  $R_{xx}(\tau)$  signálu z rozpojovania andezitu rotačným vŕtaním je vypočítaná z  $n=1024$  vzoriek. Na obrázku (Obr. 7) je autokorelácia akustického signálu  $x(t)$  z rozpojovania andezitu. Z priebehu autokorelačnej funkcie  $R_{xx}(\tau)$  je vidieť, že zosnímaný akustický signál z rozpojovania andezitu je kváziperiodický so silnou stochastickou zložkou.



Obr. 5: časový priebeh akustického signálu z vrtania andezitu



Obr. 6: časový priebeh akustického signálu z vrtania andezit



Obr. 7: autokorelácia akustického signálu z vrtania andezitu

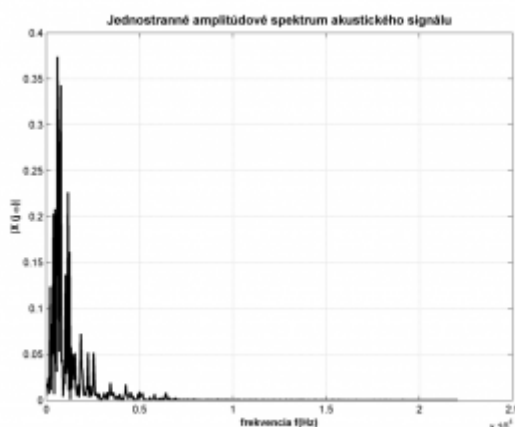
Takýmto spôsobom boli v časovej oblasti spracované všetky sprievodné akustické signály troch hornín (andezit, žula vápenec) s viacerými režimami vrtania. Uvedené časové charakteristiky signálu v dostatočnej miere analyzujú jeho vlastnosti. V prípade dynamických zmien režimu, ku ktorým dochádza napr. pri zmene typu rozpojovanej horniny, je výhodnejšie sledovať odpovedajúce zmeny vlastností sprievodného akustického signálu vo frekvenčnej oblasti.

#### **b) spektrálna analýza akustického signálu, algoritmus DFT zoom**

V nasledujúcom je demonštrované využitie algoritmu DFT ako diskkrétnej modifikácie

metódy FFT. Analyzované bolo amplitúdové spektrum signálu z procesu rozpojovania hornín rotačným vrtaním. Algoritmus DFT bol použitý pri vzorkovacej frekvencii  $f_{vz}=44,1$  kHz a dĺžke segmentu  $n=1024$ .

Zo zosnímaného akustického signálu  $x(t)$  z vrtania sme potom pomocou DFT vytvorili spektrá  $X(j\omega)$  signálu  $x(t)$ . Pre dostatočné rozpoznanie dominantných frekvencií ako prvé postačovalo použiť  $n=1024$  vzoriek zosnímaného signálu, pričom frekvencia vzorkovania bola  $f_{vz}=44100$  Hz. Z jednotlivých spektier vybraných hornín teda môžeme identifikovať dominantné (nosné, výrazné) frekvencie. Pri týchto frekvenciách je výrazná amplitúda. Frekvenčné spektrum akustického signálu  $x(t)$  pri rozpojovaní andezitu vrtaním je na obrázku (Obr. 8) z  $n=1024$  počtu vzoriek.



Obr. 8: Frekvenčné spektrum akustického signálu z vrtania andezitu

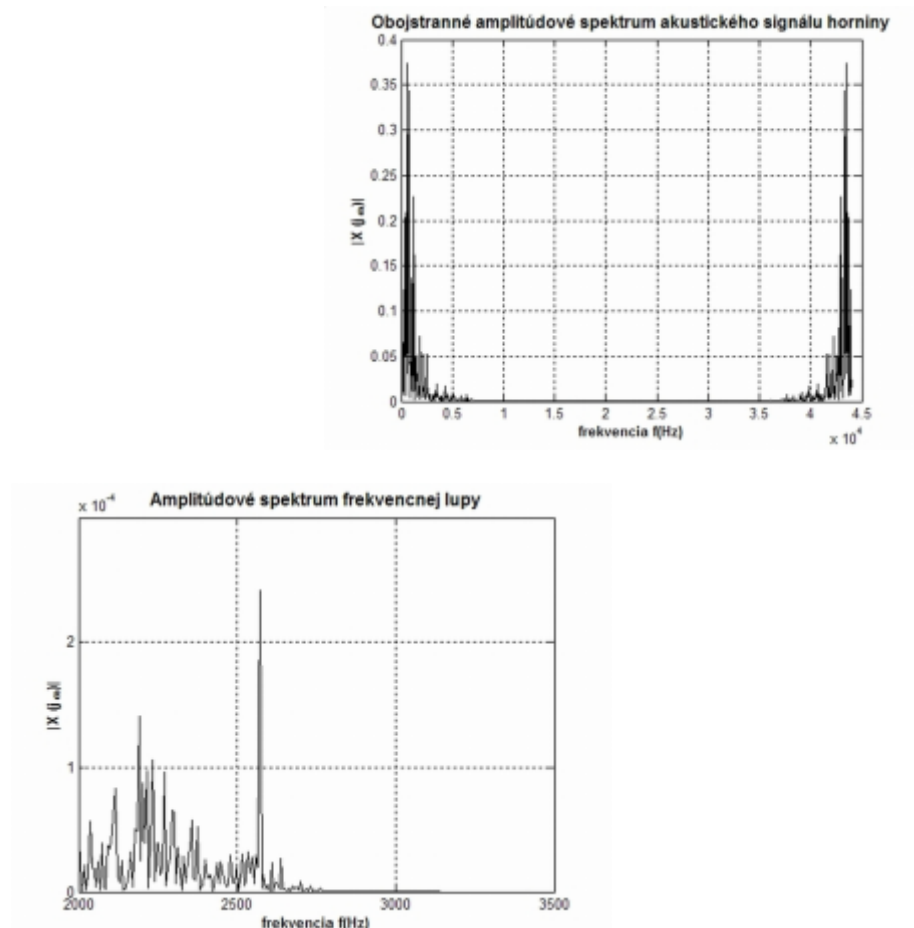
Z frekvenčného spektra pre rozpojovaný andezit a pri danom rozpojovacom režime je zrejmé, že významné zložky sa vyskytujú na určitom frekvenčnom pásme do 4000 Hz. Môžeme tu sledovať 9 resp. 10 dominantných frekvencií. Toto spektrum charakterizuje rozpojovanie andezitu pri rozpojovacom režime s prítlakom  $F=5825$  N a otáčkach  $n=762$  ot.min<sup>-1</sup>.

### Algoritmus frekvenčnej lupy (DFT zoom)

Na základe klasickej metódy DFT bol vypracovaný a zrealizovaný algoritmus tzv. frekvenčnej lupy (DFT zoom), ktorý umožňuje vykonávať frekvenčnú analýzu sprievodných akustických signálov, získaných z procesu rozpojovania horniny, a to pri zvýšenom frekvenčnom rozlíšení. Ide o modifikáciu diskkrétnej Fourierovej transformácie. Algoritmus pozostáva z týchto základných krokov:

1. antialiasingová filtrácia signálu,
2. frekvenčné posunutie signálu o hodnotu tej frekvencie, okolie ktorej je potrebné podrobnejšie analyzovať,
3. odstránenie postranného pásma signálu pomocou Hilbertovej transformácie,
4. umelé zníženie frekvencie vzorkovania signálu jeho viacnásobne opakovanou decimáciou,
5. výpočet spektra signálu algoritmom DFT (resp. FFT).

Efekt navrhnutého algoritmu frekvenčnej lupy je demonštrovaný na (Obr.9).

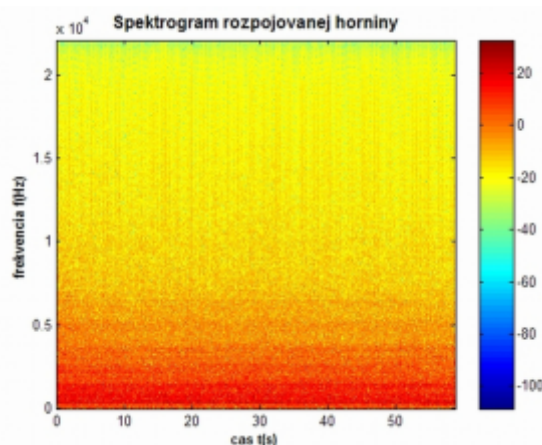


Obr. 9: Ukážka použitia algoritmu frekvencnej lupy pri analýze sprievodného akustického signálu z rozpojovania andezitu, hore: spektrum signálu na rozsahu 0-44,1 kHz, fr. rozlíšenie  $\Delta f=40$  Hz, dole: spektrum signálu na rozsahu 2-3 kHz, fr. rozlíšenie  $\Delta f=2$  Hz

### c) Spektrogramy akustických emisií

Spektrogram signálu vyjadruje časový priebeh jeho spektra. V rámci výskumu bol rozvíjaný súbor postupov výpočtu a spracovaní spektrogramov, pričom za originálny je možné považovať prístup k spektrogramu ako k obrazovej informácii. Jej číslcová interpretácia umožňuje pri klasifikácii aplikovať niektoré užitočné postupy z oblasti image processingu.

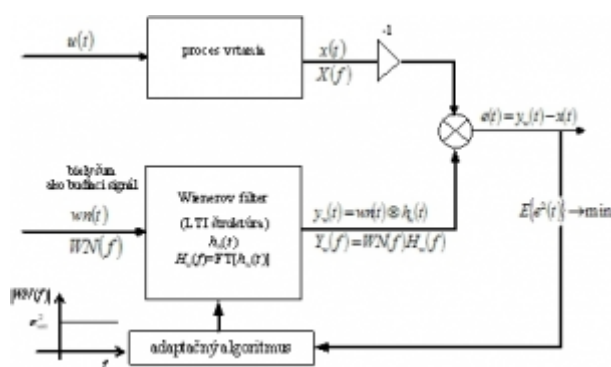
Ak na rozpojovanú horninu v danom časovom okamihu začneme pôsobiť predom definovanou zmenou režimu vrtania (napr. zvýšením prítlaku o stanovenú hodnotu), prejaví sa to adekvátnou zmenou v spektrograme sprievodného signálu. Táto zmena sa javí byť charakteristickou pre jednotlivé kategórie hornín. Spektrogram signálu z priebehu takejto "identifikácie" horniny môže predstavovať stavový vektor pre následnú klasifikáciu rozpojovanej horniny metódou vektorového kvantovania [9].



Obr.10: Spektrogram akustických emisií pri vŕtaní do andezitu

#### d) Wienerov filter ako parametrický model procesu vŕtania

Wienerov filter je na svojom vstupe budený bielym šumom. Koeficienty filtra sa adaptačným algoritmom nastavujú tak, aby výstupný signál z tohto filtra sa čo najviac zhodoval so snímaným sprievodným akustickým signálom z procesu vŕtania. Potom parametre tohto filtra predstavujú tzv. parametrický model procesu. Experimenty ukázali, že Wienerov filter dostatočne vysokého rádu ( $>1000$ ) vykazuje veľmi malú chybu tejto aproximácie a je dostatočne citlivý na geomechanické vlastnosti rozpojovanej horniny. Preto jeho parametre je možné uvažovať ako prvky stavového vektora procesu v zmysle vyššie uvedeného.



Obr.11: Adaptívny parametrický model procesu vŕtania na báze Wienerovho filtra

Modifikované adaptívne metódy patria v súčasnosti k moderným prostriedkom pri identifikácii nelineárnych systémov. V našom prípade ním bol akustický prejav z procesu rozpojovania hornín rotačným vŕtaním. Akustický prejav z procesu vŕtania má stochastický charakter. Pri aplikácii adaptívnych filtrov na akustický prejav z procesu vŕtania sa ukázalo, že adaptívne metódy sú vhodné na identifikáciu tohto systému [10, 11].

#### Záver

Predložený príspevok bol venovaný výskumu metód a algoritmov spracovania akustického signálu z procesu rozpojovania hornín rotačným vŕtaním. Prezентuje stav riešenia výskumu využitia akustických emisií pri efektívnom riadení procesu vŕtania. Uvedené skutočnosti predstavujú východisko pri klasifikácii hornín vo vzťahu k odpovedajúcemu efektívnemu režimu vŕtania.

Príspevok ukazuje spôsob spracovania signálu z procesu vŕtania s využitím metód a modifikovaných algoritmov pre jeden typ horniny (andezit) a režim vŕtania. Prezentované metódy a algoritmy boli vrámci výskumu aplikované na tri typy hornín (andezit, vápenec, žula) pri rôznych režimoch vŕtania. Výskum momentálne pokračuje smerom k prehĺbovaniu vedomostí o korelácii medzi geomechanickými vlastnosťami určitých tried hornín a vlastnosťami akustického signálu pri ich vŕtaní. Výskum bude napredovať aj modernizáciou vrtného standu.

## Literatúra:

1. Krepelka, F., Futó, J., Labaš, M.: Analýza akustického signálu snímaného pri procese vŕtania hornín, In: Zborník Fakulta BERG: Geotechnika-Geotechnics 2000, Košice: F BERG, 2000, s. 130-131, ISBN 80-7099-588-2.
2. Krepelka, F., Futó, J., Labaš, M.: Monitorovanie vrtného procesu s využitím akustického signálu, Acta Montanistica Slovaca, Ročník 5, č.3 (2000), s.237-240.
3. Krepelka, F., Labaš, M., et al.: Hodnotenie vibrácií v časovej oblasti a štatistickými znakmi pri vŕtaní hornín In: Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava Vol. 10, no. 2 (2010), p. 53-60 ISSN: 1213-1962
4. Krúpa, V., Pinka, J.: Rozpojovanie hornín, monografia, TU Košice, F BERG, Vydavateľstvo Štroffek Košice, Košice 1998, ISBN 80-88896-10-X.
5. Leššo, I.: Teória signálov pre priemyselnú informatiku, ES/AMS FBERG TU v Košiciach, 2004, p.316, ISBN:80-8073-186-1.
6. Leššo, I., Flegner, P., et al.: Research of the possibility of application of vector quantisation method for effective process control of rocks disintegration by rotary drilling. In: Metalurgija. Vol. 49, no. 1 (2010), p. 61-65. ISSN 0543-5846 Spôsob prístupu:  
[http://public.carnet.hr/metalurg/Metalurgija/2010\\_vol\\_49/No\\_1/MET\\_49\\_1.pdf](http://public.carnet.hr/metalurg/Metalurgija/2010_vol_49/No_1/MET_49_1.pdf)
7. Leššo, I., Flegner, P., et al.: Špecifikácia príznakov procesu rozpojovania hornín rotačným vŕtaním pre účely riadenia procesu. In: Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava : řada stavební. Vol. 9, no. 2 (2009), p. 155-165. - ISBN 978-80-248-2119-1 - ISSN 1213-1962
8. Leššo, I., Horovčák, P., Flegner, P.: Hodnotenie metód spracovania signálu snímača z hľadiska teórie informácie AT&P journal, 4/2004, p.70-73, ISSN 1335-2237.
9. Leššo, I., Flegner, P.: Vizualizácia spektrogramov. In: DIS 2006 - Teória a aplikácia metód technickej diagnostiky, IX. Ročník Medzinárodnej vedeckej konferencie. Košice : TU, 2006 7 s. - ISBN 8023202715.
10. Flegner, P., Leššo, I.: Využitie adaptívnych filtrov pri identifikácii procesu rozpojovania hornín rotačným vŕtaním. In: DIS 2006. -Košice : TU, 2006 s. 1-10. - ISBN 8023202715
11. Flegner, P., Leššo, I., Pandula, B.: Wienerov predikčný filter ako parametrický model procesu rozpojovania hornín rotačným vŕtaním. In: Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Vol. 7, no. 2 (2007), p. 51-59. - ISSN 1213-1962

Spoluautorom článku je prof. Ing. Igor Leššo, CSc., Ústav riadenia a informatizácie výrobných procesov, Fakulta baníctva, ekológie, riadenia a geotechnológií, Technická univerzita v Košiciach

