

Igor LEŠŠO<sup>1</sup>, František KREPELKA<sup>2</sup>, Patrik FLEGNER<sup>3</sup>, Blažej PANDULA<sup>4</sup>

VÝSKUM METÓD ZABEZPEČENIA KVALITY PROCESU ROZPOJOVANIA HORNÍN  
ROTAČNÝM VRTANÍM

RESEARCH OF METHODS FOR QUALITY EVALUATION OF ROCKS DESINTEGRATION  
BY ROTARY DRILLING

**Abstract**

The subject of the paper is investigation of the properties of concurrent vibro-acoustic signal in the process of rock massif separation with the method of rotary drilling. The aim is to investigate the possibilities of using this signal as an integrating information source for the purposes of identification of the process of separation from the viewpoint of efficiency of the set mode (pressure, revolutions, indenter) under current geotechnical conditions.

**Key words:** acoustic signal, rotary drilling

**Úvod**

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 (Strnište, 1988; Strnište, 1992; Trnka et al., 1969).

Každý proces mechanického rozpojovania horniny, a teda aj proces hlbinného vrtania, môžeme rozdeliť do dvoch oblastí, a to do oblasti povrchového rozpojovania a oblasti objemového rozpojovania hornín.

Pri povrchovom rozpojení sa trecie plochy (pracovná plocha indentora a styčná plocha horniny) postupne opotrebovávajú. Objemové rozpojení je charakterizované vylamovaním častíc z horniny, pri ktorom vynaložená energia je priamo úmerná novovytvorenému povrchu. Pretože najefektívnejšie rozpojení je v objemovej oblasti, tento príspevok sa zaoberá práve touto oblasťou s prihliadnutím na vlastnosti rozpojovaných hornín, pracovného nástroja a pracovného režimu.

Charakteristika horniny vo vzťahu k vrtaniu sa označuje ako rozpojiteľnosť a vyjadruje schopnosť horniny odolávať rozpojeníu nástrojom a aktívne narušat' jeho pracovné vlastnosti tak, že účinnosť nástroja klesá. Proces rozpojovania horniny potom závisí od:

- rozpojiteľnosti rozpojovanej horniny,
- pracovných vlastností nástroja, ktorými sa proces uskutočňuje,
- spôsobu práce použitého nástroja.

Teoretický výskum rozpojovania hornín rotačným vrtaním a následné experimenty na vrtnom stane ukázali (Krupa & Pinka, 1998; Sekula, 1992), že existuje optimálny režim vrtania z hľadiska mernej spotreby energie  $w$  ( $J/m^3$ ), z hľadiska opotrebovania rozpojovacieho nástroja, ale aj z hľadiska rýchlosti vrtania  $v$  (m/s). Tieto tri kritéria optimálneho režimu sú splnené približne v jednom

<sup>1</sup> prof. Ing., CSc., TU v Košiciach, FBERG, Katedra informatizácie a riadenia procesov, ul. B. Němcovej 3, Košice, Slovenská republika, igor.lesso@tuke.sk

<sup>2</sup> host' doc., Ing., CSc., ÚGT SAV, ul. Watsonova 45, Košice, Slovenská republika, krepelka@saske.sk

<sup>3</sup> Ing., PhD., TU v Košiciach, FBERG, Katedra informatizácie a riadenia procesov, ul. B. Němcovej 3, Košice, Slovenská republika, patrik.flegner@tuke.sk

<sup>4</sup> Doc., RNDr., PhD., TU v Košiciach, FBERG, Katedra dobývania ložísk a geotechniky, Park Komenského 16, Košice, blazej.pandula@tuke.sk

(efektívnom) pracovnom režime (optimálne otáčky  $-n_{opt}$ , optimálny prítlak  $-F_{opt}$ ). 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.

### 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 (Šutek & Varga, 1981; Mikleš & Hutla, 1986; Grewal & Andrews, 2001).

Kľúčovou otázkou na začiatku riešenia riadiaceho systému procesu rozpojovania je dostatok informácií o vplyve režimu vrtania na samotný priebeh rozpojovania konkrétnej horniny. Pod pojmom režim rozpojovania rozumieme synergetický efekt hlavných technologických zložiek procesu vrtania. Hlavnými riadiacimi veličinami sú prítlak vrtného nástroja na čelo vrtu  $F(N)$ , otáčky vrtného nástroja  $n$  (ot.s<sup>-1</sup>), prietok výplachu za časovú jednotku  $Q$  (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) 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.

Prítlak  $F$  je sila rovnobežná s osou vrtnej kolóny a má za úlohu vtlačať brit vrtného nástroja do horniny. Pre lepšie posúdenie režimu vrtania sa však používa aj pojem merný prítlak dosadacej plochy britu s horninou, udávaný v (Pa). Tento merný prítlak musí byť väčší ako vtláčaná pevnosť horniny, inak nedôjde k objemovému spôsobu rozpojovania horniny a vrtanie prebieha len vzájomným obrusovaním nástroja a horniny. Prítlak s použitím merného prítlaku sa vypočíta podľa vzťahu (Krupa & Pinka, 1998; Sekula, 1992):

$$F = S\sigma_{mer} > S\sigma_{vtl}, \quad (1)$$

kde  $F$  - je prítlak (N),

$S$  - dosadacia plocha všetkých britov nástroja (m<sup>2</sup>),

$\sigma_{mer}$  - merný prítlak nástroja na horninu,

$\sigma_{vtl}$  - vtláčaná pevnosť horniny (Pa).

V priebehu rozpojovania sa však brity nástroja otupujú, t.j. dosadacie plošky britu sa zväčšujú a preto je potrebné zvyšovať aj prítlak, aby podmienka daná vzťahom (1) bola splnená. Prítlak je možné však zvyšovať len po určité hranice, ktorá môže byť daná napr. technologickými parametrami vrtnej súpravy.

Otáčky vrtnej kolóny sa udávajú obvykle počtom otáčok za minútu, vzhľadom na sústavu SI je zavedená jednotka (s<sup>-1</sup>). Podobne ako pri prítlaku musíme pri rozbere režimu použiť merné jednotky, ktorou je tu obvodová rýchlosť britu udávaná v metroch za sekundu (m.s<sup>-1</sup>)

$$\omega = 0,026 n(D + d), \quad (2)$$

kde  $\omega$  - obvodová rýchlosť stredy britu (m.s<sup>-1</sup>),

$n$  - otáčky vrtnej kolóny (s<sup>-1</sup>),

$D$  - rezný priemer korunky (m),

$d$  - jadrový priemer koruniek (m).

V prípade, že pre určitý druh britu je odporúčaná obvodová rýchlosť, musíme pre rôzne priemery korúnok vybavenými týmito britmi vypočítať odporúčané otáčky podľa vzťahu:

$$n = \frac{38,2\omega}{D + d} \quad (3)$$

Otáčky vrtného nástroja sa stanovujú s prihliadnutím na hĺbku vrtu, priemer vrtu, druh výplachu a technologické parametre použitej vrtnej súpravy.

Výplach vrtu musí byť dimenzovaný po kvalitatívnej aj po kvantitatívnej stránke tak, aby mohol čo najlepšie plniť svoju úlohu vynášať drť z čela vrtu.

Definícia optimálneho režimu rozpojovania nie je jednoduchá, pretože kritéria pre samotnú definíciu môžu byť rôzne. Môžeme však konštatovať, že hlavnú úlohu budú zohrávať geologické, technické a ekonomické hľadiská.

Zo systémového hľadiska je proces vrtania horniny možné zjednodušené chápať ako systém, charakterizovaný súborom veličín, z nich niektoré vieme ovplyvňovať, ale niektoré nie. Na vstupe systému definujeme tieto riadiace veličiny:

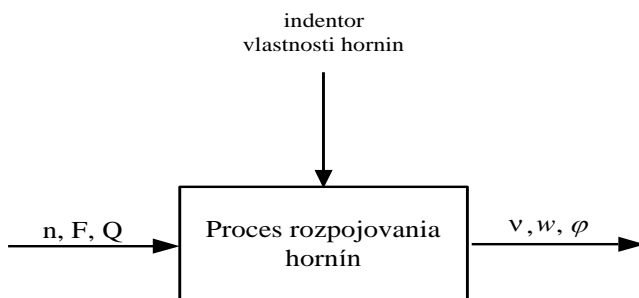
- otáčky vrtného nástroja  $n$  ( $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ),
- prítlačná sila (prítlak)  $F$  (N),
- množstvo výplachu vrtu vodou  $Q$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

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  $\varphi = v/w$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{m}^3$ ),

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

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

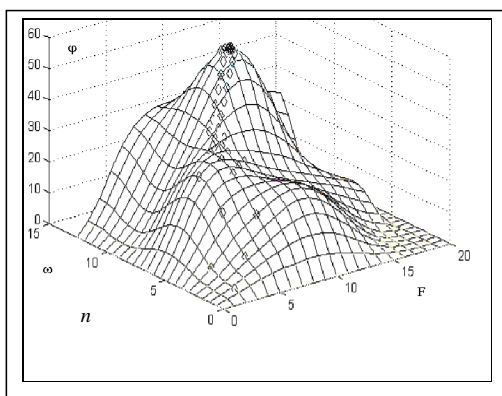


**Obr.1** Proces rozpojovania horniny ako objekt riadenia, riadený systém.

### Použitie prístupov a metód

Dôležité a inšpirujúce výsledky výskumu v tejto oblasti boli v minulosti dosiahnuté na pracovisku ÚGT SAV v Košiciach. Experimentami na vŕtnom stande bol preukázaný tvar účelovej funkcie  $\varphi = \varphi(n, F)$ , kde  $\varphi$  je aktuálny pomer  $v/w$  (Sekula, 1992; Sekula et al., 1991; Sekula & Grexová, 2001) (Obr.2). Ide o plochu s globálnym extrémom, možné sú však aj lokálne extrémny. Extrém môže byť aj na hranici technologických obmedzení.

Na základe uvedeného bola v (Leššo, 2004) sformulovaná optimalizačná úloha pre rozpojovanie hornín rotačným vŕtaním. Táto úloha má dve čiastkové kritéria optimality, jedno pre rýchlosť vŕtania ( $J_v$ ) a druhé pre mernú energiu rozpojovania ( $J_w$ ). Ich vzájomným pomerom dostávame celkové optimalizačné kritérium (účelovú funkciu)  $J_\varphi$ . Pri hľadaní riešenia tejto optimalizačnej úlohy musia byť splnené aj obidve technologické obmedzenia  $S_n$  a  $S_F$  (pre otáčky a prítlak).



**Obr.2** Predpokladaný tvar účelovej funkcie  $\varphi = \varphi(n, F)$  pre úlohu optimálneho riadenia procesu vŕtania.

Takto formulovaná úloha optimálneho riadenia procesu vŕtania je úlohou nelineárneho programovania. Predpokladáme, že účelová funkcia  $J_\varphi$  ako kritérium optimality je spojitou funkciou riadiacich premenných  $n$  a  $F$ :  $J_\varphi = J_\varphi(n, F)$ . Tiež je možné očakávať, že táto funkcia má spojitú prvú a druhú deriváciu podľa  $n$  a  $F$ . Pre lokálne maximum v bode  $(n', F')$  platí:

$$\text{grad } J_\varphi((n', F')) = \begin{bmatrix} \frac{\partial J_\varphi}{\partial n} \\ \frac{\partial J_\varphi}{\partial F} \end{bmatrix}_{(n', F')} = 0 \quad (4)$$

a pre determinanty Hessových matic  $J_{\varphi,xx}$  platí:

$$\det J_{\varphi,xx}((n', F')) = \det \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 J_\varphi}{\partial n^2} \end{bmatrix}_{(n', F')} = \left| \frac{\partial^2 J_\varphi}{\partial n^2} \right|_{(n', F')} < 0 \quad (5)$$

$$\det J_{\varphi, n, F}((n', F')) = \det \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 J_{\varphi}}{\partial n^2} & \frac{\partial^2 J_{\varphi}}{\partial n \partial F} \\ \frac{\partial^2 J_{\varphi}}{\partial F \partial n} & \frac{\partial^2 J_{\varphi}}{\partial F^2} \end{bmatrix}_{(n', F')} = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 J_{\varphi}}{\partial n^2} & \frac{\partial^2 J_{\varphi}}{\partial n \partial F} \\ \frac{\partial^2 J_{\varphi}}{\partial F \partial n} & \frac{\partial^2 J_{\varphi}}{\partial F^2} \end{vmatrix}_{(n', F')} > 0. \quad (6)$$

Určenie extrémú kritéria optimality na základe uvedených vzťahov (4), (5) a (6) naráža na problém, že nepoznáme analytický tvar tejto účelovej funkcie  $J_{\varphi}$ . Z týchto dôvodov bol výskum orientovaný dvomi smermi:

- 1) efektívne riadenie procesu s priebežným vyhodnocovaním nepriamo meranej účelovej funkcie  $\varphi$ ,
- 2) výber efektívneho režimu procesu na základe priebežného rozpoznávania (klasifikácie vektorovým kvantovaním) geomechanických vlastností práve rozpojovaného horninového masívu ; výber režimu sa uskutoční z off – line zostavenej knihy vzorov.

V oboch prípadoch sa navrhované riešenia opierajú o spracovanie sprievodných vibro-akustických emisií z procesu vŕtania. V rámci výskumu na pracovisku Fakulty BERG TU v Košiciach v spolupráci s ÚGT SAV je už dlhšiu dobu skúmaná možnosť využitia sprievodného vibro-akustického signálu ako integrovaného informačného zdroja o stave procesu rozpojovania hornín rotačným vŕtaním. Východiskom je predstava, že na rozhraní indenter–hornina dochádza v procese vŕtania 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.

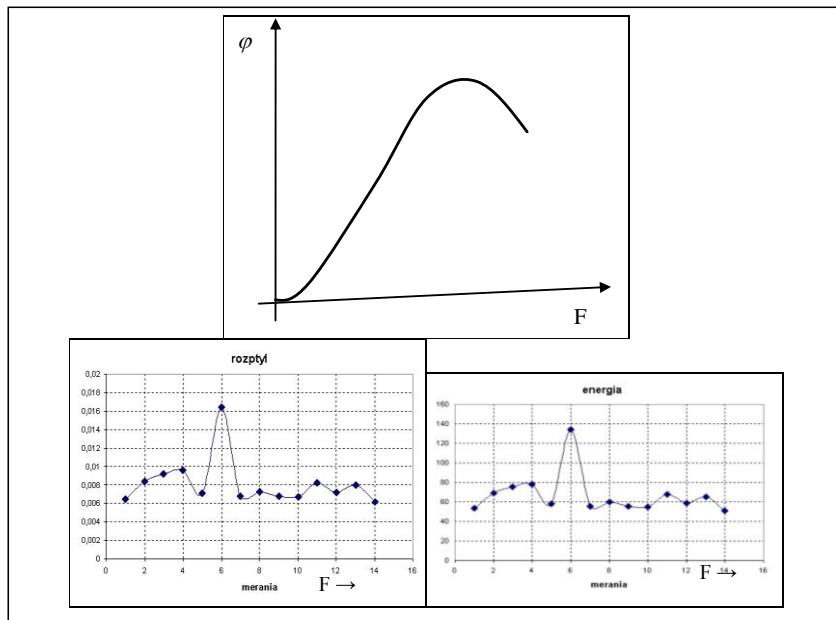
### Experimenty a riešenia v 1. oblasti

V prípade absencie analytického vyjadrenia účelovej funkcie je vhodné uvažovať s numerickými metódami pre hľadanie extrémú kritéria optimality. Na tomto mieste sa javí byť výhodnou gradientná metóda, kde namiesto znalostí analytického vyjadrenia účelovej funkcie ako funkcie otáčok a prítlaku vystačíme len s hodnotami tejto účelovej funkcie  $J_{\varphi}$  v aktuálnych režimoch vŕtania  $(n, F)$ . Podmienkou takéhoto riešenia riadiaceho systému procesu vŕtania je teda zvládnuť metódy merania aktuálnej hodnoty kritéria optimality procesu.

Na hľadanie extrémú tejto účelovej funkcie je potom možné použiť vhodnú modifikáciu gradientnej metódy, kedy malými zmenami otáčok a prítlaku v smere gradientu účelovej funkcie sa postupne dosiahne jej extrém.

Jedným z prvých čiastkových výsledkov uvedeného výskumu v oblasti sprievodných akustických emisií z procesu vŕtania bolo získanie poznatku o tom, že niektoré parametre sprievodného akustického signálu v časovej oblasti vykazujú extrém pri režime, ktorý je blízko optimálnemu režimu vŕtania (pri maximálnej hodnote pomerového kritéria  $\varphi = v/w$ ). Na obr. 3 hore je znázornený tvar závislosti pomerového kritéria  $\varphi$  na prítlaku  $F$  pri konštantných otáčkach. Táto závislosť bola experimentálne nameraná kalorimetricky na vŕtnom stande a bola publikovaná autormi v (Sekula, 1992; Sekula et al., 1991). V dolnej časti obrázku je znázornený priebeh rozptylu a energie akustického signálu pri vŕtaní andezitu v závislosti na prítlaku  $F$  ( $n = \text{konšt.}$ ). Tieto parametre signálu vykazujú extrém blízko prítlaku  $F_{\text{opt}}$ , pri ktorom pri daných konštantných otáčkach bola nameraná maximálna okamžitá rýchlosť vŕtania  $v$  a súčasne minimálna merná energia rozpojovania  $w$ . Pritom táto energia  $w$  bola odvodená na základe meraní elektrického príkonu hnacieho agregátu vŕtného standu. Podobné závislosti boli namerané aj pri vŕtaní vápenca a žuly.

Získaný poznatok umožňuje v ďalšom uvažovať o efektívnom riadení procesu rozpojovania hornín rotačným vrtaním gradientnou metódou, kde sa bude hľadať maximum rozptylu signálu akustických emisií ako nepriamo meranej hodnoty účelovej funkcie (kritéria optimality).



**Obr.3** Tvar experimentálne nameranej závislosti pomerového kritéria optimality vrtania v závislosti na prítlaku (Sekula, 1992; Sekula et al., 1991) -hore; priebeh závislosti rozptylu a energie sprievodného akustického signálu na prítlaku pri vrtaní andezitu -dole.

### Experimenty a riešenia v 2. oblasti

Druhý smer vo výskume problematiky efektívneho riadenia procesu rozpojovania hornín rotačným vrtaním vychádza z predstavy, že proces vrtania horniny je možné definovať vo vhodne zvolenom stavovom priestore (Šutek & Varga, 1981; Mikleš & Hutla, 1986; Grewal & Andrews, 2001). Potom metódou vektorového kvantovania (Gersho & Gray, 1992) tohto stavového priestoru pri určitom nominálnom režime vrtania je možné rozlišovať a klasifikovať (Jan, 2002; Kaláb et al.,) kategórie rozpojovaných hornín podľa ich geomechanických vlastností. Ako efektívny režim vrtania aktuálnej rozpoznanej horniny sa následne automaticky stanovuje režim z tzv. kódovej knihy vzorov, kde sa vyberie optimálny režim práve rozpoznanej kategórie. Jadrom výskumu je hľadanie vhodných stavových veličín procesu medzi rôznymi parametrami sprievodného vibro-akustického signálu.

Proces rozpojovania horniny rotačným vrtaním z hľadiska jeho riadenia je možné chápať vo všeobecnosti ako nelineárny dynamický systém, popísaný v stavovom priestore dvojicou nelineárnych diferenciálnych rovníc, ktorých vektorový tvar je

$$\mathbf{x}'(t) = \mathbf{X}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{z}(t)] \quad (7)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{Y}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{z}(t)], \quad (8)$$

kde  $X, Y$  sú vektorové obecné nelineárne funkcie premenných  $\mathbf{x}(t)$  -vektor stavových veličín,  $\mathbf{u}(t)$  -vektor riadiacich veličín,  $\mathbf{z}(t)$  -vektor poruchových veličín,  $\mathbf{y}(t)$  -vektor výstupných veličín. V súlade s vyššie charakterizovaným procesom rotačného vrtania môžeme konkretizovať vektor riadenia  $\mathbf{u}(t) = [n(t), F(t), Q(t)]$  a vektor výstupných veličín  $\mathbf{y}(t) = [v(t), \varphi(t)]$ . Vektor poruchových veličín môže zahŕňať napr. meniace sa vlastnosti samotného indentora, ale aj napr. náhodnú nehomogenitu horninového masívu. Kľúčovou otázkou v súvislosti s navrhovanou koncepciou riadenia procesu rozpojovania horniny rotačným vrtaním je definovanie stavového vektora  $\mathbf{x}(t)$ .

Popis procesu vrtania ako objektu riadenia v stavovom priestore jeho stavovým vektorom  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$  a následná aplikácia uvedenej koncepcie riadenia nám umožní vyhnúť sa nutnosti hľadať vhodný tvar nelineárnych vektorových rovníc  $X$  a  $Y$ , resp. pri linearizácii úlohy samotné matice lineárnych rovníc. Vzhľadom na charakter procesu rozpojovania by to bolo asi aj nereálne. Metóda vektorového kvantovania umožní navrhnúť systém parametrického riadenia procesu na základe odhadu aktuálneho stavu procesu.

Metóda vektorového kvantovania patrí do kategórie metód umelej inteligencie, pracujúcich s neurónovými sieťami. V značnej miere sa využíva v oblasti číslicového spracovania signálu, napr. pri analýze hovorového signálu pre účely jeho rozpoznávania, prenosu a syntézy. V týchto aplikáciách plní úlohu klasifikátora. Táto metóda sa v literatúre označuje aj ako samoorganizujúce Kohomenové mapy.

Vo vektorovom priestore  $V_n(\mathbb{R})$  je definovaná konečná množina stavových vektorov  $A_L = \{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_L\}$ , kde stavové vektory  $\mathbf{a}_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}]^T$ ,  $i=1, 2, \dots, L$  odpovedajú procesu vrtania definovaných  $L$  kategórií hornín pri nominálnom režime. Ide o tzv. vzory.  $L$ -prvková množina vzorov  $\mathcal{A}^L$  sa nazýva kódová kniha (slovník). Ku každej  $i$ -tej kategórii hornín je priradený efektívny režim vrtania  $(n_i, F_i)$ . Úlohou vektorového kvantovania je realizovať zobrazenie FC množiny všetkých vstupných stavových vektorov procesu vrtania  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  zo spojitého (v amplitúde) vektorového priestoru  $V_n(\mathbb{R})$  do konečnej diskretnej množiny vzorov  $\mathcal{A}^L$  vektorov  $\mathbf{a}_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}]^T$  toho istého vektorového priestoru. Symbolicky toto zobrazenie vyjadříme zápisom:

$$\left\{ \mathbf{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T \right\}_{i=1}^{\infty} \rightarrow \left\{ \mathbf{a}_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}]^T \right\}_{i=1}^L, \quad (9)$$

kde  $\mathbf{x}_i, \mathbf{a}_i \in V_n(\mathbb{R})$ . Toto zobrazenie je dané predpisom minimálnej vzdialenosti medzi vstupným vektorom a jemu priradeným vzorom v zmysle vzťahu:

$$\mathbf{a}_C : |\mathbf{x}_k - \mathbf{a}_{Ck}| = \min \left\{ |\mathbf{x}_k - \mathbf{a}_{ik}| \right\}_{i=1}^L = \min \left\{ \left( \sum_{j=1}^n (x_{jk} - a_{ij})^2 \right)^{1/2} \right\}_{i=1}^L. \quad (10)$$

Vo vzťahu (10) je  $\mathbf{x}_k$  aktuálny vstupný vektor v časovom kroku  $k$ ,  $\mathbf{a}_{Ck}$  je priradený vzor spĺňajúci podmienku minimálnej vzdialenosti k vstupnému vektoru v porovnaní so všetkými ostatnými vzormi z množiny  $\mathcal{A}^L$ . Inými slovami povedané, vstupný vektor  $\mathbf{x}_k$  je aproximovaný jemu najbližším vzorom  $\mathbf{a}_{Ck}$ .

Kľúčom k úspešnosti klasifikácie touto metódou vektorového kvantovania je návrh kvalitnej kódovej knihy  $\mathcal{A}^L$ . Táto kniha vzorov by mala zabezpečiť minimálnu chybu kvantovania (11), resp. minimálnu strednú kvadratickú chybu aproximácie vektorov  $\mathbf{x}$  vzormi  $\mathbf{a}_c$  (12):

$$\Delta_c = |\mathbf{x} - \mathbf{a}_c| \quad (11)$$

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^L \int_{C_i} \Delta_i^2 p(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (12)$$

Na vytvorenie takto koncipovanej kódovej knihy hornín sú dve možnosti. Prvou je empirické stanovenie vzorov (t. j. vektorov)  $\mathbf{a}_i, i=1,2,\dots,L$  offline spôsobom s využitím tzv. tréningových vstupných dát, zosnímaných z vrtania reprezentatívnych hornín jednotlivých kategórií, a to pri nominálnom režime.

Druhou možnosťou je vytváranie kódovej knihy priebežne v procese tzv. samoučenia systému, kedy sa priebežne v procese rozpojovania horninového masívu a súčasného spracovávanía vstupných stavových vektorov  $\mathbf{x}_k, k=1,2,\dots$  procesu spresňujú už definované vzory hornín (t. j. kategórií)  $\mathbf{a}_c$  tak, aby bola minimalizovaná priemerná kvantovacia chyba aproximácie všetkých vstupných vektorov, ktoré doposiaľ boli zatriedené do príslušnej kategórie:

$$\mathbf{a}_c : \min \frac{1}{n_c} \sum_{j=1}^{n_c} |\mathbf{x}_j - \mathbf{a}_c| \quad (13)$$

V prípade, že klasifikátor rozpozná novú kategóriu hornín (nový vzor), zaradí ho do množiny vzorov  $\mathcal{A}^L$ . Súčasne bude potrebné pre túto novú triedu hornín stanoviť a do systému vložiť parametre odpovedajúceho efektívneho režimu vrtania. Významným vzťahom v algoritme vytvárania vzorov v procese samoučenia je vzťah pre iteratívny výpočet súradníc vzoru (Jan, 2002):

$$\mathbf{a}_c(k+1) = \mathbf{a}_c(k) + \mu_k [\mathbf{x}_k - \mathbf{a}_c(k)] = \mathbf{a}_c(k) + \mu_k \Delta_c(k) \quad (14)$$

Váhový koeficient  $\mu_k$  má na počiatku procesu samoučenia hodnotu 1, potom sa priebežne znižuje smerom k hodnote 0, kedy sa už existujúce vzory nespresňujú.

Ťažiskom doterajšieho výskumu v tejto 2. oblasti, založenej na riešení úlohy efektívneho riadenia rozpojovania horniny v stavovom priestore procesu, bolo hľadanie takých 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  $\mathbf{x}(t)$  pre účely vektorového kvantovania stavového priestoru procesu vrtania. Pozitívne výsledky boli dosiahnuté pri definovaní stavového vektora procesu týmito metódami spracovania akustických emisií:

#### □ Wienerov filter ako parametrický model procesu vrtania

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 vrtania. 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. (Táto problematika bola spracovaná v samostatnom príspevku konferencie v Ostrave, 2007).



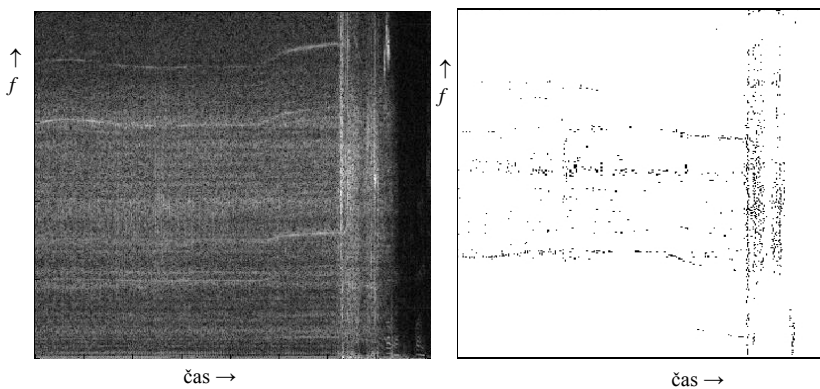
### □ Spektrogramy akustických emisií

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 vŕtania (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.

Pre dosiahnutie dostatočnej citlivosti použitej metódy je vhodné spektrogram zbaviť redundancie a šumu a ponechať len zložky, ktoré je možné považovať za informáciu. V tomto smere boli navrhnuté a realizované niektoré algoritmy:

- algoritmus DFT zoom, ktorý umožňuje so zvýšeným frekvenčným rozlíšením analyzovať len určitý definovaný interval frekvencií,
- výpočtová schéma návrhu obecného nelineárneho kvantizátora výkonového spektra, ktorý umožňuje výpočet spektrogramov, kde amplitúdové rozlíšenie môže byť rôzne na jednotlivých výkonových úrovniach,
- metóda obrazových rovín; ide o aplikáciu modifikovanej metódy z oblasti spracovania obrazov, ktorá umožňuje transformovať spektrogram sprievodného akustického signálu do podoby binárneho vyjadrenia, čím sa významne zvýši úspešnosť klasifikácie horniny.



**Obr.4** Vľavo je znázornený spektrogram akustických emisií pri vŕtaní do andezitu, vpravo je jedna z jeho binárnych obrazových rovín, obsahujúca len podstatnú časť informácie.

### Záver

V príspevku bol prezentovaný stav v riešení výskumu využitia akustických emisií pri efektívnom riadení procesu rozpojovania hornín rotačným vŕtaním. Výskum momentálne pokračuje smerom k prehľbovaniu vedomostí o korelácii medzi geomechanickými vlastnosťami určitých tried hornín a vlastnosťami akustického signálu pri ich vŕtaní.

## Literatúra

- [1] Strnište, K. (1988): Hlbinné vŕtanie, skriptum VŠT v Košiciach, Košice.
- [2] Strnište, K. (1992): Hlbinné vŕtanie, Alfa Bratislava, Bratislava, ISBN 80-05-0131-1.
- [3] Trnka, O., Balla, L. & Hereš, J. (1969): Hlubinné dobývání rudných a nerudných ložisk SNTL ALFA, Praha.
- [4] Krupa, V. & Pinka, J. (1998): Rozpojovanie hornín, TU v Košiciach, Vydavateľstvo Štrotek, Košice, ISBN 80-88896-10-X.
- [5] Sekula, F. (1992): Súbor prác z oblasti výsledkov výskumu rozpojovania hornín, habilitačná práca, FBERG TU v Košiciach, Košice.
- [6] Šutek, E. & Varga, M. (1981): Experimentálne metódy identifikácie, Vydavateľstvo SAV, Bratislava.
- [7] Mikleš, J. & Hutla, V. (1986): Teória automatického riadenia, SNTL ALFA, Bratislava.
- [8] Grewal, M.S. & Andrews, A.P. (2001): Kalman filtering – theory and practice, A Wiley – Interscience publication, New York.
- [9] Sekula, F., Krúpa, V., Bejda, J. & Krepelka, F. (1991): Einige Charakteristiken des Gesteinsmassivs die beim mechanisierten Treiben mit Vollschnittmaschinen gewonnen wurden. In Proc.: 7 Internationaler Kongress über Felsmechanik, Aachen, Deutschland, p. 1015-1018.
- [10] Sekula, F. & Grexová, S. (2001): Monitorovanie rozpojovania pri plnoprofilovom razení líniových podzemných diel, Acta Montanistica Slovaca, 6.
- [11] Leššo, I. (2004): Teória signálov pre priemyselnú informatiku, ES/AMS, Košice, ISBN: 80-8073-186-1
- [12] Gersho, A. & Gray, R.M. (1992): Vector quantisation and signal compression Springer, ISBN 978-7923-9181-4
- [13] Jan, J. (2002): Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů, VUTUM Brno, ISBN 80-214-1558-4
- [14] Kaláb, Z., Častová, N. & Lyubushin, A.A. (2005): Contribution to application of the Automatic classification of seismological signals, Documenta Geonica, ÚG AVČR, , s. 48 – 58.