

Štatistické hodnotenie vibrácií pri vŕtaní hornín

František Krepelka¹, Milan Labaš¹, Lucia Ivaničová¹, Viera Miklúšová¹,
Eudmila Tréfová¹ a Zuzana Chlebová²

Statistical valuation of vibrations at the rock drilling

The paper describes a measuring device providing a monitoring of forced vibrations arising at the rock cutting by impregnated diamond drilling tools at quasi-constant revolutions and thrust levels. The forced vibrations were measured by a capacity acceleration transducer. The vibration acceleration signal was evaluated in the time domain using the MS Excel software. The position characteristics, such as the mean value of the vibration acceleration, median; and the variability characteristics: variance, standard deviation, skewness and kurtosis. The probability density function and the distribution density were not analyzed in this stage of evaluation.

The mean value of vibration acceleration depends probably on the grain size of drilled rocks. The histogram shape and the cumulative distribution function are affected by the grain size of drilled rock, as well. This fact has to be verified by further experiments. The statistical evaluation of mean values at various revolutions, rock types and drilling tools will be provided in further stages of research, together with the evaluation of vibrations in the frequency domain.

Keywords: vibration acceleration, mean value, variance, standard deviation, skewness.

Úvod

V rozpojovacom procese dochádza pri interakcii rozpojovacieho nástroja s horninou k vynúteným vibráciám rozpojovacieho nástroja a rozpojovanej horniny. Všetky druhy kmitania vynútené, vlastné a samobudené sú sprievodným javom pri rozpojovaní hornín vŕtaním. Vynútené vibrácie sú v procese rozpojovania hornín nositeľmi informácií o stave rozpojovacieho nástroja, parametroch rozpojovania a tiež o vlastnostiach rozpojovaných hornín (Leššo, 2005). Vibrácie pri rozpojovaní hornín môžeme snímať dynamometrami alebo akcelerometrami. Signály z uvedených meracích zariadení môžeme vyhodnocovať v časovej a frekvenčnej oblasti. Výsledky štatistického spracovania signálov sa najčastejšie popisujú distribučnou funkciou alebo hustotou rozdelenia pravdepodobnosti. Pre štatistické hodnotenie signálov je dôležité, aby bol signál počas merania bol vzorkovaný. Z náhodného súboru hodnôt vzorkovaného signálu vibrácií môžeme vyhodnotiť jeho charakteristiky polohy a variability.

Rozpojovací nástroj pri vŕtaní hornín vybudzuje mechanické kmity a vibrácie, ktoré majú nepriaznivé účinky na obsluhu rozpojovacích zariadení. Okrem toho sú vibrácie pri vŕtaní hornín nositeľmi dôležitých informácií, ktoré možno študovať z hľadiska mechanizmu rozpojovania a tiež sú nositeľmi informácií pre monitorovanie rozpojovacieho procesu.

Meranie vibrácií pri vŕtaní

Mechanizmus rozpojovania hornín vŕtaním a závislosti vstupných a výstupných veličín procesu rozpojovania hornín sa študujú na vŕtacom stande. V prevažnej miere sa na rozpojovanie používajú diamantové nástroje impregnované a vsadzované do priemeru 58 mm. Vŕtací stand pozostáva z oceľovej konštrukcie, hnacieho jednosmerného elektromotora s výkonom 12,5 kW, vreteníka s jadrovkou a vŕtacieho nástroja. Vstupné veličiny, t.j. otáčky a prítlak vŕtacieho standu sa dajú plynule regulovať v intervale $0 - 30 \text{ s}^{-1}$ a $0 - 20\,000 \text{ N}$. Mechanické kmity a vibrácie boli snímané kapacitným snímačom zrýchlenia ADXL 250 firmy ANALOG DEVICES v dvoch smeroch, kolmo na os rotácie rozpojovacieho nástroja v horizontálnej rovine a rovnobežne s osou rozpojovacieho nástroja. Snímače boli mechanicky uchytené na rám vŕtacieho standu. Meracie zariadenie vibrácií má zostavu :

- kapacitný snímač zrýchlenia ADXL 250,
- analógový dvojnásobný integrátor,
- pamäťový osciloskop,
- počítača s riadiacou doskou DS 1102.

¹ Ing. František Krepelka, PhD., Ing. Lucia Ivaničová, Ing. Milan Labaš, Mgr. Viera Miklúšová, PhD., Ing. Ludmila Tréfová, Ústav Geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice, Slovenská Republika

² doc. Ing. Zuzana Chlebová, CSc., Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky SF TU Košice, Letná 9, 041 87 Košice (Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 13. 12. 2006)

Signál zo snímača vibrácií sa privádza do dvojnásobného analógového integrátora, ktorý na výstupe dáva hodnotu posunu. Takto zosnímaný signál zrýchlenia a analógovo spracovaný signál polohy sa vzorkujú prevodníkom riadiacej dosky DS 1102 a ukladajú do súboru nameraných dát v prostredí tabuľkového procesora Excel. Uložené dáta zrýchlenia a posunov vibrácií pri rozpojovaní hornín je možné ďalej vyhodnocovať. Náhodný súbor zrýchlenia a posunov je zapisovaný počas cca 20 sekúnd merania v kroku 0,008 sekundy, takže r obsahuje cca 2 500 hodnôt týchto veličín v dvoch na seba kolmých smeroch.

Vibrácie pri vŕtaní sa merali a zaznamenávali pri konštantných otáčkach cca 16,66 s⁻¹ a pri postupne sa meniacich hodnotách prítlaku 5 500, 7 500, 9 500 a 11 500 N. Pri experimentoch sa používala 8-kanáliková diamantová impregnovaná korunka s priemerom 46 mm. Náhodné súbory zrýchlenia vynútených vibrácií sa namerali pri vyššie uvedených parametroch pri rozpojovaní andezitu Ruskov, žuly Hnilec a vápenca Včeláre.

Štatistické hodnotenie zrýchlenia vibrácií

Z nasnímaných náhodných súborov zrýchlenia vibrácií v smere osi vŕtaní a kolmo na túto os v horizontálnej rovine v príslušnom čase bola určená hodnota zrýchlenia

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_z^2} \quad (1)$$

Takto určené hodnoty zrýchlenia boli štatisticky vyhodnocované vzostupným usporiadaním podľa absolútnej veľkosti a následným zatriedením do tried početností. Počet tried náhodného súboru zrýchlenia vibrácií bol určený podľa Sturgesovho pravidla

$$k = 1 + 3,33 \cdot \log_{10}(n) \quad (2)$$

Pre každú triedu bol určený triedny znak x_i^* a vypočítaný vážený aritmetický priemer náhodného súboru zrýchlenia vibrácií podľa vzťahu

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^k x_i^* p_i^* \quad (3)$$

V nasnímaných náhodných súboroch boli v prvom kroku vyhodnocované charakteristiky polohy: vážený aritmetický priemer a medián a charakteristiky variability : variačné rozpätie, rozptyl, štandardná odchýlka, šikmosť, špicatosť (Kalická, Krivá, 2005). Charakteristiky polohy a variability zrýchlenia vibrácií pri rozpojovaní žuly Hnilec sú uvedené v tab. 1, obdobne v tab. 2 sú uvedené hodnoty zrýchlenia vibrácií pri rozpojovaní andezitu Ruskov a v tab. 3 sú uvedené hodnoty vibrácií pri rozpojovaní vápenca Včeláre.

Tab. 1. Hodnoty charakteristik polohy a variability zrýchlenia vibrácií pri rozpojovaní žuly.

Tab. 1. Characteristics of position and variability of vibration acceleration at granite drilling.

Prítlak [N]	n_i	Stredná hodnota	Medián	Štand. odchýlka	Variačné rozpätie	Šikmosť	Špicatosť
5 707	2479	0,15879	0,15517	0,06837	0,35468	0,23836	-0,44913
7 564	2466	0,14589	0,13880	0,07174	0,35416	0,42892	-0,31422
9 499	2475	0,26123	0,25228	0,12302	0,61073	0,36734	-0,41723
11 418	2475	0,27073	0,25750	0,12340	0,64126	0,38456	-0,43333

Tab. 2. Hodnoty charakteristik polohy a variability zrýchlenia vibrácií pri rozpojovaní andezitu.

Tab. 2. Characteristics of position and variability of vibration acceleration at the andesite drilling.

Prítlak [N]	n_i	Stredná hodnota	Medián	Štand. odchýlka	Variačné rozpätie	Šikmosť	Špicatosť
5 835	2465	0,21823	0,21228	0,10596	0,50316	0,32594	-0,42367
7 578	2465	0,16587	0,15845	0,07957	0,38381	0,37365	-0,40922
9 531	2477	0,13309	0,12339	0,06975	0,33222	0,46116	-0,43581
11 350	2448	0,13199	0,12586	0,06785	0,32264	0,49717	-0,27182

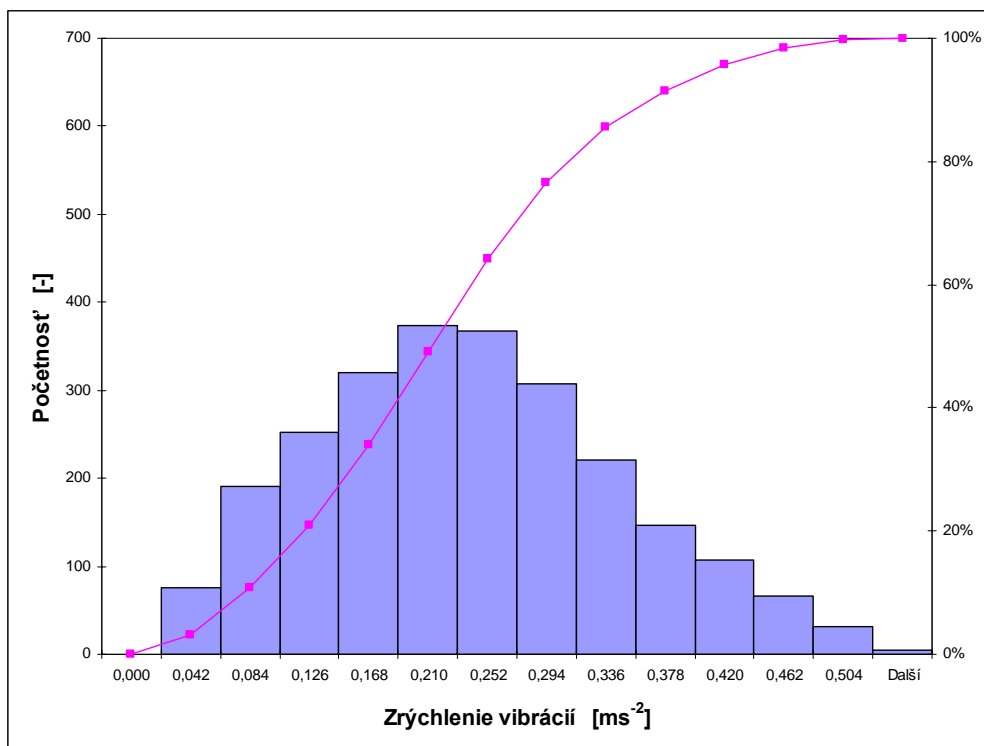
Tab. 3. Hodnoty charakteristik polohy a variability zrýchlenia vibrácií pri rozpojovaní vápenca.

Tab. 3. Characteristics of position and variability of vibration acceleration at the limestone drilling.

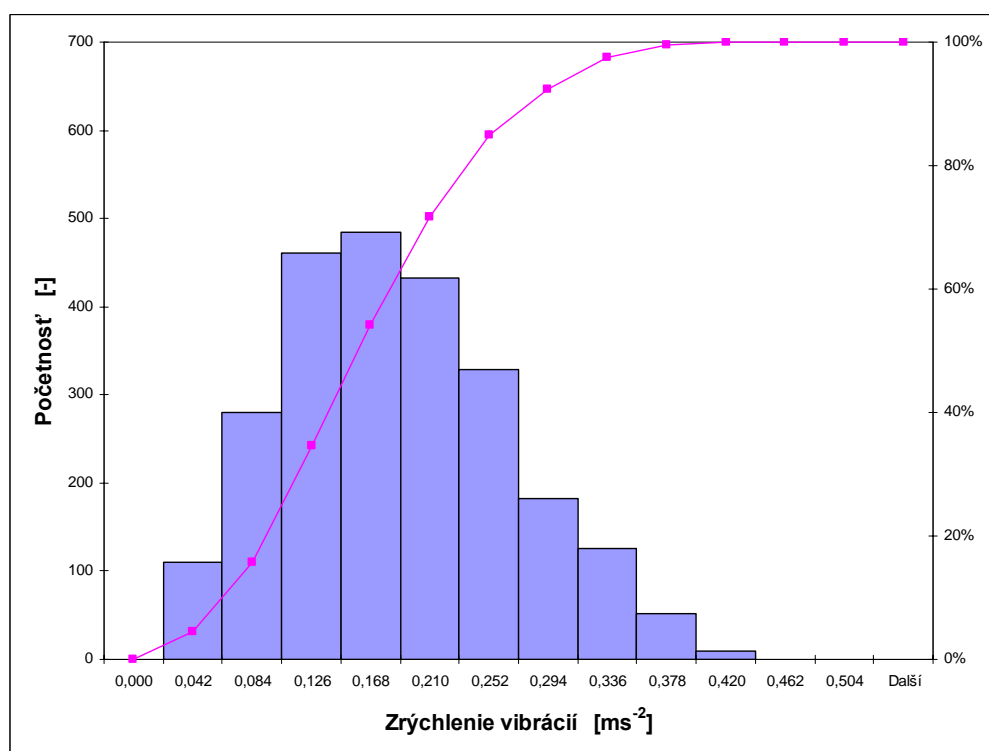
Prítlak [N]	n_i	Stredná hodnota	Medián	Štand. odchýlka	Variačné rozpätie	Šikmosť	Špicatosť
5 731	2463	0,11601	0,10904	0,05931	0,28153	0,48551	-0,48551
7 594	2483	0,21521	0,21460	0,08074	0,42808	0,02809	-0,41226
9 573	2473	0,22667	0,22680	0,07861	0,41733	0,02057	-0,27651
11 320	2428	0,15241	0,13969	0,08294	0,37771	0,58742	-0,27127

Na obrázkoch 1, 2, 3 a 4 sú zobrazené histogramy početností a kumuláty súboru zrýchlenia vibrácií pri rozpojovaní andezitu rovnakým nástrojom pri konštantných otáčkach cca 16,66 s⁻¹ a rôznych prítlakoch.

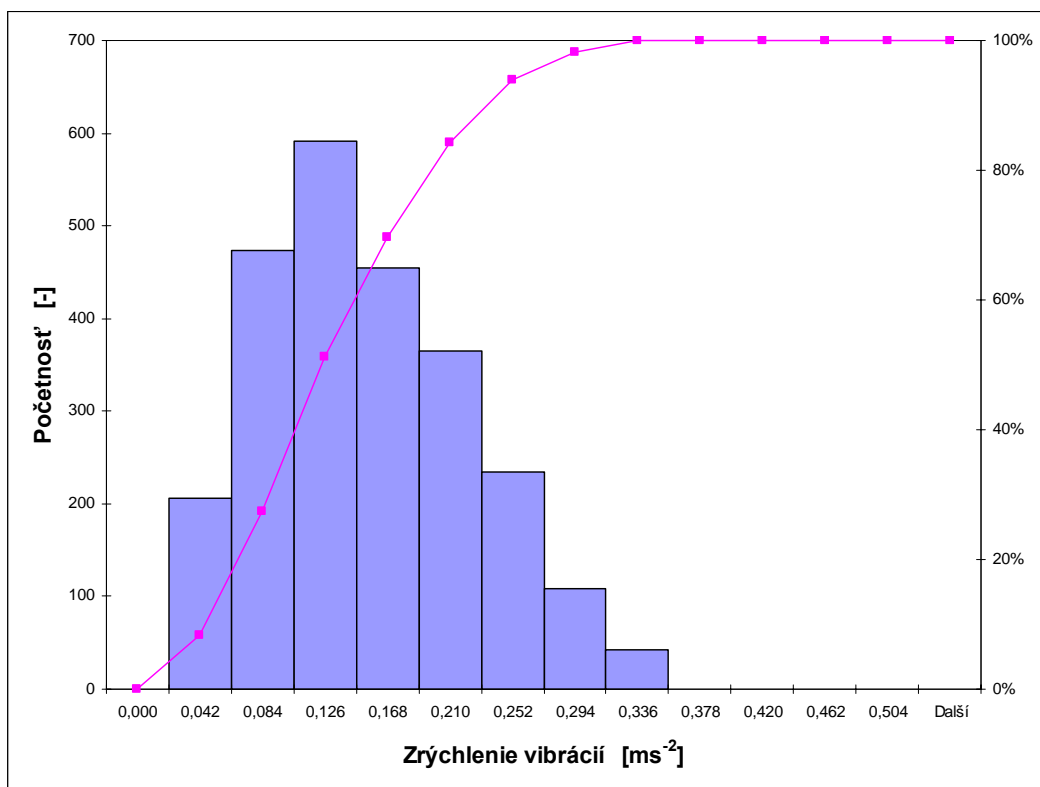
Na obr. 1 až 4 je dokumentovaný pokles strednej hodnoty zrýchlenia vibrácií s narastajúcim prítlakom pri rozpojovaní andezitu. V tomto štádiu štatistického hodnotenia sme sa zamerali iba na charakteristiky polohy a variability zrýchlenia vibrácií pri rozpojovaní hornín.



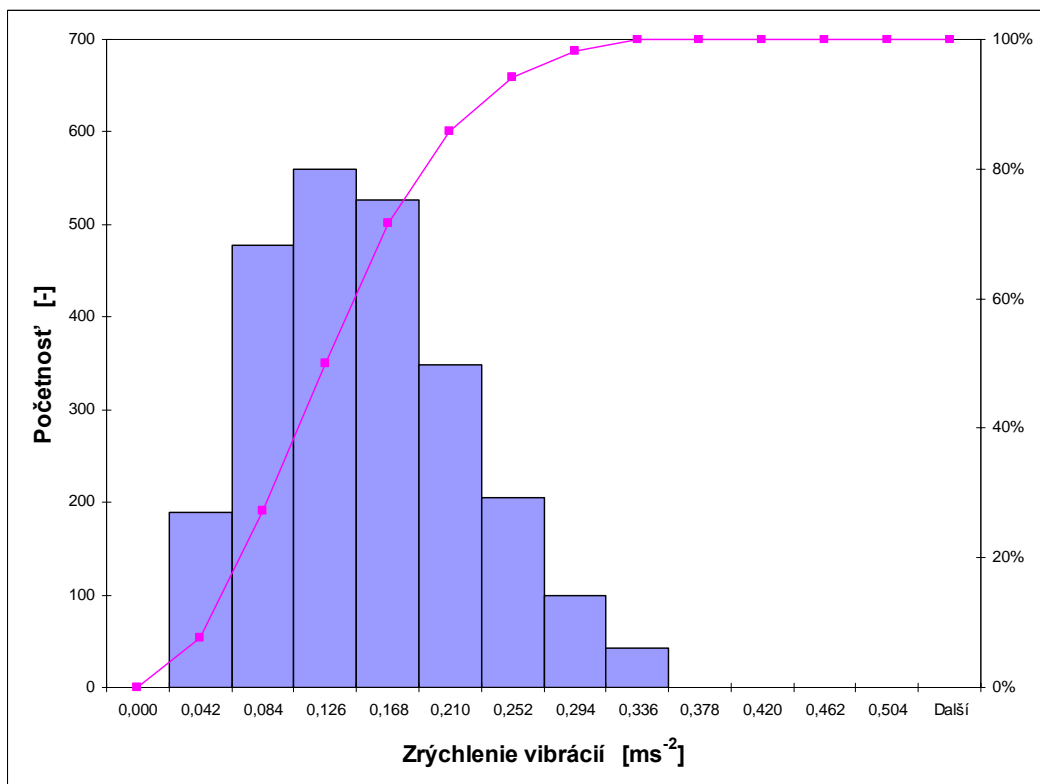
Obr. 1. Histogram početnosti a kumuláta zrýchlenia vibrácií pri vrtaní andezitu: otáčky 16,88 s⁻¹, prítlak 5835 N.
Fig. 1. Histogram and cumulate of vibration accelerations at the Ruskov andesite drilling: 16,88 s⁻¹, thrust 5835 N, andesite.



Obr. 2. Histogram početnosti a kumuláta zrýchlenia vibrácií pri vrtaní andezitu: otáčky 16,66 s⁻¹, prítlak 7578 N.
Fig. 2. Histogram and cumulate of vibration accelerations at the Ruskov andesite drilling: revolutions 16,66 s⁻¹, thrust 7578 N, andesite.



Obr. 3. Histogram početnosti a kumuláta zrýchlenia vibrácií pri vrtaní andezitu: otáčky 16,88 s⁻¹, prítlak 9531 N.
 Fig. 3. Histogram and cumulate of vibration accelerations at the Ruskov andesite drilling : 16,88 s⁻¹, thrust 9531 N, andesite.



Obr. 4. Histogram početnosti a kumuláta zrýchlenia vibrácií pri vrtaní andezitu : otáčky 16,35 s⁻¹, prítlak 11350 N.
 Fig. 4. Histogram and cumulate of vibration accelerations at the Ruskov andesite drilling : revolutions 16,35 s⁻¹, thrust 11350 N.

Diskusia

Najčastejšie používanou charakteristikou polohy je stredná hodnota. Má charakter výberového priemeru, ktorý zodpovedá najpravdepodobnejšej hodnote odhadu skutočnej hodnoty, ktorý je matematickou nádejou. Stredná hodnota zrýchlenia vibrácií sa definuje vzťahom (3). Tento vzťah je vlastne vážený aritmetický priemer hodnôt zrýchlenia, kde každá hodnota x_i^* je vážená početnosťou v danej triede hodnôt. Stredná hodnota pri rozpojovaní žuly rastie s rastom tlaku, pri rozpojovaní andezitu stredná hodnota klesá. Pri rozpojovaní vápenca stredná hodnota najprv rastie a pri hodnote tlaku 11 320 N prudko klesá. Pri experimente všetky vstupné veličiny boli približne konštantné, včítane impregnovaného rozpojovacieho nástroja, ktorý má tú vlastnosť, že počas svojej životnosti má takmer rovnaké rozpojovacie vlastnosti. Z uvedených výsledkov experimentov môžeme konštatovať, že na strednú hodnotu zrýchlenia vibrácií má vplyv rozpojovaná hornina. Žula je typickým predstaviteľom hornín, ktoré sú zložené zo zrn rôznej veľkosti. Andezit je predstaviteľom hornín zložených z jemných rovnomerných zrn, ktorý pri zaťažovaní je veľmi pružný a rozpojuje sa lomom, obdobným krehkému lomu. Vápenec je hornina, ktorá má zlé pružnostné vlastnosti, pri zaťažovaní prevládajú plastické deformácie. Pre posúdenie vplyvu vlastností hornín na vibrácie pri rozpojovaní budú potrebné ďalšie experimenty.

Ďalšou charakteristikou polohy je medián. Geometricky medián predstavuje hodnotu, ktorá rozdeľuje plochu ohraničenú osou náhodnej premennej a krivkou hustoty rozdelenia pravdepodobnosti jej výskytu na dve polovice. Ak je graf hustoty rozdelenia pravdepodobnosti náhodnej premennej symetrický, medián je totožný so strednou hodnotou. Medián v našich experimentoch je takmer vo všetkých experimentoch bez ohľadu na rozpojovanú horninu menší ako stredná hodnota.

Ak poznáme stredné hodnoty, nevieme si ešte urobiť predstavu o tom, aké hodnoty môže náhodná veličina nadobúdať (Hendl, 2004). Na charakterizovanie hodnôt náhodnej veličiny sa používajú charakteristiky variability. Základnou a najpoužívanejšou charakteristikou variability je rozptyl. Vzhľadom na to, že rozptyl nemá rozmer náhodnej veličiny, používa sa ako charakteristika variability štandardná odchýlka. V súboroch zrýchlenia vibrácií najmenšia štandardná odchýlka je pri vápenci, najväčšia pri žule. Táto skutočnosť je tiež pravdepodobne spôsobená stavbou rozpojovaných hornín a aj na túto skutočnosť má pravdepodobne vplyv zrnitosť. V ďalšom výskume bude potrebné túto skutočnosť overiť.

Miera symetrie okolo strednej hodnoty sa posudzuje pomocou šikmosti. Ak je šikmosť kladná, rozdelenie je zošikmené zľava. Ak je šikmosť menšia ako nula, rozdelenie hodnôt zrýchlenia vibrácií je zošikmené sprava. Vo všetkých náhodných súboroch je šikmosť kladná, histogram početnosti vo všetkých prípadoch je zošikmený sprava.

Ako miera odchýlky skúmaných rozdelení vibrácií zrýchlenia od normálneho rozdelenia sa používa špicatosť. Kladná hodnota špicatosti poukazuje na štíhle rozdelenie. Záporná špicatosť poukazuje na rozdelenie ploché. Špicatosť skúmaných náhodných súborov je vo všetkých hodnotených súboroch záporná.

Záver

Charakteristikami polohy a rozptýlenia boli hodnotené náhodné súbory hodnôt zrýchlenia vibrácií pri rozpojovaní hornín, pri takmer konštantných vstupných parametroch. Toto hodnotenie vibrácií predstavuje úvodné hodnotenie vynútených mechanických vibrácií pri rozpojovaní hornín, umožňujúce získať základnú predstavu o rozložení zrýchlenia vibrácií. Ďalší výskum bude zameraný na testovanie významnosti strednej hodnoty náhodných súborov hodnôt zrýchlenia vibrácií pri rôznych vstupných veličinách, pri rôznych typoch hornín, prípadne aj rôznych rozpojovacích nástrojoch. Obdobne tak, ako sa dajú hodnotiť vibrácie v časovej oblasti, je potrebné sa zamerať aj na ich hodnotenie vo frekvenčnej oblasti.

Tento príspevok vznikol v rámci riešenia grantovej úlohy VEGA a riešenia štátneho programu výskumu a vývoja .

Literatúra - References

- Leššo, I., Flegner, P.: Riešenie algoritmu frekvenčnej lupy. In: *Mimoriadne vydanie časopisu ATD SR, október 2005, ISBN 80-232-0252-9, EAN 9788023202526.*
 Kalická, J., Krivá, J.: *Praktická štatistika v Exceli. STU Bratislava, 2005, ISBN 80-227-2295-2.*
 Hendl, J.: *Přehled statistických metod zpracování dat. Portál, s.r.o. Praha 2004, ISBN 80- 7178-820-1.*