

Měření krouticích momentů na hřídelích vstupních pastorků převodovky pohonu kola rýpadla KU 800.18/K99

Ing. Petr Klouda, Ing. Vlastimil Moni, Ph.D.

Výzkumný ústav hnědého uhlí a.s., Most, tř. Budovatelů 2830/3; klouda@vuhu.cz

Přijato: 26. 4. 2016, recenzováno: 13. a 17. 5. 2016

Abstrakt

Článek popisuje přímé měření krouticího momentu na hřídelích vstupních pastorků převodovky pohonu kola rýpadla KU 800.18/K99, které bylo realizované na začátku roku 2016. Přímé měření využívá spojení klasických tenzometrických snímačů s moderní měřicí mikroelektronikou. V článku jsou uvedeny základní principy měření, popis instalace snímačů a měřící aparatury, výsledky měření a získané poznatky.

Measuring of the torque on the shafts of input pinions of the wheel drive gear box of the bucket wheel excavator KU 800.18/K99

The article describes the direct measurement of the torque on input shafts pinions of the wheel drive gearbox of the excavator KU 800.18/K99, which was implemented at the beginning of the year 2016. The direct measurement utilises connection of the classic strain-gauge sensors with the modern measuring microelectronic technology. The article provides the basic principles of measurement, description of the installation of sensors and measuring apparatus, measuring results and lessons learned.

Messung von Drehmomenten an Wellen der Getriebe-Eingangsritzeln des Schaufelradantriebs des Baggers KU 800.18/K99

Der Artikel beschreibt eine direkte Messung des Drehmomentes an Wellen von Getriebe- Eingangsritzeln für Schaufelradantrieb des Baggers KU 800.18/K99, welche anfangs 2016 vorgenommen wurde. Die direkte Messung nutzt eine Verbindung klassischer Dehnungsmessstreifen mit moderner Messmikroelektronik. Im Artikel werden grundlegende Messprinzipien, Beschreibung der Installation von Messstreifen und der Messgeräte, Ergebnisse der Messung und erworbene Erkenntnisse angeführt.

Klíčová slova: kolesové rýpadlo, měřená veličina, krouticí moment, tenzometrický snímač, pohon, řídicí systém.

Keywords: bucket wheel excavator, measured value, torque momentum, strain-gauge sensor, wheel drive, control system.

1 Úvod

Na základě požadavků Severočeských dolů a.s. provedl Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a. s. – útvar Technologické procesy a diagnostika – přímé měření krouticích momentů na hřídelích vstupních pastorků převodovky pohonu kola rýpadla KU 800.18/K99, nasazeného na lokalitě Doly Bílina. Měření bylo provedeno ve spolupráci s technickými pracovníky objednatele a dále za technické podpory pracovníka společnosti SIPOR s. r. o., který zajišťoval změnu řízení pohonu.

Byla provedena dvě komplexní měření in situ s cílem porovnat vstupní zatížení převodovky pohonu při dvou rozdílných způsobech řízení pohonu. Při prvním měření byly otáčky pohonu řízeny s tzv. momentovou korekcí ve zpětné vazbě. Při druhém měření řízení probíhalo s tzv. technologickým regulátorem ve zpětné vazbě.

Převodovka pohonu má dva vstupy. Můžeme je identifikovat termíny „horní“ a „dolní“ (viz obrázek č. 1). Na obrázku č. 1 jsou jednotlivé vstupní pastorky poháněny elektromotory poz. 1 (ELM) přes prokluzovou lamelovou spojku poz. 4 a pružnou spojku periflex poz. 2 s brzdovým kotoučem. Pastorky jsou opatřeny kuželovým ozubením a uloženy v kuželíkovém a soudečkovém ložisku (viz obrázek č. 2).

Hlavním cílem měření bylo porovnat oba způsoby řízení pohonu z hlediska:

- velikosti amplitud zatížení,

- dynamického charakteru zatížení,
- synchronizace tahu obou pohonů.

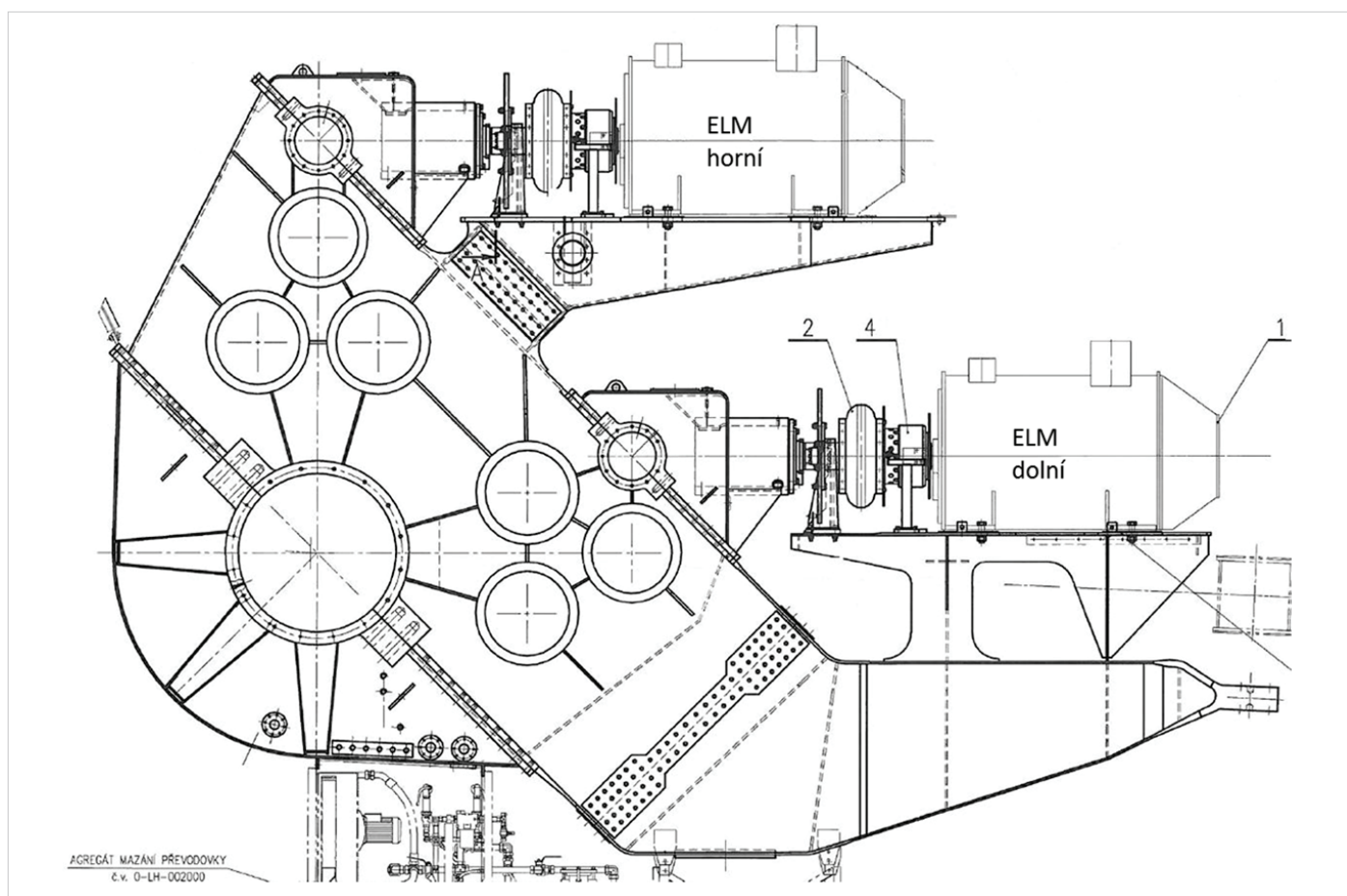
Při měření byla snaha vyloučit vliv elektrických parametrů pohonu na zjišťovanou hodnotu krouticích momentů, tedy zjistit přímo mechanické krouticí momenty na vstupních pastorcích převodovky. Toto umí VÚHU a.s. realizovat pomocí tenzometrických snímačů.

2 Teoretická část

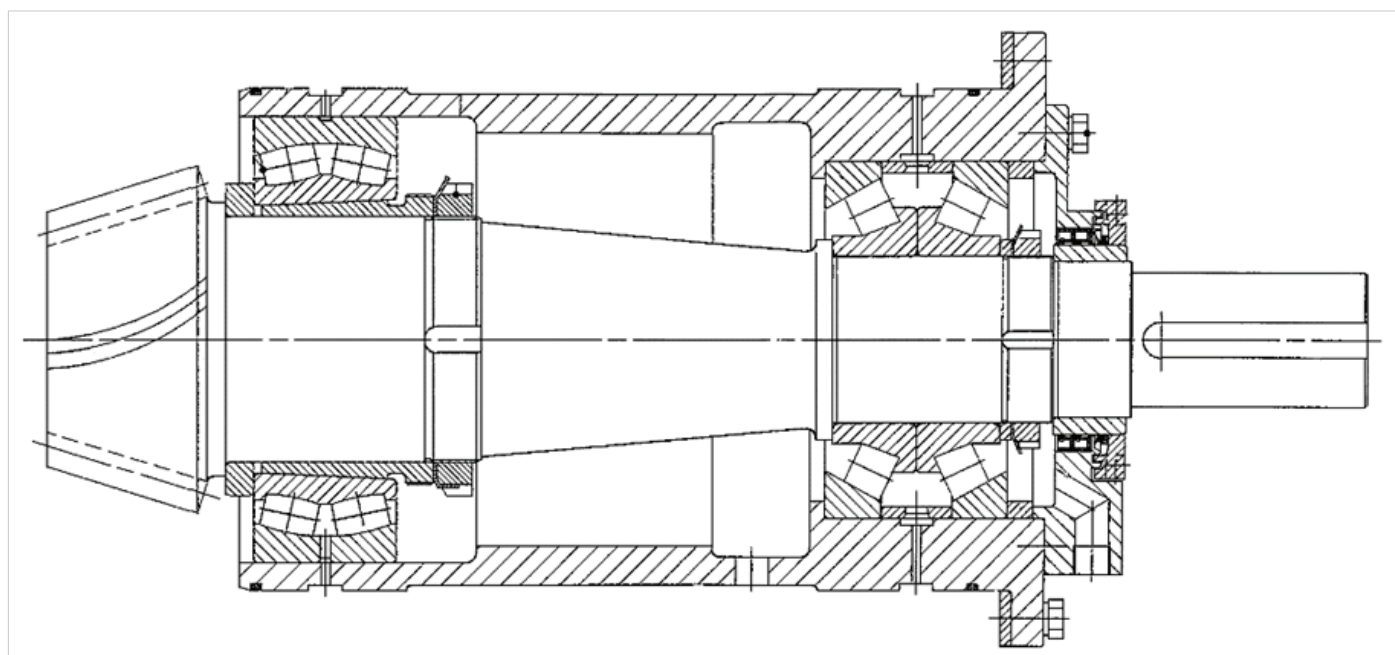
Podstatou přímého měření krouticího momentu kola velkorýpadla je tenzometrické snímání krutové deformace té části hřídele vstupního kola převodovky pohonu, jež přenáší točivý účinek ze spojky na převodovku pohonu. Signál ze snímače této deformace – tenzometru – je zpracován vysoce přesnými digitálními mikroelektronickými obvody a ukládán do záznamového zařízení (paměť typu Flash). Odtud je on-line nebo off-line způsobem přenášén do PC. Tam je ukládán na disk pro potřeby dalšího zpracování – vyhodnocení.

Z teorie pružnosti a pevnosti lze dokázat, že u hřídele kruhového průřezu namáhaného krouticím momentem M_t je maximální poměrná deformace jeho povrchového vlákna, které svírá úhel 45° s podélnou osou hřídele, úměrná smykovému napětí dle vztahu:

$$\tau = 2G \cdot \epsilon_{45} \quad (1)$$



Obr. 1: Schéma převodovky.



Obr. 2: Uložení vstupu převodovky.

kde

τ smykové napětí [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]

G modul pružnosti ve smyku [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]
pro ocel $G = 80\,000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$

ε_{45} krutová deformace - poměrné prodloužení vlákna pod úhlem 45° [$\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$]

Zatížení hřídele, působící kruticí moment (moment torze), lze potom stanovit ze vztahu:

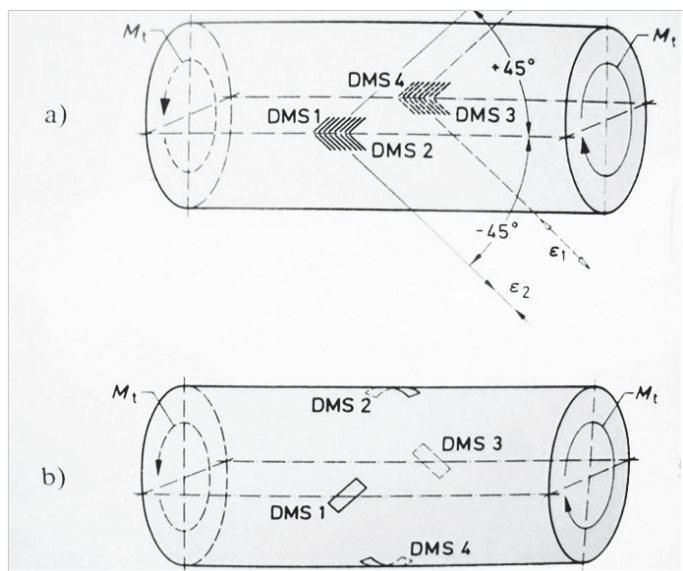
$$M_t = 2G \cdot \varepsilon_{45} \cdot W_t \cdot 10^{-12} = 0,22086 \cdot \varepsilon_{45} \text{ [kNm; mm} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (2)$$

Poměrné prodloužení vlákna lze měřit pomocí tenzometrického snímače – dále jen tenzometru.

Praktická instalace tenzometrů na povrchu hřídele je možná dvěma způsoby. Oba ukazuje obrázek č. 3.

Způsob instalace dle obrázku č. 3:

- a) předpokládá použití tenzometrické růžice 90° ,
- b) předpokládá použití samostatných tenzometrů.



Obr. 3: Schéma umístění snímačů na hřídel.

Zaměníme-li výraz „DMS“ (obrázek č. 3) za „R“, lze akceptovat schéma zapojení do měřicího Wheatsnova můstku dle obrázku č. 4.

Potom poměrné prodloužení ε_{45} je pro dále uvedenou měřicí jednotku dáno vztahem:

$$\varepsilon_{45} = \frac{1}{K \cdot 10^8} \cdot \frac{U_m}{U_n} \cdot 10^6 \text{ [}\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (3)$$

kde

K konstanta tenzometru

pro tenzometry HBM 350Ω je $K = 2$

U_n napájecí napětí můstku [V]

U_m měřicí napětí můstku [V]

Praktické a zejména dlouhodobé použití této metody vyžaduje zhodnotit vlivy působící na přesnost měření. Jsou to:

- přesnost nalepení tenzometrů, tj. dodržení úhlu 45° ,
- vliv změny okolní teploty,
- časový drift měřicího řetězce,
- současně působící ohybové namáhání hřídele (tahové – tlakové).

Přesnost nalepení tenzometrů

Odchylka od směru 45° o úhel α dává chybu měření f :

$$f = (\cos 2\alpha - 1) \cdot 100 \% \quad (4)$$

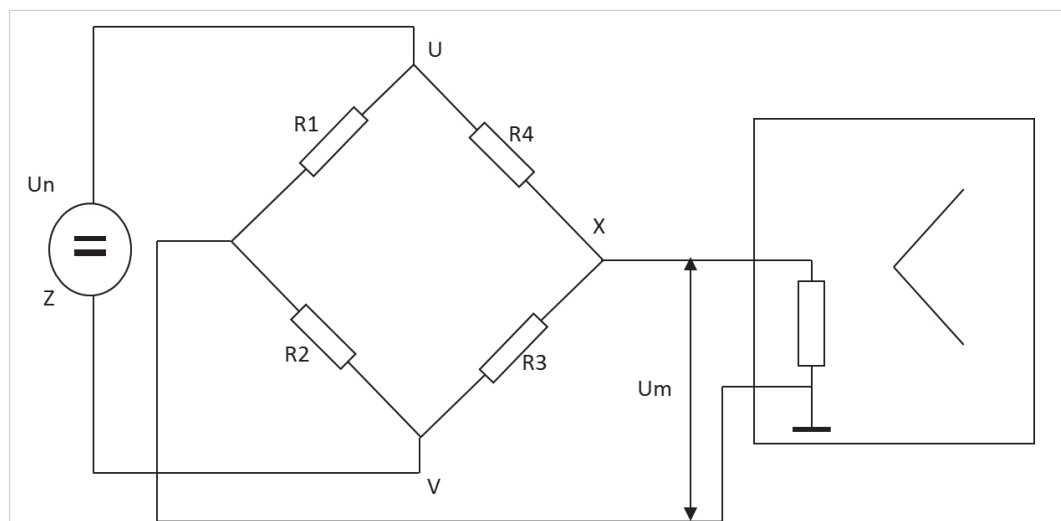
Pro reálné $\alpha \leq 5^\circ$ a zapojení všech čtyř tenzometrů do plného můstku je chyba měření $f/4 = -0,4 \%$.

Ostatní zmíněné vlivy jsou stoprocentně kompenzovány zapojením můstku. Uvedená problematika je blíže rozepsána v literatuře [1,2].

3 Realizace měření

3.1 Objekt měření – pohon kola

Kolesová špička rýpadla KU 800.18/K99 sestává mimo jiné z bezkomorového jednostěnového kola vybaveného pohonem $2 \times 800 \text{ kW}$ s polovodičovými měniči pro regulaci otáček.



Obr. 4: Schéma zapojení snímačů.

Lze očekávat jmenovitý krouticí moment na hřídeli kola $M_k = 2\,643\text{ kNm}$, tj. $7,73\text{ kNm}$ na hřídeli elektromotoru.

Následující tabulka č. 1 uvádí parametry pohonů – horního, dolního.

Tab. 1: Parametry pohonů.

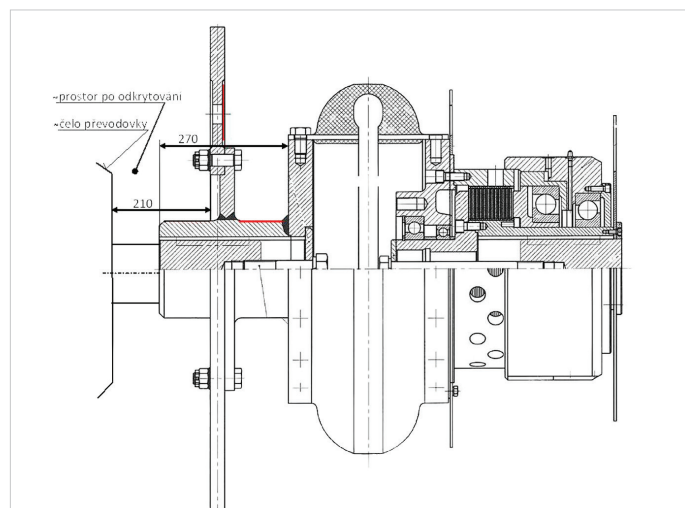
Elektromotor (Siemens, typ ARNR 560 d-6)				
výkon	otáčky	napětí	proud	cos(fi)
[kW]	[min ⁻¹]	[V]	[A]	[-]
8-800	99-993	69-690	314-820	0,27÷0,85
Převodovka (UNEX, typ KV 3045/K1/M)				
výkon	otáčky	převod		
[kW]	[min ⁻¹]	[-]		
2 x 800	992	180		
Spojka periflex (REXNORD, typ OMEGA 140)				
Brzda (SVENDBORG, typ ASFT 212-MS30R-101)				
tlak	clamping force			
[MPa]	[N]			
	1 200			
Frekvenční měnič (Siemens, typ 6SE7141-1HJ62-3BAO-Z)				
funkce	brzdný odpor		brzdná jednotka	
master, slave	4,45 Ω - 200 kW		6SE7032-1HB87-2DAO	

3.2 Měřicí řetězec [1,2]

Měřicí řetězec na pohonu kola rýpadla je tvořen:

- snímači - tenzometry,
- stíněnými kabely,
- měřicím tenzometrickým zesilovačem s vysílačem bezdrátového přenosu dat,
- přijímací jednotkou pro bezdrátový přenos dat,
- měřicí jednotkou, vybavenou vnitřní pamětí a odolnou proti otřesům,
- osobním počítačem – notebookem ASUS 6Jc.

Snímače byly pomocí stíněných kabelů propojeny s měřicím tenzometrickým zesilovačem. Ten byl spolu s napájecí baterií připevněn k brzdovému kotouči pohonu pomocí speciálního držáku.



3.3 Instalace měřicího řetězce na pohon kola [1,3]

Vlastní instalace měřicího řetězce na pohon kola rýpadla probíhala v následujících krocích:

- výběr místa pro instalaci snímačů a tenzometrického zesilovače,
- zhotovení držáků pro upevnění tenzometrického zesilovače na stěnu brzdového kotouče,
- lepení tenzometrických snímačů,
- instalace potřebné kabeláže, držáků a přijímací jednotky,
- připojení měřicí jednotky a ověření funkčnosti měřicího řetězce v konkrétních podmínkách za klidu rýpadla.

Výběr místa pro instalaci snímačů a měřicí jednotky

Konstrukce přenosu krouticího momentu z elektromotoru do převodovky je velmi kompaktní a důsledkem toho je, že pro instalaci tenzometrických snímačů zbývá pouze plocha náboje mezi spojovým a brzdovým kotoučem (označeno na obrázku č. 5 červenou čarou). Tam také byly nalepeny potřebné tenzometry na průměru 200 mm.

Pro instalaci měřicí jednotky bylo zvoleno místo na stěně brzdového kotouče mezi odlehčovacími otvory (označeno na obrázku č. 5 červenou čarou). V místě s tenzometry by po zabrzdění pohonu mělo dojít k odlehčení kroutivého namáhání hřídele téměř na nulovou hodnotu, a to po vyrovnaní třecích odporů na lamelové spoje, ložiskách elektromotoru a vlivu nevyváženosti rotoru motoru.

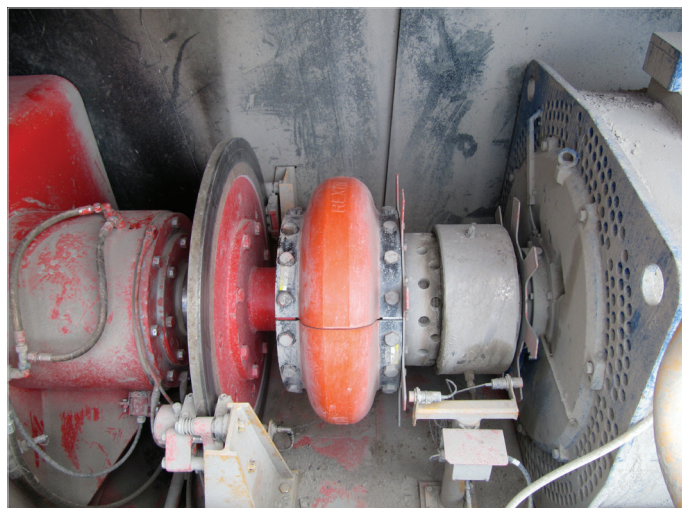
Lepení tenzometrických snímačů

Lepení tenzometrických snímačů bylo provedeno během preventivní odstávky rýpadla. Tenzometry byly přilepeny obvyklým postupem podle schématu a), viz obrázek č. 3 a ošetřeny krycím tmelem SG250. Pohled na nalepené a ještě nezakryté tenzometry je zachycen na obrázku č. 6.

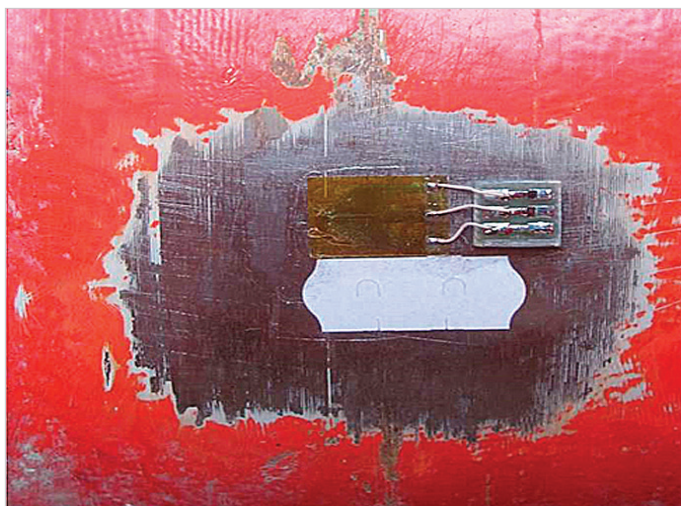
Propojení tenzometrů bylo provedeno podle schématu na obrázku č. 7.

Instalace tenzometrického zesilovače s vysílacím modulem na stěnu brzdového kotouče

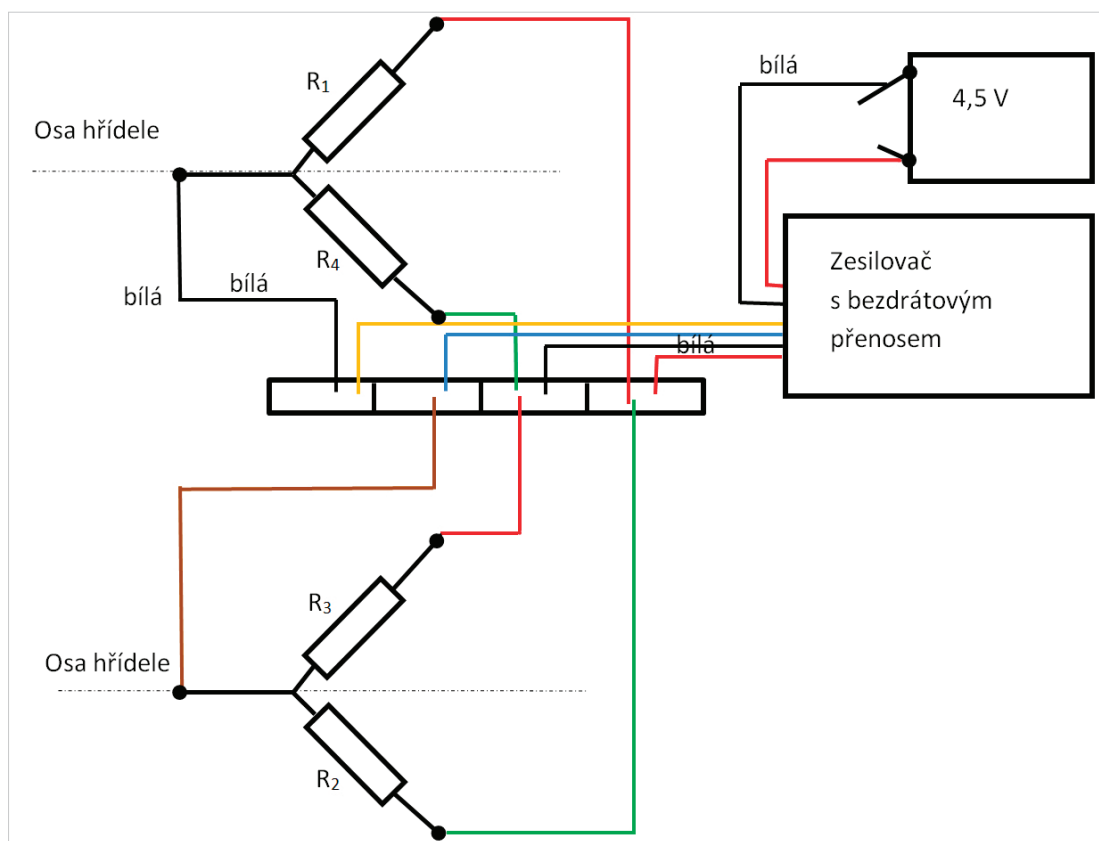
Tenzometrický zesilovač byl spolu s napájecí baterií vsazen do přípravku (viz obrázek č. 8) a ten byl pomocí šroubů



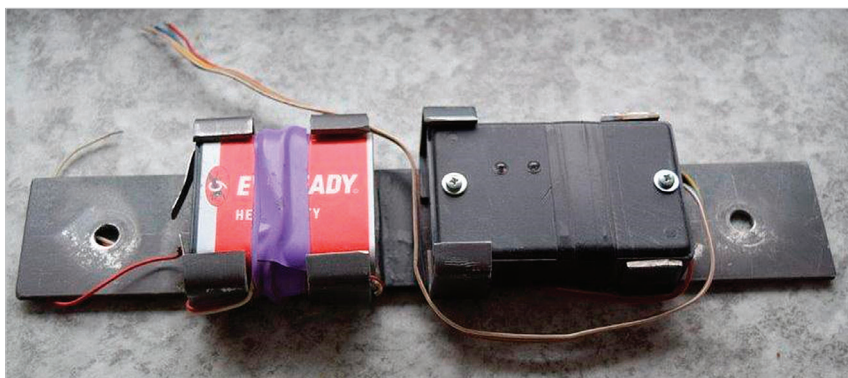
Obr. 5: Místo pro instalaci snímačů a vysílacího modulu.



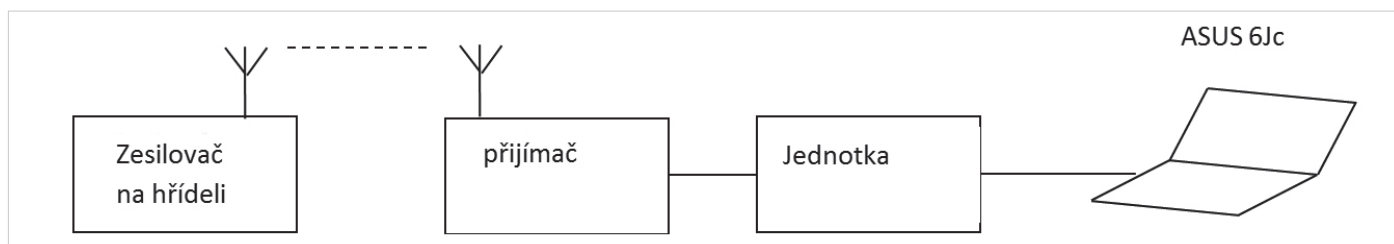
Obr. 6: Pohled na nalepené tenzometry a jejich propojení tenzometrickým kabelem.



Obr. 7: Schéma propojení tenzometrů.



Obr. 8: Přípravek.



Obr. 9: Schéma signálového připojení měřicí jednotky.

přípevněn na stěnu brzdového kotouče. Tenzometrický zesilovač byl pomocí plochého čtyřvodičového kabelu spojen s tenzometrickým mostem. Kabel byl pomocí elektrikářské izolační pásky připevněn ke hřídeli tak, aby byl eliminován vliv jeho odstředivé síly na kontaktní spoje kabelu.

Připojení měřicí jednotky a ověření funkčnosti měřicího řetězce

Elektrické připojení bylo provedeno dle schématu na obrázku č. 9. Následně byla odzkoušena funkčnost a bezdrátové ovládání měřicí jednotky pomocí notebooku za klidu kola.

4 Výsledky měření [1]

Krouticí moment byl z naměřených dat stanoven z poměrné smykové – krutové deformace výpočtem pomocí teoretického vztahu, který je uveden v kap. 2.

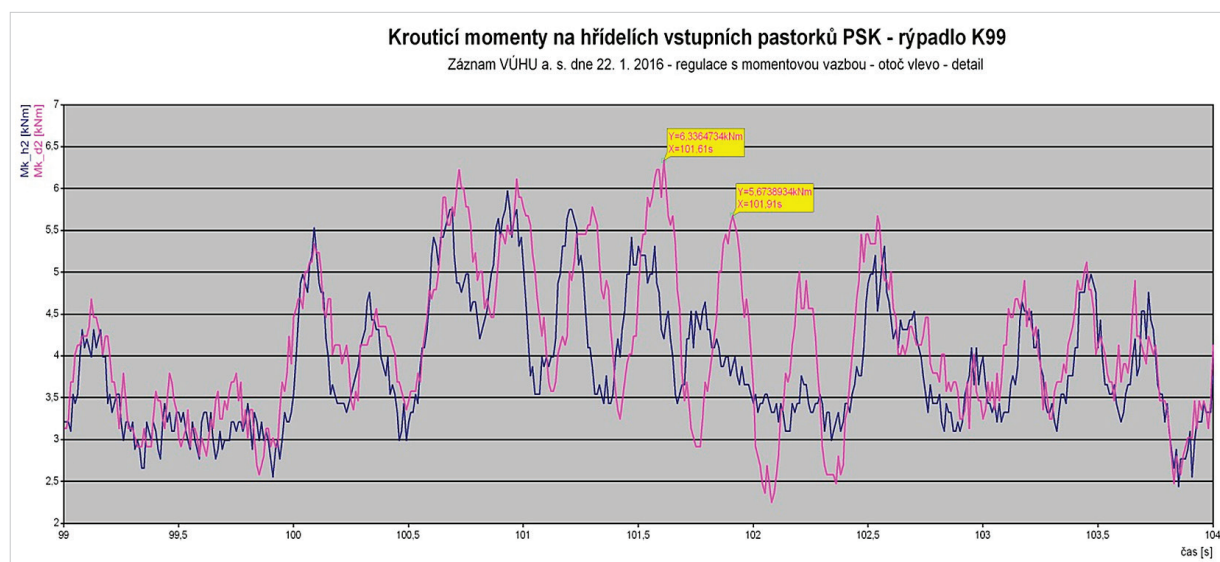
4.1 1. měření – řízení s momentovou korekcí ve zpětné vazbě

Statistické hodnoty krouticího momentu [kNm] v jednotlivých režimech práce rýpadla uvádí tabulka č. 2.

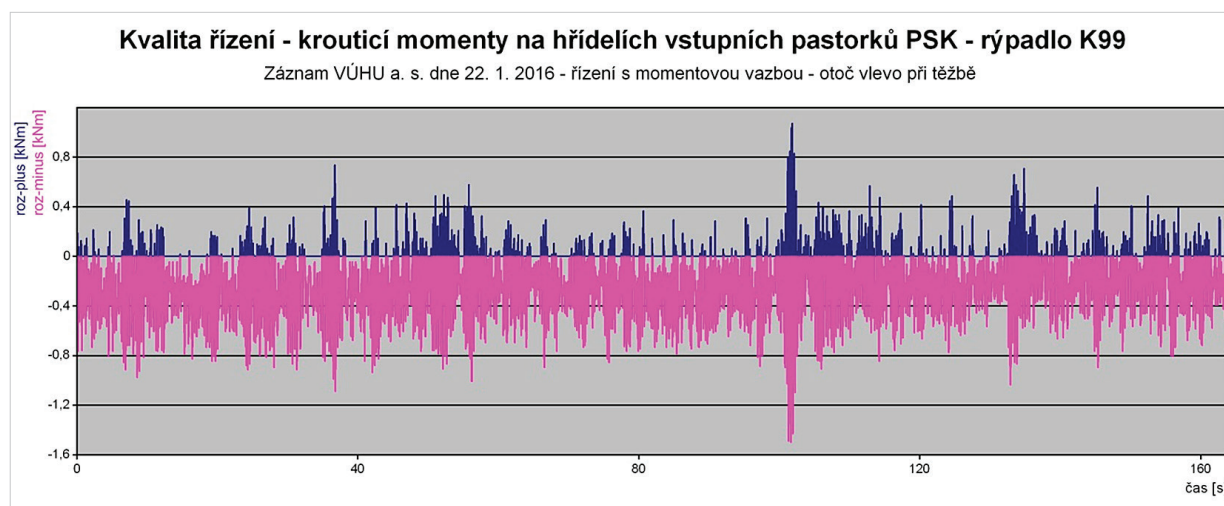
- 1) Při rozběhu je dolní pohon opožděn za horním pohonem o $\Delta t = 200$ ms. Motory mění prioritu. Dolní táhne víc než horní.
- 2) Při chodu naprázdno pro vztah mezi momenty platí:
 - $M_h = 0,82 M_d$,
 - hodnoty momentů kolísají od maxima do minima s periodou 12,7 s (odpovídá otáčkové frekvenci kola – mírná nevyváženost),
 - s periodou 1,47 s na okamžik platí $M_h > M_d$.
- 3) Pohony ve spektrech vykazují špičky amplitudy na frekvencích:
 - 0,68 Hz - horní pohon přibližně 3x vyšší hodnoty než dolní,

Tab. 2: Statistika velikosti krouticích momentů [kNm] v režimu s momentovou korekcí ve zpětné vazbě.

Režim práce	Střední	Max.	Min.	Rozptyl	Max./stř.	Časový interval
Pohon horní						[s]
Vlevo naprázdno	0,329	0,812	0,040	0,104	2,468	705÷815
Vlevo rýpání	3,600	5,782	1,656	0,566	1,606	850÷1 030
Vpravo rýpání	3,444	5,411	1,465	0,571	1,571	1 110÷1 290
Pohon dolní						
Vlevo naprázdno	0,407	0,715	0,164	0,074	1,757	705÷815
Vlevo rýpání	3,843	6,037	1,931	0,600	1,571	850÷1 030
Vpravo rýpání	3,636	5,515	1,459	0,606	1,517	1 110÷1 290



Obr. 10: Detail střídání pohonů v tahu.



Obr. 11: Kvalita řízení; řízení s momentovou korekcí ve zpětné vazbě.

- 1,18 Hz - frekvence výsypů korečků,
 - 14,33 Hz - otáčková frekvence elektromotorů; dolní pohon přibližně 2x vyšší hodnoty než horní.
- 4) Pod zatížením se špičky ve spektrech posouvají k nižším frekvencím.
- 5) Střídání pohonů v tahu ukazuje detail časového průběhu při rýpání vlevo.

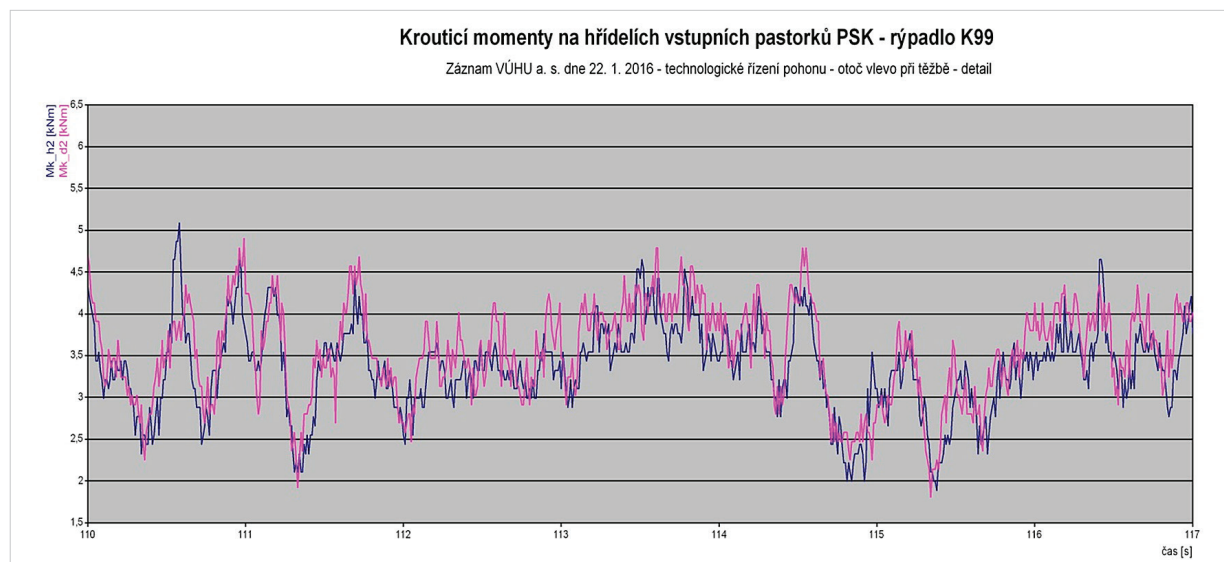
6) Kvalitu řízení můžeme posoudit např. z velikosti ploch nad a pod čarou nulového rozdílu momentů. Rozdíl těchto ploch by měl být minimální.

4.2 2. měření – řízení s technologickým regulátorem ve zpětné vazbě

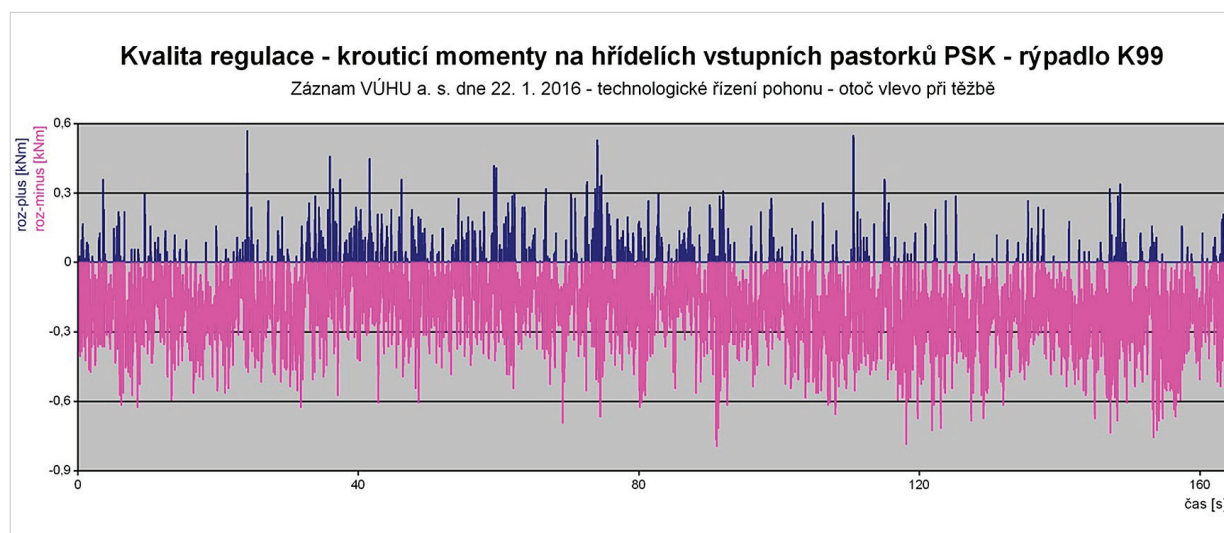
Statistické hodnoty krouticího momentu v jednotlivých režimech práce rýpadla uvádí tabulka č. 3.

Tab. 3: Statistika velikosti krouticích momentů [kNm] v režimu s technologickým regulátorem ve zpětné vazbě.

Režim práce	Střední	Max.	Min.	Rozptyl	Max./stř.	Časový interval
Pohon horní						[s]
Vlevo naprázdno	0,403	0,803	0,120	0,103	1,993	1 700÷1 730
Vlevo rýpání	3,698	6,093	1,787	0,582	1,648	1 750÷1 930
Vpravo rýpání	3,492	5,893	1,666	0,604	1,688	2 045÷2 225
Pohon dolní						
Vlevo naprázdno	0,413	0,666	0,205	0,073	1,613	1 700÷1 730
Vlevo rýpání	3,882	6,087	1,710	0,640	1,568	1 750÷1930
Vpravo rýpání	3,699	6,037	1,720	0,660	1,632	2045÷2 225



Obr. 12: Detail střídání pohonů v tahu; řízení s technologickým regulátorem.



Obr. 13: Kvalita řízení; řízení s technologickým regulátorem ve zpětné vazbě.

1) Při rozběhu je dolní pohon před horním pohonem o $\Delta t = 20$ ms. Motory se střídají v tahu. Dolní pohon má menší rozkmit.

2) Při chodu naprázdno pro vztah mezi momenty platí:

- $M_h = 0,98 M_d$,
- hodnoty momentů kolísají od maxima do minima s periodou 12,7 s (odpovídá otáčkové frekvenci kola – mírná nevyváženost).

3) Pohony ve spektrech vykazují špičky amplitudy na frekvencích:

- 0,68 Hz - horní pohon přibližně 3x vyšší hodnoty než dolní,
- 1,18 Hz - frekvence výsypů korečků,
- 4,33 Hz - otáčková frekvence elektromotorů; dolní pohon přibližně 1,5x vyšší hodnoty než horní.

4) Pod zatížením se špičky ve spektrech posouvají k nižším frekvencím.

5) Střídání pohonů v tahu ukazuje detail časového průběhu při rýpání vlevo.

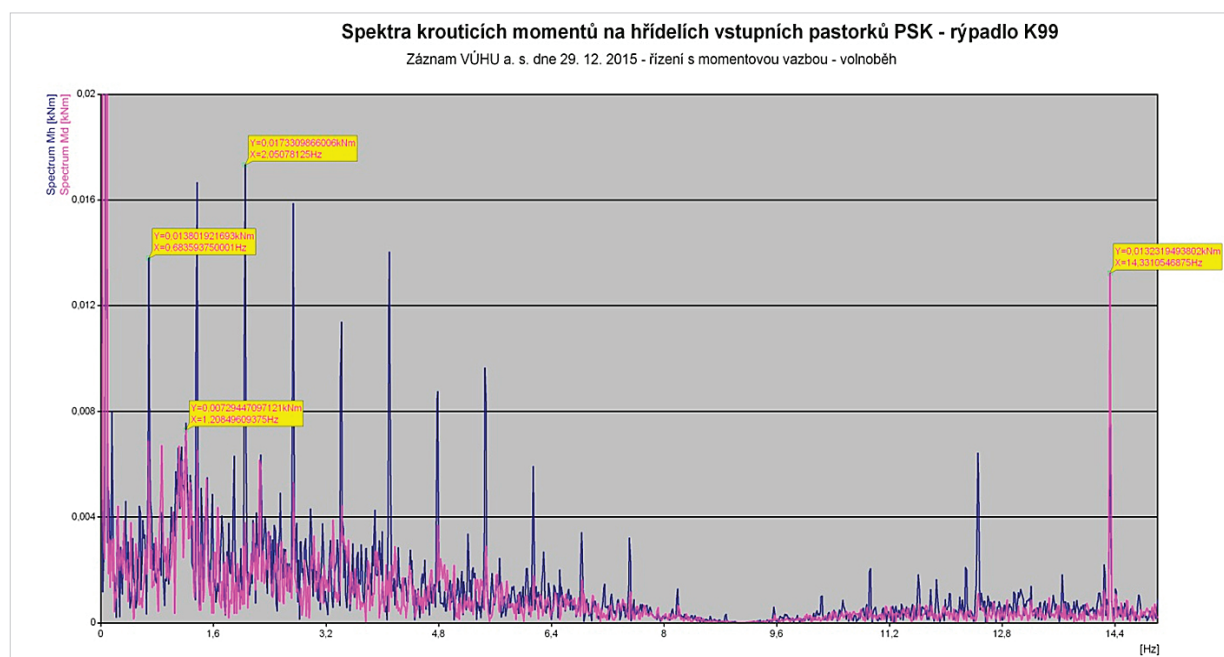
6) Kvalitu řízení posoudíme např. z velikosti ploch nad a pod čarou nulového rozdílu momentů.

5 Závěr

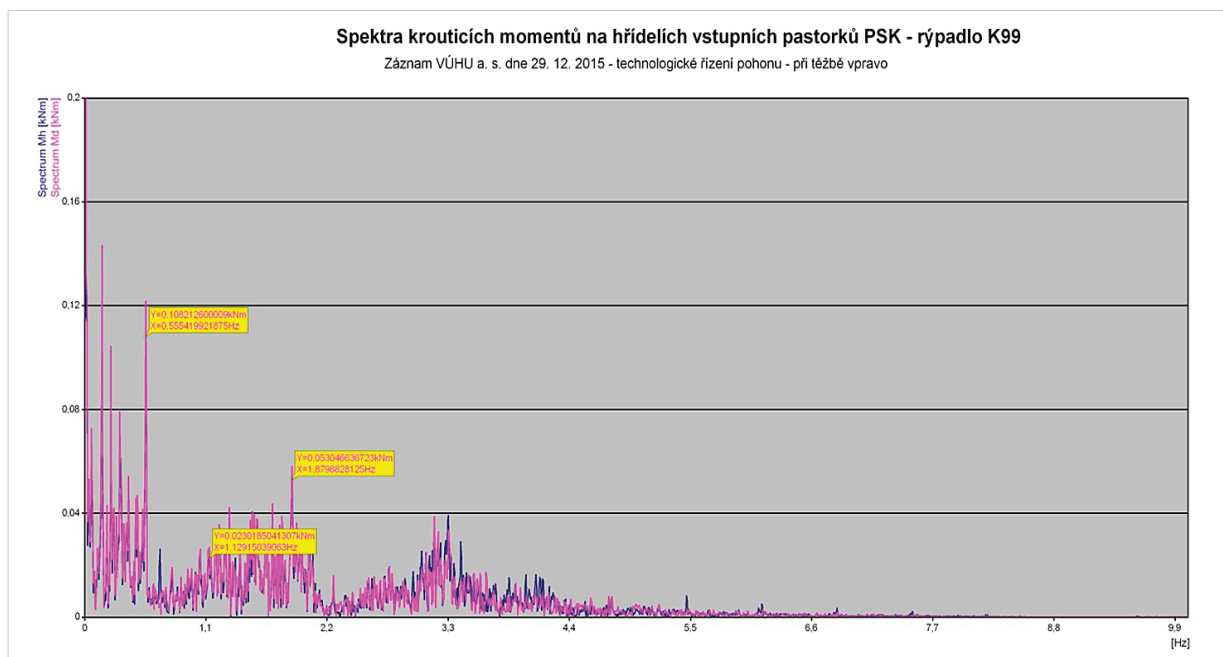
Na základě požadavku Severočeských dolů a.s. byla na počátku roku 2016 provedena dvě měření s cílem porovnat vstupní zatížení převodovky pohonu při dvou rozdílných způsobech řízení pohonu. Při prvním měření probíhalo řízení otáček pohonu s momentovou korekcí ve zpětné vazbě. Při druhém měření byl pohon řízen tzv. technologickým regulátorem ve zpětné vazbě. Dále je uvedeno stručné shrnutí výsledků měření.

Rozběh pohonu:

- v režimu řízení s momentovou korekcí ve zpětné vazbě dolní pohon opožděn za horním pohonem o $\Delta t = 200$ ms,



Obr. 14: Spektra krouticích momentů při volnoběhu; červeně dolní pohon.



Obr. 15: Spektra krouticích momentů při těžbě; červeně dolní pohon.

- v režimu řízení s technologickým regulátorem ve zpětné vazbě dolní pohon předchází horní pohon o $\Delta t = 20$ ms.

Běh naprázdno - volnoběh:

- v režimu řízení s momentovou korekcí ve zpětné vazbě $M_h = 0,82 M_d$ a na okamžik platí $M_h > M_d$ s frekvencí 0,68 Hz,
- v režimu řízení s technologickým regulátorem je střídání pohonů více periodické, momenty kmitají s menší amplitudou než u řízení s momentovou korekcí $M_h = 0,98 M_d$,
- ve spektrech se projevují frekvence 0,68 Hz (více na horním pohonu) a otáčková 14,33 Hz (více na dolním pohonu), viz obrázek č. 14,
- kvalita řízení podle ploch nad a pod čarou nulového rozdílu momentů $M_h - M_d$:

	Délka záznamu	Podíl ploch	Součet ploch
Korekce momentu	160s	0,197	18,48 kNm.s
Technologické řízení	160s	0,964	13,20 kNm.s

Podíl ploch = plocha nad 0/plocha pod 0. Kvalita řízení je tím lepší, čím více se podíl ploch blíží 1 a čím menší je součet ploch.

Běh pod zatížením - těžba:

- v režimu řízení s momentovou korekcí ve zpětné vazbě se motory periodicky střídají v tahu. Dolní pohon se rozchází s horním pohonem až o $\Delta t \approx 150$ ms (perioda střídání v tahu). Rozkmit amplitudy momentu je menší při otoči horní stavby vpravo než při otoči vlevo. Při otoči horní stavby vlevo je rozkmit amplitudy momentu větší u dolního pohonu,
- v režimu řízení s technologickým regulátorem ve zpětné vazbě se dolní pohon rozchází s horním pohonem až o $\Delta t \approx 20$ ms. Horní pohon kopíruje (se zpožděním 20 ms) pohon dolní. Rozkmit amplitud momentů je menší než u řízení s momentovou korekcí ve zpětné vazbě,

- ve spektrech se projevují frekvence 0,16 Hz; 0,24 Hz; 0,55 Hz; 1,15 Hz a 1,88 Hz, viz obrázek č. 15,
- kvalita řízení podle ploch nad a pod čarou nulového rozdílu momentů $M_h - M_d$:

	Délka záznamu	Podíl ploch	Součet ploch
Korekce momentu	160s	0,130	46,36 kNm.s
Technolog. regulace	160s	0,068	36,55 kNm.s

- statistické dynamické hodnoty krouticího momentu:

Režim řízení	Střední hodnota	Rozptyl	Max./stř.
Momentová korekce	3,63	0,59	1,57
Technolog. regulátor	3,69	0,62	1,63

Poděkování

Tento článek byl vypracován v rámci projektu BEWEXMIN za finanční podpory EU z prostředků rozpočtu RFCS (Výzkumný fond pro uhlí a ocel).

Literatura

- [1] KLOUDA, P.: Měření krouticích momentů na hřídelích vstupních pastorků převodovky pohonu kola rýpadla KU 800.18/K99. VÚHU a.s., TPD-014/16.
- [2] HELEBRANT, F.: Konstrukce velkostatrojů a jejich spolehlivost - II. Provozní spolehlivost. MONTANEX, a.s. Ostrava 2004, I. vydání., 89 s., ISBN 80-7225-X.