

Ing. Ladislav H y n a i s, VÚHU

Měření dynamického namáhání vybraných strojních uzlů na rypadle KU 307

Kolesové rypadlo KU 307, zasazené na velkolomu Jan Šverma, bylo vybráno jako první k provedení rekonstrukce špičky kolesového výložníku. Rekonstrukce spočívala v tom, že původní pohon kola běžný v celé sérii vyráběných rypadel řady KU 300 byl nahrazen novým satelitním pohonem za použití osvědčených a spolehlivých prvků rypadel K 1000, tedy pohonem pomocí pastorku a ozubeného věnce. Provedením rekonstrukce se snížila hmotnost špičky kolesového výložníku o 9,7 Mg, dále se získala možnost lepšího vytváření bočních svahů. Naproti tomu se však mnohonásobně zvýšila tuhost celé soustavy pohonu, což mělo za následek, že dynamické rázy, které byly u původního provedení podstatně více tlumeny zmíněnou soustavou, se nyní převedly na ostatní nerekonstruované části horní a dílem i spodní stavby stroje.

Proto bylo navrženo OÚ Most provést takové komplexní měření namáhání vytypovaných strojních uzlů, jehož výsledky by objektivně objasnily skutečný stav.

K tomuto měření byla národním podnikem Uničovské strojírně vypracována metodika a po vzájemné konzultaci stanoveno i přesné rozmístění snímačů, povětšinou tenzometrických.

Celé komplexní měření bylo možno rozdělit do dvou základních směrů nazvaných podle svého charakteru jako část statická a část dynamická. I když první statická část přinesla cenné poznatky, zejména o chování a stavu kulové dráhy, nebude v tomto článku vzhledem k jeho zaměření dále rozváděna.

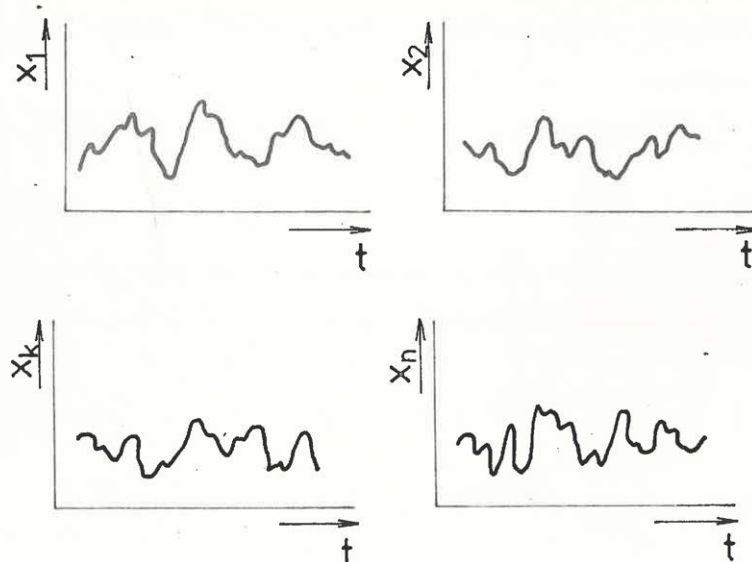
Dílní cíle měření dynamických účinků zatížení je možno charakterizovat takto:

- 1) zjistit přídavné zatížení od provozních stavů vybraných částí rypadla ve velmi obtížných báňsko-technologických podmínkách
- 2) porovnat, zda naměřená provozní zatížení se pohybují v normových hodnotách
- 3) zjistit jak se podílí vliv rezonance napětí na vlastním zatěžování sledovaných průřezů ocelové konstrukce stroje
- 4) zjistit zda existuje korelační vztah mezi mechanickým namáháním ně-

kterých průřezů ocelové konstrukce a elektrickým zatížením kolesového motoru.

Všechny hodnoty, s výjimkou porovnání uvedené pod bodem 2, mají charakter náhodných procesů. Náhodný proces lze charakterizovat jakožto náhodnou funkcí času. Hodnota náhodné funkce pro každou hodnotu nezávisle proměnné je však náhodná veličina, takže náhodná funkce je reprezentována nekonečným souborem náhodných veličin, které závisejí na nezávisle proměnné (tedy v našem případě na čase). Jednotlivé členy souboru mohou být zjištěny experimentálně - jsou to tzv. realizace náhodného procesu. Z matematického hlediska se pod pojmem náhodný proces chápá soubor všech možných realizací se společnými statistickými vlastnostmi. Z fyzikálního hlediska se pod tímto pojmem rozumí jev, který v čase probíhá náhodně.

Průběh mechanického namáhání vyvolaný procesem rozpojování hornin, může být ilustrativním příkladem těchto procesů. Budeme-li mít několik měřicích záběrů z téhož stroje, při stejných podmínkách (rychlost otáčení kola, otáčení horní stavby, velikost rýpané štěpiny), pak jednotlivá napětí jsou jednotlivými realizacemi téhož náhodného procesu. Pozorováním jednotlivých napětí $x_1(t)$; $x_2(t)$; ... $x_n(t)$ bychom zjistili, že jejich průběhy jsou rozdílné (obr. 1), třebaže patří k témuž náhodnému procesu. I když známe průběh několika realizací, nemůžeme určit průběh realizace další. Rovněž znalost průběhu realizace v minulosti neumožňuje určit průběh této realizace do budoucna. Vlastnosti náhodného procesu mohou být proto popsány jen statisticky.

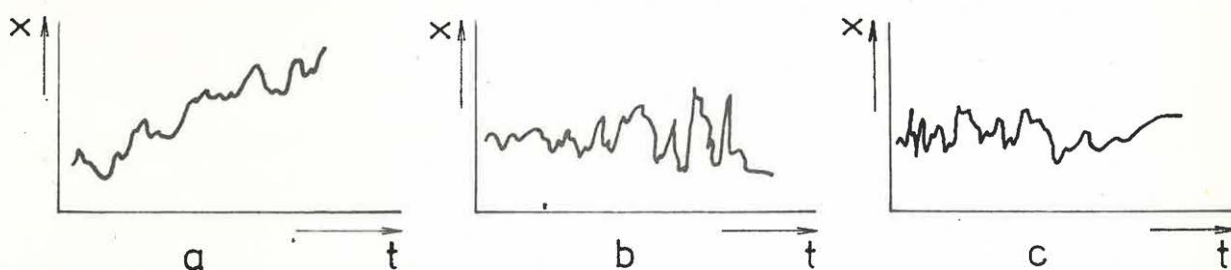


Obr. 1

Podle statistických vlastností dělíme náhodné procesy do několika skupin. Proces, jehož statistické vlastnosti se v čase nemění, je tak zvaný stacionární proces. Jestliže se s časem nemění žádná ze statistických vlastností náhodného procesu, které jsou vytvářeny hustotami pravděpodobnosti všech řádů, jde o stacionaritu v užším smyslu - proces je úplně (silně, přísně) stacionární. Méně přímoou formou je stacionarita v širším smyslu, kterou se vyznačují tzv. slabě stacionární náhodné procesy. Stacionarita procesu je ovšem idealizací. Ve skutečnosti žádný proces nemůže probíhat nekonečně dlouho beze změny vlastností. Za stacionární se proto pokládá náhodný proces, jehož statistické vlastnosti se nemění po dostatečně dlouhou dobu.

Nestacionární náhodný proces je takový, jehož statistické vlastnosti se v čase mění. Podle toho jak a která vlastnost (resp. vlastnosti) se mění, je možné rozřadit nestacionární náhodné procesy do podskupin (obr. 2):

- a) nestacionární náhodné procesy s proměnnou střední hodnotou
- b) nestacionární náhodné procesy s proměnným rozptylem
- c) nestacionární náhodné procesy s proměnným spektrem.

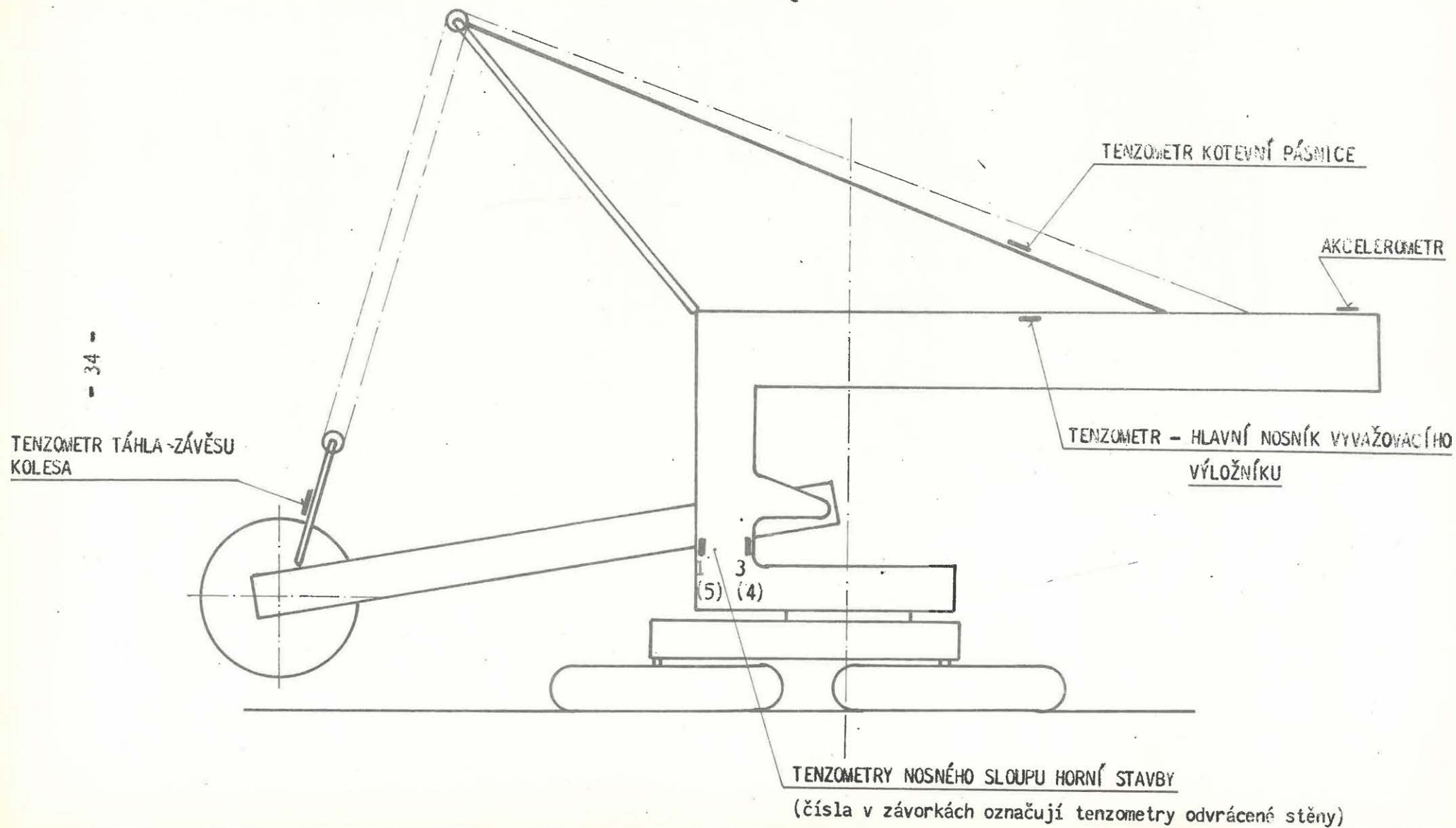


Obr. 2

Vlastní měření:

Jak již bylo uvedeno v první části článku bylo měřeno namáhání v místech určených výrobcem stroje (obr. 3). Tenzometrické snímače byly přitmeleny na nosný sloup horní stavby (a to na levý, při pohledu ze stroje na říditelnou housenici) v místech nad hlavním spojovacím svěrem spodní a horní stavby, dále na kotevní pásnici na straně kola, na levé táhlo kolesového výložníku a na levý horní podélný nosník vyvažovacího výložníku. Kromě těchto snímačů byl na konci vyvažovacího výložníku připevněn absolutní snímač zrychlení - akcelerometr zn. Philips. Všechny mechanické veličiny byly pomocí tenzometrických můstků převá-

Obr. 3 - Orientační náčrtok rypadla KU 300 a rozmístění snímačů



děny na veličiny elektrické a záznamově zpracovány měřicím magnetofonem Tesla EMM 141 s frekvenční modulací.

Kromě uvedených veličin byl měřicím magnetofonem ještě měřen průběh elektrického zatížení kolesového motoru a záznamová značka v okamžiku zapůsobení ochrany proti nedovolenému odlehčení zdvihových lan a prokluzu elektromagnetické spojky.

Kromě měření veličin magnetofonem EMM 141 probíhalo současně samostatné měření rypných odporů nepřímým způsobem odvozených od měření výkonového zatížení kolesového motoru a rýpané štěpiny, dle metodiky vyvinuté ve VÚHU. Celé dynamické měření bylo realizováno v průběhu pěti prodloužených pracovních směn tak, aby v něm bylo možno obsáhnout všechny možné technologické způsoby těžby, a to pokud možno v nejobtížnějších báňských podmínkách. Bylo zaznamenáno celkem 113 naměřených realizací v souhrnné době cca 120 minut. Délky jednotlivých realizací se pohybovaly v časových úsecích 15 - 200 s, při čemž byla snaha získávat realizační záběry s průměrnou dobou trvání 60 s.

K průběžné kontrole záznamu sloužil osmikanálový pomaluběžný oscilograf Tesla, do kterého byly trvale zaváděny veličiny měřené magnetofonem.

Po skončeném měření byly všechny zaznamenané průběhy realizací z jednotlivých stop přehrány na registrační papír oscilografem RFT. Tato reprodukce byla nutná pro provedení redakce a výběru těch záznamů, které přicházely v úvahu pro detailní vyhodnocení samočinným počítačem. Vzhledem k tomu, že se jednalo o první měření prováděné touto záznamovou aparaturou, bylo provedeno i manuální vyhodnocení extrémních hodnot jednotlivých realizací. To umožnilo i při následném převedení analogového záznamu do digitální formy optimální využití rozsahu analogo-číslíkového převodníku.

V první fázi výběru realizačních záznamů pro další vyhodnocování počítačem bylo vybráno 20 realizací, po upřesnění rozsahu s ohledem na možnost uvolnění strojového a operačního času počítače, a tím i na finanční náklady spojené s tímto vyhodnocováním, bylo nutno původní výběr redukovat na 7 realizačních záznamů.

Při tomto výběru bylo dbáno toho, aby jednotlivé režimy obsahovaly různé technologické způsoby těžby, a zejména aby byly vybrány záznamy s nejvyššími hodnotami (a to jak kladnými, tak i zápornými) měřených veličin.

Zpracování výsledků:

Nahrané analogové záznamy byly převedeny do digitálního zápisu na magnetické pásce zařízením Výzkumného a zkušebního leteckého ústavu (VZLÚ) Letňany typu IMS II. Magnetická páska měla formát umožňující její využití počítači 3. generace. Zařízení umožňuje výpis 10 náhradních kanálů současně, před vlastní digitalizací byly filtrovány analogovou dolnofrekvenční propustí s mezní frekvencí 10 Hz.

Digitalizované záznamy byly zpracovány ve výpočetním středisku VZLÚ. Přitom byly použity programy vypracované ve VZLÚ v oddělení analýzy a programování. Pro vyhodnocování charakteristik druhého řádu se ukázalo účelným členit původní soubory na jednotlivé části, které byly dále ještě podle potřeby předběžně upravovány k dosažení stacionárního charakteru záznamu. Byly použity dva druhy úprav a to odstranění lineárních trendů z posloupnosti diskretních dat a frekvenční číslicové filtrace k odstranění nízkofrekvenčních složek pomocí Ormsbyho filtru. Tyto nízkofrekvenční složky namáhání se projevily zejména v realizacích zjištěných na nosném sloupu a byly zapříčiněny posuvem těžiště stroje při otáčení kolesového a vyvažovacího výložníku při pracovním procesu těžby. Při přehrávání analogových záznamů do diskretních posloupností byla provedena korekce na napěťové graduační signály ze soustavy DMD II. Diskretizované veličiny jsou vyjádřeny třícifernými celými čísly se znaménkem v tzv. jednotkách interního zobrazení (JIZ).

Signály z akcelerometru nebyly graduovány, neboť byla požadována informace pouze o frekvenčních oblastech naměřených vibrací.

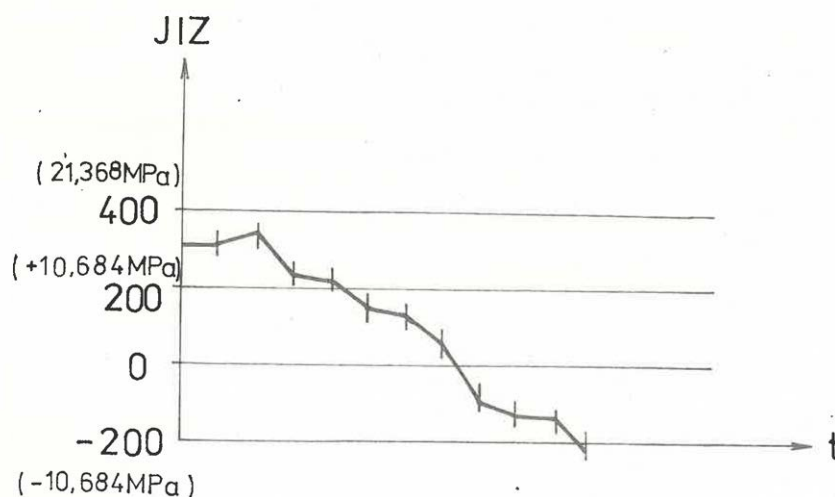
Magnetická páska s bloky digitálních údajů byla převedena na počítači EC 1021 na děrnou pásku a tato pak dále zpracována počítačem Minsk 22. Tento poněkud nepraktický postup bylo nutno zvolit proto, že v době zpracování nebyly v VZLÚ k dispozici programy pro počítač EC 1021, naproti tomu však soubor programů pro Minsk 22 je ve VZLÚ rutinně používán již řadu let. Avšak ani v tomto případě nebylo možné vzhledem k nedostatku programátorské kapacity ve VZLÚ připravit speciální programy dle požadavku zadavatele. I tak lze konstatovat, že soubor vyhodnocených statistických charakteristik poskytuje solidní informaci o namáhání měřených míst.

Skutečnost, že měřené procesy vykazují větší či menší nestacionárnost byla vzata v úvahu takto:

- a) při vyhodnocování distribučních funkcí byly záznamy rozděleny na dílčí úseky v trvání 10 s, v jejichž rozmezí byl proces považován za kvazistacionární. Porovnání výsledků získaných v jednotlivých dílčích úsecích umožnilo posoudit velikost a charakter nestacionárnosti;
- b) při vyhodnocování charakteristik druhého řádu (korelačních funkcí a výkonových spektrálních hustot) byly u dílčích záznamů vybrány dílčí části s kvazistacionárním charakterem, jehož se v některých případech dosáhlo doplnkovým odstraněním lineárního trendu.

Přehled výsledků:

Distribuční funkce a extrémní hodnoty byly vyhodnoceny pro všechny vybrané realizace mechanického namáhání. Výsledkem jsou tiskové sestavy z počítače, obsahující tabulky absolutních četností výskytu veličiny přiřazené ke středům třídních intervalů, relativní kumulativní četnosti přiřazené k horním hranicím třídních intervalů, dále bodové vykreslení hustoty pravděpodobnosti a distribuční funkce a konečně momentové charakteristiky funkce rozdělení. Protože jde o velmi obsáhlý materiál, nemohou být tyto výsledky součástí článku. V jednotlivých tabulkách jsou uvedeny střední hodnoty M , směrodatné odchylky σ , koeficienty šikmosti A a koeficienty špičatosti E . Dále byly zjištěny extrémní hodnoty pro celé soubory. Představu o změnách statistických charakteristik jak v průběhu jednotlivých režimů, tak pro soubor záznamů jako celek dává přehled, z něhož jedna část je pro ilustraci uvedena na obrázku 4.



Obr. 4 - Přehled změn středních hodnot a směrodatných odchylek namáhání měřené na nosném sloupu horní stavby

Horizontální a šikmé čáry jsou spojnice odhadů středních hodnot v závislosti na probíhajícím čase jednotlivých záznamů, svislé úsečky vyznačující zjištěné směrodatné odchylky $\pm \sigma$. Časový krok mezi jednotlivými údaji je 10 s.

Při celkovém hodnocení výsledků statistického zpracování záznamů podle distribučních funkcí lze konstatovat, že měřené procesy jsou zřejmě nestacionární, zejména ve střední hodnotě, v některých případech i v rozptylu. Nejvýraznější nestacionárnost v průběhu všech záznamů se projevila u snímače č. 4 umístěném na sloupu horní stavby. Nestacionárnost ve střední hodnotě a rozptylu samozřejmě přímo ovlivňuje výskyt absolutních extrémních hodnot na daném časovém intervalu.

Procesy namáhání naměřené na táhle závěsu kola a na kotevní pásnici mají charakter náhodných procesů s prakticky gaussovským rozdělením amplitud. Odchylky od tohoto normálního rozdělení je možno posuzovat jednak vizuálně, jednak z velikostí koeficientů šikmosti A a špičatosti E , které jsou pro normální rozdělení nulové.

Procesy namáhání naměřené na snímačích nosného sloupu a hlavního nosníku vyvažovacího výložníku mají většinou charakter harmonických procesů s více či méně náhodně modulovanou amplitudou a aditivním náhodným šumem. Přitom většina procesů této skupiny má proměnlivou střední hodnotu. Uvedené vlastnosti se projevují ve tvaru distribuční funkce, která se pro jednotlivé realizace mění od typu téměř gaussovského až po typ téměř arcsinový, odpovídající čistému harmonickému procesu.

Jedním z cílů experimentálního výzkumu a předmětného měření byla snaha o odhalení předpokládaných korelací mezi dynamickými jevy probíhajícími v několika typických místech konstrukce a zejména zjištění jaká je vzájemná korelace mezi namáháním těchto bodů a průběhem elektrického zatížení motoru pohonu kola.

Proto byly pro jeden měřicí záznam spočítány autokorelační funkce všech měřených realizací náhodných procesů a rovněž jejich vzájemné korelační funkce. Protože bylo zjištěno, že záznamy ze snímačů na nosném sloupu a na nosníku vyvažovacího výložníku mají téměř shodné korelační funkce odpovídající mírně zašuměnému harmonickému procesu, omázilo se další vyhodnocování autokorelačních funkcí i funkcí vzájemných korelací. Tyto vzájemné korelace byly v dalším vyhodnocovány mezi dvojicemi naměřených procesů, a to vždy mezi průběhem elektrického zatížení mo-

toru kola a mechanickým namáháním táhla, kotevní pásnice a nosného sloupu. Z těchto funkcí vzájemných korelací byly vypočteny výkonové spektrální hustoty jednotkového výkonu a zakresleny do diagramů.

Vlastnosti zpracovaných vzorků procesů podle jejich charakteristik druhého řádu lze formulovat tak, že téměř shodné vlastnosti měly záznamy namáhání táhla kola a kotevní pásnice. Procesy zjištěné z namáhání nosného sloupu, nosníku vyvažovacího výložníku, a do značné míry též záznam z akcelerometru, mají korelační funkce tvaru téměř čisté kosinusoidy s mírným poklesem amplitudy. Při této příležitosti je možno poznamenat, že velikost poklesu korelační funkce přímo souvisí se součinitelem útlumu té příslušné části konstrukce, kterou prošel budicí signál. Vzájemné korelace ukázaly, že kmity byly prakticky buď ve fázi nebo v protifázi. Dominantní frekvence tohoto téměř čistého harmonického kmitání s náhodně proměnlivou amplitudou je ca 0,72 Hz, což je zřejmě první vlastní frekvence konstrukce horní stavby rypadla KU 307 jako celku. Podle povahy provozních režimů mají tyto kmitavé procesy proměnlivou střední hodnotu.

Procesy naměřené na táhle kola a kotevní pásnici mají dvě prakticky stejně výrazné frekvenční oblasti: první je v rozmezí 0,5 - 1 Hz, a tedy překrývá i hodnotu 0,72 Hz, druhá je v rozmezí 1,4 - 2,9 Hz a patrně odpovídá vlastní frekvenci jednak samotného kolesového výložníku, a jednak kotevní pásnice.

Průběh elektrického zatížení motoru kromě první výrazné oblasti 0,5 - 1 Hz vykazuje řadu dalších frekvenčních oblastí, které se mění s provozním režimem. Nepodařilo se objevit výraznou korelaci mezi realizací tohoto procesu a realizací měřeními ostatními snímači. Zcela evidentně se negativně projevuje vliv setrvačných hmot zařazených mezi rypný orgán a vlastní elektromotor pohonu kola.

Na tabulce č. 1 jsou vyhodnoceny minimální a maximální hodnoty napětí při jednotlivých realizacích vyvolané různými režimy těžby ve všech sledovaných uzlech konstrukce, graduované přímo v MPa. Při tom je nutno mít na zřeteli, že se jedná pouze o průběhy dynamické složky namáhání v těchto uzlech. Kladná a záporná znaménka hodnot namáhání je nutno chápat pouze relativně, a to v tom smyslu, že kladné hodnoty znamenají zvýšení a záporné snížení statického namáhání daného měřeného místa vyvolaného vlastní tíhou horní stavby rypadla. Ve skutečnosti se

tedy u všech sledovaných částí jednalo o dynamické namáhání pulzujícím napětím. V předmětné tabulce jsou v rubrikách označených značkou Σ vyneseny celkové změny napětí způsobené dynamikou stroje a inhomogenitou zeminy. K jednotlivým realizacím jsou přiřazeny i hodnoty měrných rypných odporů k zjišťovaných nepřímou metodikou VÚHU. I z tohoto vyhodnocení je patrné, že zatížení sledovaných míst neodpovídá v přímé úměrnosti velikosti rypných odporů. Na příklad pokles měrných rypných odporů u realizací 1 a 6 je přibližně o 70 %, avšak průměrné zatížení měřených míst pokleslo pouze o ca. 10 %. Z toho lze usoudit, že zatížení v určitých polohách kolesového výložníku, zejména při rýpání dolních lávek, je vyvoláno z převážné části dynamikou kolesového výložníku a pohonu kola, zatím co měrné rypné odpory ztrácí svůj dominantní charakter.

Závěr

Provedené měření a vyhodnocené výsledky ukazují na pulzující napětí v místech snímačů. V exponovaných uzlech ocelové konstrukce, kde bylo provedeno měření dosahují výchylky pulzujících hodnot ca. ± 20 MPa. Z tohoto hlediska bude vhodné přepočítat alespoň tyto exponované uzly ocelové konstrukce na únavu, protože stávající výpočtová norma dosud neuvažuje ve statickém výpočtu skutečné dynamické poměry, které vyplývají z těžkých provozních podmínek. Pro potvrzení dynamických účinků bude vhodné využít i modelové techniky jak pro jednotlivé části ocelové konstrukce, tak i pro celý stroj. Bylo by účelné se jednak pokusit o vytvoření analytického modelu uvažované konstrukce, z čehož by se ještě hlouběji objasnily okolnosti vedoucí k naměřeným oblastem převládajícího kmitání a z něhož by po případě vyplynuly možnosti omezení jejich intenzity. Stejnou úlohu by v podstatě mohl splnit geometrický podobný model konstrukce s možností variantních úprav sloužících zejména k proměření jeho dynamických vlastností.

Literatura

- V. Matyáš: Měření, analýza a vytváření náhodných procesů
VZLÚ Letňany: Statistické zpracování měření na rypadle KU 307
VÚHU Most: Racionalizace kolesových rypadel KU 300

Recenzoval: Ing. Ferdinand Vondráček

Tabulka č. 1

Tabulka č. 1											
Tenzometrické snímače		Táhló závěsu kolese	Kotovní pásnice	Nosní sloup horní stavby				Hlavní nosník vyvaž. výlož.	Rýpné odpory ^{x)}		
				1.	2.	3.	4.		$k_{\max-1}$ (kN.m ⁻¹)	$k_{\text{stř-1}}$ (kN.m ⁻¹)	koef. nerov.
1.	min.	2,85	26,11	6,08	8,61	34,72	14,53	4,39	92,8	78,5	1,18
	max.	-2,85	-1,741	-20,26	-26,44	-8,31	-16,61	-24,16			
	Σ	5,70	27,86	26,34	35,26	42,73	31,15	28,55			
2.	min.	2,04	13,92	4,66	12,34	21,37	9,13	-12,30	92,2	79,1	1,16
	max.	-3,67	-10,44	-14,59	-19,39	-13,35	-12,45	-28,1			
	Σ	5,71	24,37	19,45	31,73	34,72	21,59	15,8			
3.	min.	2,45	8,70	4,05	6,35	29,38	16,19	-8,78	93,3	78,7	1,19
	max.	-2,85	-12,19	-20,26	-31,73	-10,68	-8,30	-29,86			
	Σ	5,30	20,89	24,32	25,39	40,06	24,49	21,08			
4.	min.	68,92	12,25	2,02	5,55	34,39	19,76	-6,42	83,98	77,68	1,08
	max.	-60,30	-19,25	-26,16	-41,65	-7,93	-9,68	-32,10			
	Σ	129,22	31,5	28,18	47,20	42,32	29,64	25,68			
5.	min.	8,61	7,00	2,01	11,11	23,81	9,88	-10,27	29,34	19,99	1,46
	max.	-25,84	-14,00	-22,13	-14,44	-13,22	-13,83	-28,24			
	Σ	34,46	21,00	24,14	25,58	37,03	23,71	17,97			
5.1	min.	18,95	5,25	4,02	19,99	15,87	3,16	-9,42	29,34	19,99	1,46
	max.	-24,12	-15,75	-15,29	-3,33	-18,52	-15,81	-26,54			
	Σ	43,07	21,00	19,31	23,32	34,39	18,97	17,12			
6.	min.	25,84	8,75	-1,60	21,10	18,52	-1,58	-12,84	23,97	22,42	1,06
	max.	-25,84	-14,00	-18,51	-3,33	-10,58	-18,97	-28,24			
	Σ	51,68	22,75	16,9	24,43	29,10	17,39	15,40			
7.	min.	10,34	7,00	2,01	8,33	38,04	13,83	-6,42	61,55	54,23	1,13
	max.	-31,01	-17,5	-26,16	-22,22	-10,58	-15,81	-32,10			
	Σ	41,35	24,50	28,17	30,55	40,62	29,64	25,68			

⁺ Pozn.: Realizace 1 - 4 rýpání 3. lávky
5 - 7 rýpání 4. lávky - úprava pláň