

Měření a stanovení charakteristických parametrů pohonů pro komplexní diagnostický systém pásového dopravníku

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

Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s., Most, klouda@vuhu.cz

Přijato: 6. 6. 2012, recenzováno: 22. 8. a 24. 8. 2012

Abstrakt

Příspěvek popisuje měření charakteristických parametrů pohonů poháněcí stanice pásového dopravníku dálkové pásové dopravy. Záměrem bylo doplnit měření elektrických příkonů, běžně prováděné na pohonech, měřením dalších fyzikálních veličin a získat tak představu o jejich vzájemných relacích a o relacích veličin z nich odvozených. Příspěvek obsahuje stručný popis původních měření, jejichž výsledky budou sloužit jako vstupní data pro vývoj komplexního diagnostického systému pro pásovou dopravu. Tento systém najde uplatnění ve výbavě širokého spektra pásových dopravníků, od malých až po velké, na kterých probíhalo toto měření.

Characteristic driving parameters measurement and determination for belt conveyor complex diagnostic system

The paper deals with characteristic driving parameters which were measured at belt conveyor driving station. In addition to electric input, which is measured by default, additional physical values were also measured in order to reveal their mutual relations. A short description of the conducted measurement is provided in the paper as the results form a basis for the development of belt conveyor complex diagnostic system. This system will be applicable to a wide spectrum of belt conveyors, not only to large-scale conveyors which were subject to measurement, but also to small-scale conveyors.

Messung und Bestimmung von Kenngrößen der Antriebe für das komplexe Diagnosesystem eines Gurtbandförderers

Der Beitrag beschreibt die Messung von Kenngrößen der Antriebe einer Antriebsstation für den Gurtbandförderer einer Fernbandanlage. Die Absicht war, die Messung der elektrischen Leistungsaufnahme von gemeinsam auf den Laufwerken ergänzen, die Messung anderer physikalischer Größen und bekommen eine Vorstellung über ihre gegenseitigen Beziehungen und Beziehungen Mengen die daraus abgeleitet sind. Der Beitrag beinhaltet eine kurze Beschreibung von ursprünglichen Messungen, deren Ergebnisse als Eingangsangaben für die Entwicklung eines komplexen Diagnosesystems für Bandanlagen dienen werden. Dieses System wird in einer breiten Skala von Gurtbandförderern, von kleinen bis zu großen zur Geltung gebracht, auf denen diese Messungen vorgenommen wurden.

Klíčová slova: pásový dopravník, diagnostický systém, měření, elektrické veličiny, mechanické veličiny.

Keywords: belt conveyor, diagnostic system, measurement, electric values, mechanical values.

1 Úvod

Konečným cílem projektu MPO FR-TII/537 „Komplexní diagnostický systém pro pásovou dopravu“ je malosériová zakázková výroba a prodej komplexního diagnostického systému pro pásové dopravníky nejrůznějších velikostí a navazujících služeb. Výstupem projektu je prototyp diagnostického systému na modelovém pásovém dopravníku a vypracované certifikované diagnostické metodiky.

Jedním z řady komplexních měření in situ, tedy měření na provozních zařízeních vybraných provozovatelů pásové dopravy, je i měření charakteristických parametrů pohonů. Smyslem těchto měření, prováděných rozdílnými technikami, je nalezení klíčových faktorů, které nejvíce ovlivňují spolehlivost a životnost pásových dopravníků.

Komplexní měření popisované v článku bylo provedeno při rozběhu dopravníku dálkové pásové dopravy (DPD) bez materiálu i s materiálem, při běhu naprázdno i s materiálem a při doběhu prázdného dopravníku i dopravníku s materiálem, a to v obou režimech napínání pásu. Měřeny byly následující veličiny pravého horního pohonu dopravníku [1]:

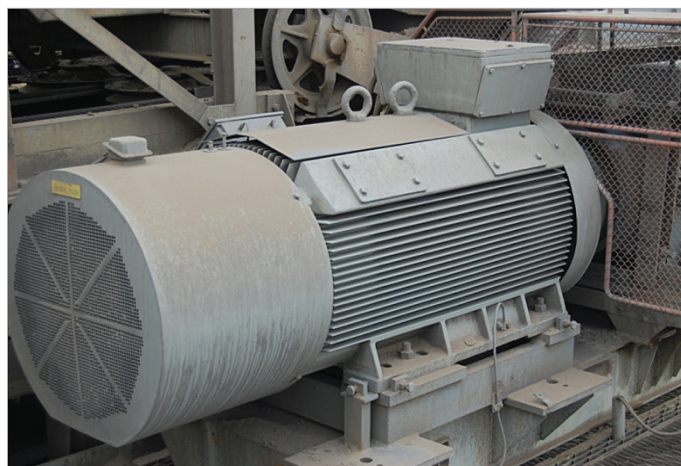
- příkon pohonu,

- napínací síla,
- otáčky hřídele hnacího bubnu,
- množství materiálu na páse,
- vibrace.

Tomuto měření předcházela řada měření na jiných páso- vých dopravnících a celá série bude zakončena dlouhodobým měřením na vlastním, pro účely tohoto projektu postaveným, pásovém dopravníku s uzavřenou cestou přepravy materiálu. V dalším období bude tento modelový dopravník osazen řídicím systémem a snímači. Níže popisovaným měřením budou neustále porovnávány naměřené hodnoty s výstupy prototypu diagnostického systému.

2 Elektrický příkon

Poháněcí stanice DPD (obrázek č. 1) měřeného pásového dopravníku je osazena třemi pohony bez frekvenčních měničů. Pohony jsou osazeny elektromotory o výkonu 500 kW, jmenovité napájecí napětí je 3x 6 000 V/50 Hz, jmenovitý proud 102 A, 743 otáček za minutu. Napínací zařízení pracovalo při měření pohonů v režimu deblok automatiky i v režimu automatika. Měření příkonu probíhalo na motoru M2. Fázová napětí byla snímána na měřicí svorkovnici (vývod sekundáru měřicího transformátoru



Obr. 1: Poháněcí stanice DPD a detail pohonu.

6 000 V/100 V) v rozvodné skříní, viz obrázek č. 2. Proud byl snímán klešťovými snímači 10 A na sekundárech proudových měřicích transformátorů.

K měření elektrických veličin na pohonech poháněcích stanic používáme analyzátoři elektrických napájecích sítí ENA 500 (viz obrázek č. 3), které jsou v provedení umožňujícím měření ve dvou napájecích systémech současně. Vedle výkonů umožňují měřit také efektivní i okamžité hodnoty proudů a napětí fázových i sdružených, harmonické i mezipharmonické složky napětí a proudu, činitele napěťové a proudové nesymetrie aj. Tyto analyzátoři také umožňují zobrazení a záznam rychlých napěťových změn, obsahují i monitor pomalých dějů, zapisovač poruchových dějů (disturbance) a hlavně možnosti záznamu a zobrazení dat z transientního zapisovače. Tento typ analýzy je charakteristický detailním zobrazením časového průběhu vybrané veličiny.

V grafu činných výkonů motoru M2 je na svislé ose uváděn odpovídající střední celkový činný výkon za interval agregace dat 200 ms. Dobou agregace dat se rozumí interval ukládání dat do datového souboru, zvolený v měřicí části. Během tohoto intervalu se ukládají střední, minimální a maximální hodnoty měřených veličin vyhodnocovaných jednou za základní periodu práce analyzátoru, která obnáší deset period měřené veličiny.

Při měření se účinník pohyboval okolo hodnoty $\cos \varphi = 0,7$, což je u pohonů bez frekvenčního řízení běžná hodnota.



Obr. 2: Způsob připojení proudových a napěťových snímačů při měření.

Vlastní rozběh plně naloženého dopravníku je obtížný a skrývá nebezpečí poškození jednotlivých komponentů dopravníku, od přetržení dopravníkového pásu, přes poškození převodových skříní, až k poškození poháněcích bubnů. Tato nebezpečí stoupají, pokud rozběh dopravníku není pozvolný a plynulý. Nejobtížnější situace nastává při rozběhu plně naloženého pásového dopravníku. Průběh tahové síly v pásu je popsán v následující kapitole. Průběh výkonu na hnacím bubnu je patrný z obrázku č. 4.

3 Mechanické veličiny

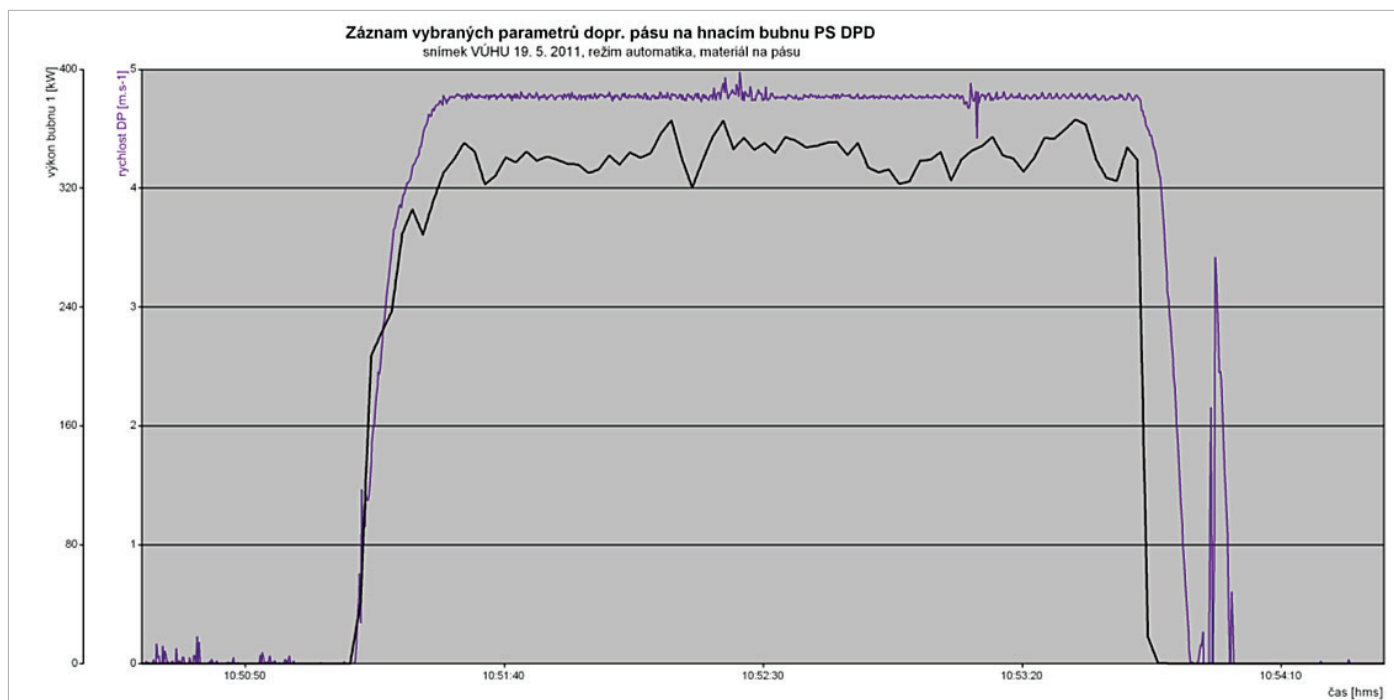
Mechanické veličiny byly měřeny na stejném pohonu poháněcí stanice pásového dopravníku DPD, sestávajícího z převodovky a elektromotoru, který je k ní připojen přes spojku typu periflex a elektromagnetickou čelistovou brzdou.

Měřeny byly následující veličiny:

- napínací síla - snímána tenzometrickým snímačem, zapojeným do řídicího systému poháněcí stanice;
- otáčky hřídele hnacího bubnu - snímány inkrementálním čidlem, zapojeným do řídicího systému poháněcí stanice;
- obvodová síla na hnacím bubnu - určena výpočtem z přímo měřených veličin a parametrů poháněcí stanice;



Obr. 3: Analyzátor napájecích sítí ENA 500.



Obr. 4: Průběh výkonu na hnacím bubnu.

- tahy v dopravním pásu - určeny výpočtem z přímo měřených veličin a parametrů poháněcí stanice.

Matematické vztahy použité pro stanovení obvodových sil na bubnech a tahových sil v pásu [3]:

| 1. hnací buben | | |
|---|--|------|
| maximální tah v pásu | $F_{nmax} = F_{12} \cdot e^{\mu_1 \alpha_1}$ | [kN] |
| tah v odbíhající větvi | F_{12} | [kN] |
| maximální obvodová síla | $F_{max} = F_{12} (e^{\mu_1 \alpha_1} - 1)$ | [kN] |
| skutečná obvodová síla | $F_1 = F_{12} (e^{\mu_1 \beta} - 1)$ | [kN] |
| $\alpha = \beta + \gamma$ | | |
| γ - klidový úhel (bez přenosu obvodové síly) | | |
| 2. hnací buben | | |
| tah v nabíhající větvi | $F_{12} = F_o \cdot e^{\mu_2 \alpha_2}$ | [kN] |
| tah v odbíhající větvi | F_o | [kN] |
| skutečná obvodová síla | $F_2 = F_o (e^{\mu_2 \alpha_2} - 1)$ | [kN] |
| Oba bubny společně | | |
| tah v nabíhající větvi | $F_n = F_o \cdot e^{\mu_1 \beta + \mu_2 \alpha_2}$ | [kN] |
| tah v odbíhající větvi | F_o | [kN] |
| skutečná obvodová síla | $F = F_1 + F_2 = F_o (e^{\mu_1 \beta + \mu_2 \alpha_2} - 1)$ | [kN] |

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{M_{K1}}{M_{K2}} = \frac{F_{12} (e^{\mu_1 \beta} - 1)}{F_o (e^{\mu_2 \alpha_2} - 1)} = e^{\mu_2 \alpha_2} \cdot \frac{e^{\mu_1 \beta} - 1}{e^{\mu_2 \alpha_2} - 1}$$

Pro výpočet maximální síly na 1. bubnu se do vzorců dosadí

$$\beta = \alpha_1.$$

V těchto vztazích je význam použitých symbolů následující:

μ_1, μ_2 součinitel tření mezi bubnem (1, 2) a pásem, [-]

μ 0,35 (špinavé, mokré) ÷ 0,45 (suché) pro keramické obložení,

α_1, α_2 geometrický úhel opásání 1., 2. hnacího bubnu pásem [rad]

β skutečný úhel přenosu obvodové síly mezi 1. bubnem a pásem [rad]

Skutečný úhel přenosu obvodové síly mezi 1. hnacím bubnem a pásem souvisí s mírou bezpečnosti proti prokluzu k dle vztahu

$$\beta = \frac{1}{\mu} \ln \frac{k - 1 + e^{\mu \alpha}}{k},$$

kde k vyjadřuje poměr mezi maximální možnou a skutečnou přenesenou obvodovou silou na bubnu. Dále uvedené hodnoty tahových sil v pásu počítají s hodnotou $k = 1,3$.

$$k = \frac{F_{max}}{F} \approx 1,3$$

Tah v odbíhající větvi je polovinou napínací síly Z . Potom pro hodnoty tahových sil v pásu platí:

- Tah v odbíhající větvi pásu na bubnu 2 $T_2 = Z/2 = F_o$
- Tah v nabíhající větvi pásu na bubnu 2 $T_{12} = T_2 + F_2$
- Tah v odbíhající větvi pásu na bubnu 1 T_{12}
- Tah v nabíhající větvi pásu na bubnu 1 $T_1 = T_{12} + F_1$

Nebo též:

$$T_2 = F \cdot \frac{1}{e^{\mu (\alpha_1 + \alpha_2)} - 1}$$

$$T_{1,2} = F \cdot \frac{e^{\mu \alpha_2}}{e^{\mu (\alpha_1 + \alpha_2)} - 1}$$

$$T_1 = F \cdot \frac{e^{\mu (\alpha_1 + \alpha_2)}}{e^{\mu (\alpha_1 + \alpha_2)} - 1}$$

Tab. 1: Výsledky měření.

| Režim napínání | Materiál na pásu | T_2 [kN] | T_{2max} [kN] | k T_2 / T_{2max} | F_1 [kN] | F_{1max} [kN] | Výkonnost [m ³ r.z.h ⁻¹] |
|----------------|------------------|------------|-----------------|-------------------------|------------|-----------------|---|
| automatika | ne | 124 | 172 | 1,39 | 66 | * | 0 |
| v debloku | ne | 123 | 178 | 1,45 | 66 | * | 0 |
| automatika | ano | 154 | 236 | 1,53 | 88 | * | 1 080 |
| v debloku | ano | 125 | 207 | 1,66 | 87 | * | 1 080 |

* měření se nezdařilo

Výsledky měření jsou uvedeny dále v tabulce č. 1. Význam použitých symbolů byl uveden v předchozím odstavci. Maximální hodnoty tahové síly v pásu na pomocných bubnech T_{2max} příslušejí režimům rozběhu dopravníku.

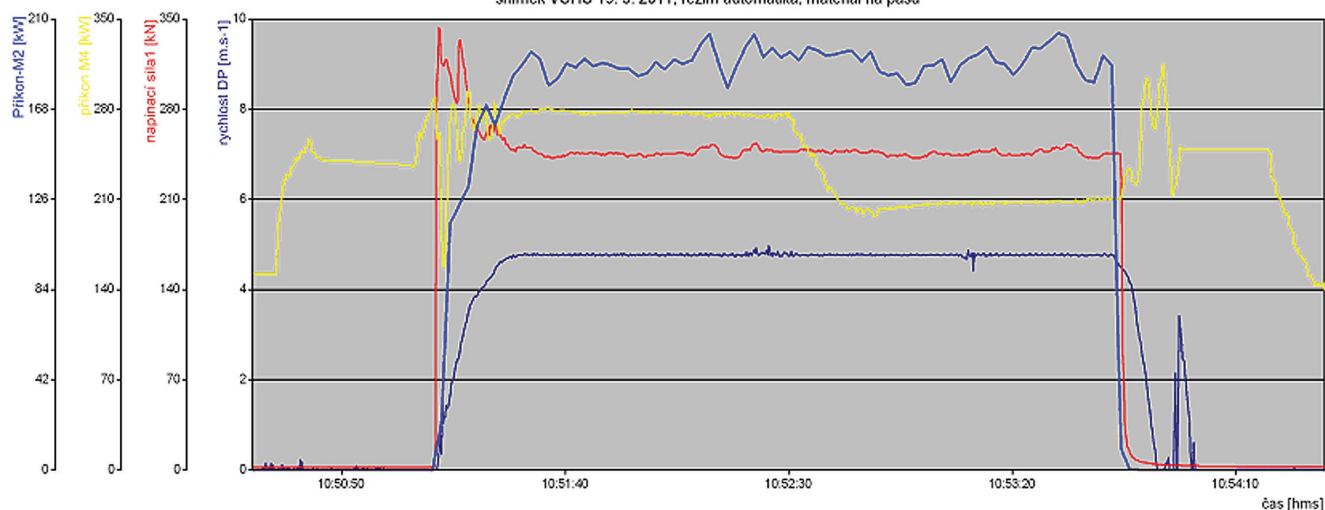
Pro zjištění hodnoty tahové síly T_2 za ustáleného běhu pohonu získáme pro tahy v pásu výsledky uvedené v příložené tabulce.

Dále uvedené grafy na obrázku č. 5 uvádějí naměřené průběhy napínací síly a rychlosti DP a dále z nich odvozených tahových a obvodových sil.

| | | |
|---|------|------|
| Rozdělení obvodové síly na bubny | 1,00 | |
| Maximální jmenovitá obvodová síla F_{max} | 352 | [kN] |
| Tah v nabíhající větvi 1. bubnu T_1 | 506 | [kN] |
| Tah v odbíhající větvi 1. bubnu T_{12} | 330 | [kN] |
| Skutečná obvodová síla F_1 | 176 | [kN] |
| Tah v odbíhající větvi 2. bubnu T_{23} | 154 | [kN] |
| Skutečná obvodová síla F_2 | 176 | [kN] |
| Celková obvodová síla F | 352 | [kN] |
| Klidová napínací síla | 308 | [kN] |

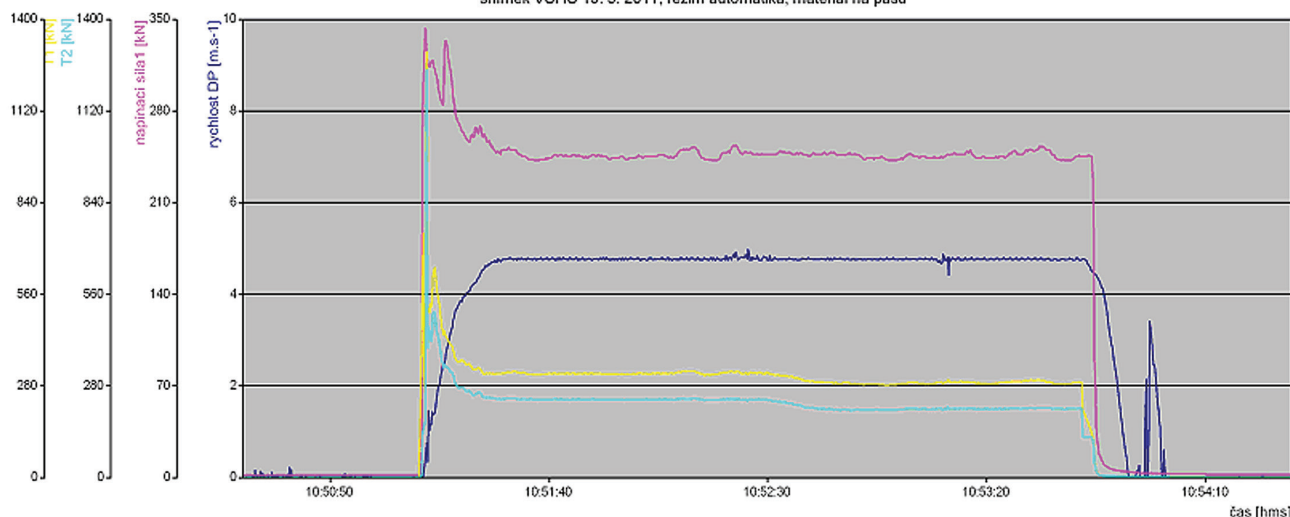
Záznam vybraných parametrů dopr. pásu na hnacím bubnu PS DPD

snímek VÚHU 19. 5. 2011, režim automatika, materiál na pásu



Záznam vybraných parametrů dopr. pásu na hnacím bubnu PS DPD

snímek VÚHU 19. 5. 2011, režim automatika, materiál na pásu



Obr. 5: Průběhy napínací síly, rychlosti DP, tahových a obvodových sil.



Obr. 6: Ukázka měřicích míst.

4 Kmitání

Měřenou charakteristickou veličinou byla efektivní hodnota rychlosti kmitání v_{ef} [$m \cdot s^{-1}$] ve směru vertikálním (V – svisle kolmo na osu elektromotoru), horizontálním (H – vodorovně kolmo na osu elektromotoru) a axiálním (A – v ose elektromotoru). Efektivní hodnota kmitání byla měřena přístrojem MICROLOG CMVA 60 s váhovým filtrem ve frekvenčním pásmu $10 \div 1\,000$ Hz. Současně přístroj zpracoval spektra rychlosti kmitání ve stejném frekvenčním rozsahu.

Měřicí místa byla volena na plášti převodovky a elektromotoru v místech uložení ložisek hřídelů a ozubených kol [2]. Instalace snímačů a označení měřicích míst (obrázek č. 6).

Měření probíhala při následujících režimech běhu dopravního pásu:

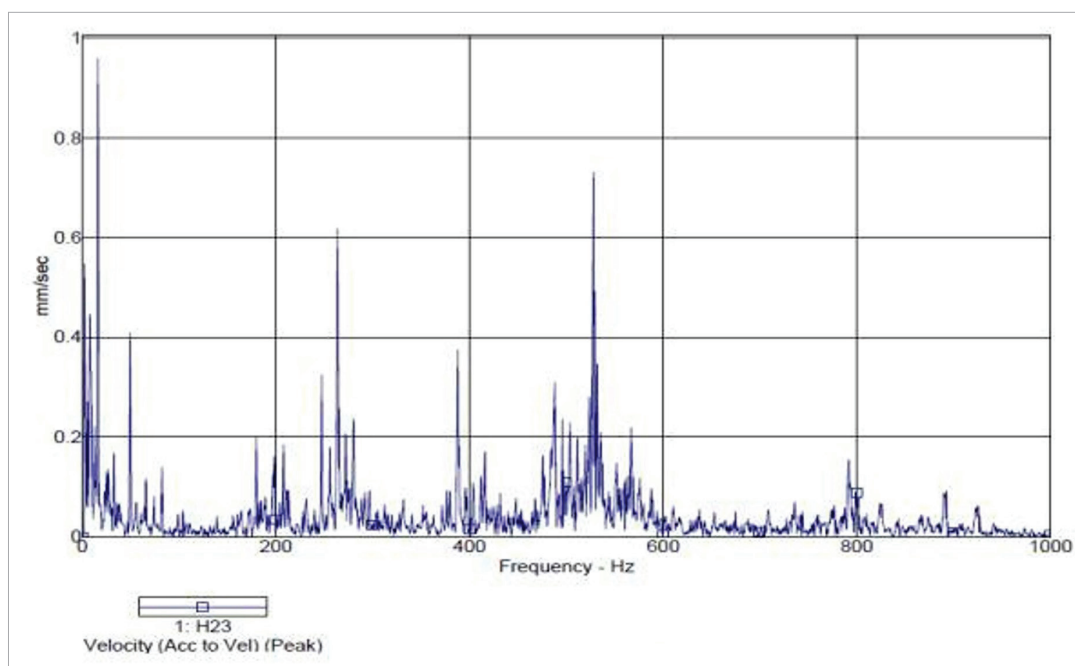
- doběh prázdného pásu,
- běh naprázdno,
- běh s materiálem,
- rozběh 1 s materiálem na pásu,
- rozběh 2 s materiálem na pásu.

Klima při měření - počasí, cca 25 °C.

Dále jsou uvedeny pouze efektivní hodnoty formou tabulky č. 2 a ukázka spektra amplitud kmitání v měřicím místě H23 (obrázek č. 7).

Tab. 2: Vibrace na DPD pohon pravý přední.

| Místo měření | Jednotka měření | Datum měření | Poslední hodnota | Změna hodnoty (%) |
|---|-----------------|--------------|------------------|-------------------|
| Stroj: pohon pravý přední Popis: provedení L2 | | | | |
| Otáčky | 1/min | | 983.8 | - |
| V11 | mm/sec | 19-05-11 | 4.259 | 69.9 |
| H11 | mm/sec | 19-05-11 | 7.402 | 175.9 |
| A12 | mm/sec | 19-05-11 | 2.935 | -8.3 |
| V12 | mm/sec | 19-05-11 | 5.603 | 93.2 |
| H12 | mm/sec | 19-05-11 | 10.05 | 403.5 |
| V21 | mm/sec | 19-05-11 | 5.346 | -0.2 |
| H21 | mm/sec | 19-05-11 | 4.981 | 110.1 |
| V22 | mm/sec | 19-05-11 | 3.362 | - |
| H22 | mm/sec | 19-05-11 | 3.166 | - |
| V23 | mm/sec | 19-05-11 | 3.774 | - |
| H23 | mm/sec | 19-05-11 | 2.581 | - |
| V24 | mm/sec | 19-05-11 | 6.236 | - |
| H24 | mm/sec | 19-05-11 | 2.001 | - |
| A24 | mm/sec | 19-05-11 | 3.976 | 27.4 |



Obr. 7: Spektrum amplitud kmitání v měřicím místě H23.

5 Interpretace výsledků

Pro hodnocení mohutnosti kmitání pohonu bylo použito kritérium dle normy ČSN ISO 10816-3:1999, tj. velikost širokopásmových vibrací [4,5]. Sledovaný pohon byl zařazen do skupiny 1 (střední stroje s výkonem nad 300 kW na pružných základech) s hranicemi vibrací dle pásme B a C, tj. dle citace normy „*Stroje, jejichž mohutnost vibrací nepřesáhne hranici pásma B mohou být provozovány po neomezeně dlouhou dobu. Stroje, jejichž mohutnost vibrací nepřesáhne hranici pásma C mohou být provozovány po omezeně dlouhou dobu se zvýšenou frekvencí monitorování. U strojů, jejichž mohutnost vibrací přesáhne hranici pásma C se doporučuje zastavit provoz.*“

Pro toto zařazení jsou horní hranice mohutnosti kmitání stanoveny na hodnoty:

- $v_{efmax} = 7,1 \text{ mm.s}^{-1}$ pro pásmo B a pružný základ,
- $v_{efmax} = 11,0 \text{ mm.s}^{-1}$ pro pásmo C a pružný základ.

Z výsledků měření plyne:

- pohon vyhověl stanoveným kritériím pro trvalý provoz za podmínky zvýšené frekvence monitorování (zvýšená úroveň vibrací na elektromotoru u spojky),
- spektra měřicích míst elektromotoru zakládají podezření na nevyváhu rotoru a mechanické uvolnění patek motoru; rovněž se projevují nedobré záběrové poměry ozubených kol z_3 a z_4 převodovky na frekvenci 266,66 Hz,
- spektra několika měřicích míst převodovky (např. H23, viz obrázek č. 7) zakládají podezření na nedobré záběrové poměry ozubených kol z_3 a z_4 převodovky na frekvenci 266,66 Hz.

6 Závěr

Předložené komplexní měření ukazuje jeden z možných přístupů ke kvantifikaci parametrů, sledování a vyhodnocení technického

stavu pohonu a dopravního pásu. Výsledky v článku popisovaného komplexního měření budou sloužit k ověření možnosti implementace modernějších metod měření parametrů dopravního pásu a hnacího bubnu do vyvíjeného diagnostického systému. Může se zdát, že článek opakuje již známé poznatky, ale ve skutečnosti je zcela nově aplikuje do rámce vývoje relativně levného, široce dostupného diagnostického a řídicího systému pro potřeby širokého spektra pásových dopravníků. Že takový systém na trhu chybí, dokazují velice kladná hodnocení různých recenzentů z celé České republiky, která umožnila realizaci grantového projektu v rámci programu TIP Ministerstva průmyslu a obchodu ČR.

Poděkování

Príspevek vznikl za podpory projektu MPO FR-TI1/537 „Komplexní diagnostický systém pro pásovou dopravu“.

Literatura

- [1] DRAŽAN, F. a kol.: *Teorie a stavba dopravníků*. Ediční středisko Českého vysokého učení technického. Praha, 290 s., 1983.
- [2] HAVELKA, Z., TŮMA: *Teorie pásových dopravníků*, Praha, 1971.
- [3] FRIES, J.: *Pásové dopravníky, bubny a jejich výpočet*, VŠB – TU OSTRAVA, 2009. ISBN 20100113.
- [4] JERÁBEK, K., VOŠTOVÁ, V.: *Novinky v konstrukci a sledování provozu dopravníků*. The International Journal of Transport & Logistics. 2007. ISSN 1451-107X.
- [5] HELEBRANT, F.: *Konstrukce velkstrojů a jejich spolehlivost - II. Provozní spolehlivost*. MONTANEX, a.s., 89 s., Ostrava 2004, ISBN 80-7225-X.