

# Kmitanie a hluk komponentov strojných zariadení v čase konca ich životnosti

**Stanislav ŽIARAN, Ondrej CHLEBO, Ľubomír ŠOOŠ**

*Strojnícka fakulta STU v Bratislave, Ústav výrobného inžinierstva a kvality produkcie, Námestie slobody 17, 812 31 Bratislava*

*e-mail: stanislav.ziaran@stuba.sk, ondrej.chlebo@stuba.sk,*

*lubomir.soos@stuba.sk,*

## Súhrn

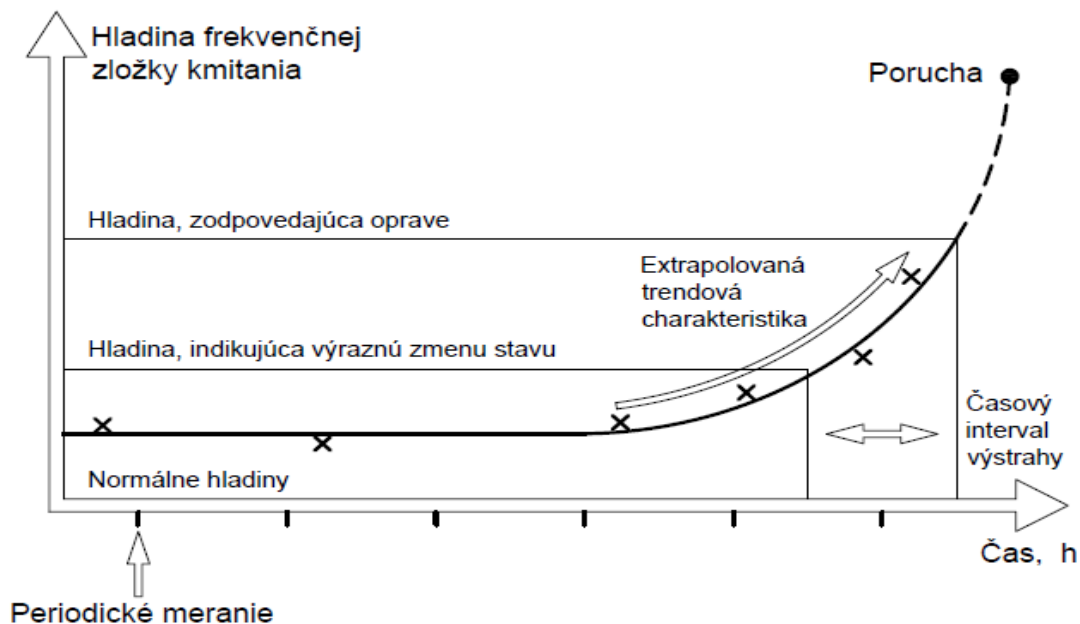
*Koniec životného cyklu strojných zariadení, dopravných prostriedkov, zastaranej technológie a podmienok spracovania komponentov, či použitie nevhodných materiálov prispieva k zvyšovaniu kmitania a hluku týchto zariadení, prostriedkov a komponentov. Článok sa zaoberá stanovením prevádzkového stavu strojných zariadení a ich komponentov pomocou spracovania trendových charakteristík meraním mechanického kmitania a hluku, ktoré objektívne určujú koniec životného cyklu komponentov strojov. Sústreďuje sa najmä na oblasť spriadacích vretenníkov, železničných vozňov a ich komponentov, valcovacej linky a ukladania výliskov. Analyzuje príčiny a frekvenčné rozloženie kmitania a hluku ako aj ich decibelové hodnoty. Uvádza aj využitie recyklovaných surovín ako vibro-izolačného a pohltivého materiálu potrebného na redukciu vibro-akustickej energie.*

**Kľúčové slová:** životnosť, hluk, kmitanie, ložiská, trendové charakteristiky

## Úvod

V strojoch a strojných sústavách jedným z najdôležitejších komponentov sú ložiská, ktoré umožňujú rotačný pohyb hriadeľa a súčasne prenášajú dynamické sily do konštrukcie stroja a jeho uloženia. Prevádzkyschopnosť a životnosť týchto mechanických sústav je preto do značnej miery závislá od prevádzkového stavu ložísk a od ich životnosti. Pri kvalitných ložiskách a zodpovedajúcom dynamickom zaťažení sa ich životnosť spravidla rovná životnosti stroja, ale pre spriadacie vretenníky to neplatí. Preto u ložísk spriadacích vretenníkov je ekonomicky výhodné sledovať ich trendové charakteristiky kmitania (hluku) a ich včasnou výmenou zabezpečiť, aby neprekročili stanovené prijateľné hranice (obrázok 1). V opačnom prípade dochádza k ich dynamickému preťaženiu, a tým aj k skráteniu ich životnosti. Vibroakustickou diagnostikou možno určiť čas, kedy sa ložisko nachádza tesne pred koncom svojej životnosti a kedy nastáva optimálny čas jeho výmeny<sup>6</sup>. Vylúči sa tým predčasná a zbytočná výmena ložísk vykonaná na základe stanoveného času prevádzkovania a údržby. Diagnostika teda zvyšuje istotu, spoľahlivosť a životnosť, respektíve čas medzi dvomi opravami, čím sa znižujú aj náklady na prevádzku a znižujú sa aj náklady na recykláciu materiálu. Zároveň treba zdôrazniť, že zníženie dynamického zaťaženia stroja zvyšuje životnosť samotného stroja a znižuje sa aj hladina hluku v prevádzke, čo má pozitívny vplyv na zdravie zamestnancov.

Zo skôr uvedených oblastí aplikácie metód vibroakustickej diagnostiky sa možno najčastejšie využívajú metódy na zistenie skutočného prevádzkového stavu ložísk (valivých, klzných), resp. uloženia rotorov na ložiskách. Podľa odhadu je na svete v prevádzke približne 18 miliárd kusov valivých ložísk<sup>6</sup>. Dobrá a účinná diagnostika môže predísť poškodeniam iných častí stroja a v konečnom dôsledku jeho havárii, a tak výrazne znížiť náklady na opravu a recykláciu komponentov stroja. Reprezentatívnym príkladom môžu byť v strojných sústavách, vysokootáčkové spriadacie vretenníky používané v textilnom priemysle, kde hladiny A hluku (frekvenčné vázanie typu A) bežne prekračujú hodnotu 90 dB, a to predovšetkým v závislosti od stupňa poškodenia ložiska, a preto včasná výmena ložísk spriadacej jednotky znižuje hluk v pracovnom prostredí a predlžuje životnosť priradených komponentov daného strojného zariadenia a pri jeho nedostatočnej vibroizolácii aj blízkych stavebných konštrukcií<sup>3</sup>.



Obrázok 1: Trendová charakteristika komponentu stroja

Absencia monitorovania alebo nesprávne monitorovanie prevádzkového stavu ložísk môže vyústiť aj do iného extrému, keď sa ložiská predčasne vymieňajú alebo obnovujú (klzné), a to na základe nevhodne určeného časového intervalu medzi opravami. Pri správnej voľbe diagnostickej metódy a/alebo prístroja je dôležité najprv si vyjasniť, aké poškodenia sa môžu vyskytovať pri použití valivých či klzných ložísk, a aký je percentuálny podiel jednotlivých príčin na celkovom počte poškodených ložísk. Najväčší podiel poškodenia ložísk zapríčiňuje mazivo a/alebo spôsob mazania, a to takmer v 55 % z celkového počtu známych príčin<sup>6</sup>.

Sledovanie prevádzkového stavu sa zakladá na schopnosti monitorovania súčasného prevádzkového stavu mechanickej sústavy a na predikcii budúceho stavu tejto sústavy počas jej ďalšej prevádzky. Znamená to, že informácie sa musia získať na základe vonkajších prejavov mechanickej sústavy vyvolané vnútornými príčinami počas jej prevádzky.

## Cieľ, metodika vibroakustických meraní a meracia technika

Cieľ experimentálnych meraní bol zistiť veľkosť dynamického zaťaženia ložiska spriadacích vretenníkov pri rôznych druhoch maziva a rôznej prevádzkovej frekvencie otáčania počas jeho plánovanej životnosti s využitím diagnostických senzorov, ktoré sú priamo v kontakte s vonkajším krúžkom ložiska<sup>1</sup>. Pri tejto metóde sa vychádza z predpokladu, že poškodené alebo opotrebené ložisko spriadacieho vretenníka bude vykazovať väčšie dynamické zaťaženie samotnej strojovej sústavy a okolitého prostredia (kmitanie, hluk) a teda aj väčší príkon. To sa okrem zvýšeného dynamického zaťaženia ložiska vretenníka prejaví aj nárastom teploty telesa vretenníka, čo bol dosiaľ jediný ukazovateľ prevádzkového stavu spriadacích jednotiek, no nie úplne spoľahlivý<sup>2</sup>. Cieľ experimentálnych meraní bol aj analýza vplyvu externých zdrojov generujúcich kmitanie ovplyvňujúcich dynamické zaťaženie ložiska spriadacieho vretenníka.

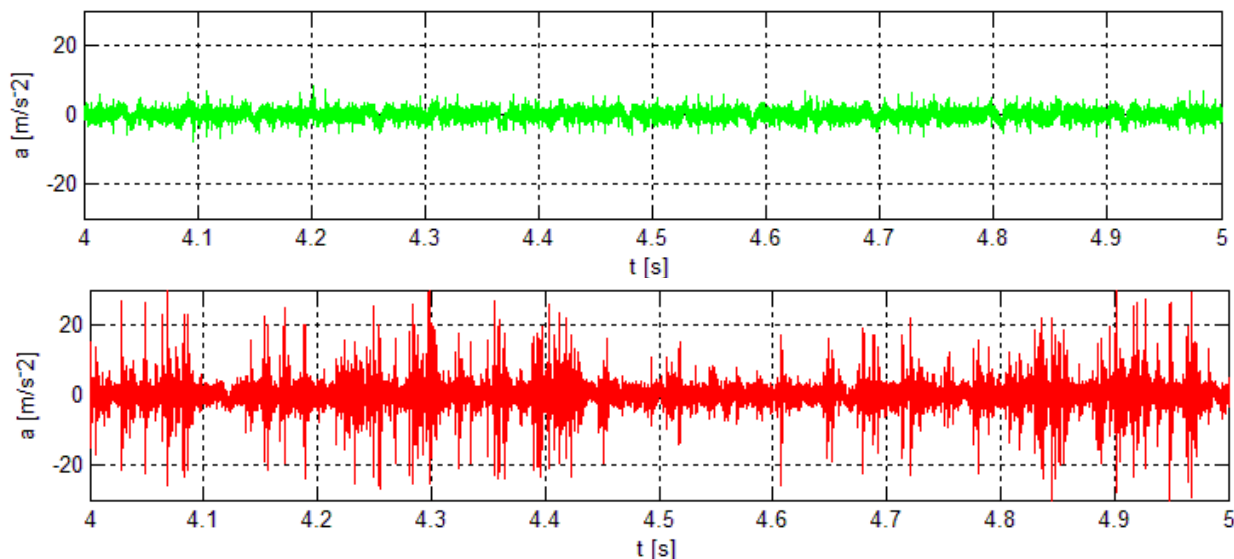
Postup hodnotenia prevádzkovej kvality ložísk z hľadiska ich hlučnosti vychádza z dynamického správania sa ložísk, teda z hodnotenia parametrov veličín mechanickeho kmitania. Cieľ merania zrýchlenia a mohutnosti periodického dynamického zaťaženia (kmitania) bol analyzovať veľkosť kinematických veličín zrýchlenia a rýchlosti kmitania pôsobiacich na prírubu ložiska, resp. jeho uloženie v mechanickej sústave. Z rýchlosti kmitania sa vypočítala hladina akustického výkonu vretenníka, čo umožňuje posúdiť a predikovať akustické prostredie pracoviska<sup>8</sup>. Veličiny kmitania nie sú ovplyvnené okolitým kmitaním tak, ako pri snímaní zvukového signálu, ktorý je viac alebo menej ovplyvnený hlukom pozadia pri stanovení hladiny akustického výkonu samotného spriadacieho vretenníka<sup>8</sup>. V metodikách

sa teda využíva jednoznačná súvislosť medzi mechanickým a akustickým kmitaním. Vykonala sa aj frekvenčná analýza, ktorej cieľ bol zistiť frekvenčné rozloženie výrazného nežiaduceho dynamického zaťaženia zariadenia a pracovného prostredia a jeho príčiny. Metodika hodnotenia kvality namontovaných ložísk rotačných komponentov mechanickej sústavy musí jednoznačne s opakovateľnosťou a/alebo reprodukovateľnosťou spoľahlivo vyhodnotiť vyhovujúce a nevyhovujúce ložiská<sup>4</sup>.

Pri meraní mechanického a akustického kmitania sa použila najmodernejšia meracia technika od renomovanej firmy Bruel & Kjaer (B&K), a to 12 kanálová meracia karta B&K PULSE; akcelerometre s využiteľnými frekvenčnými rozsahmi 0,2 Hz – 12 800 Hz; zvukový analyzátor s využiteľným frekvenčným rozsahom do 25 600 Hz pre kontrolný záznam meraných signálov vrátane reziduálneho hluku.

## Dynamické zaťaženie ložísk a trendové charakteristiky

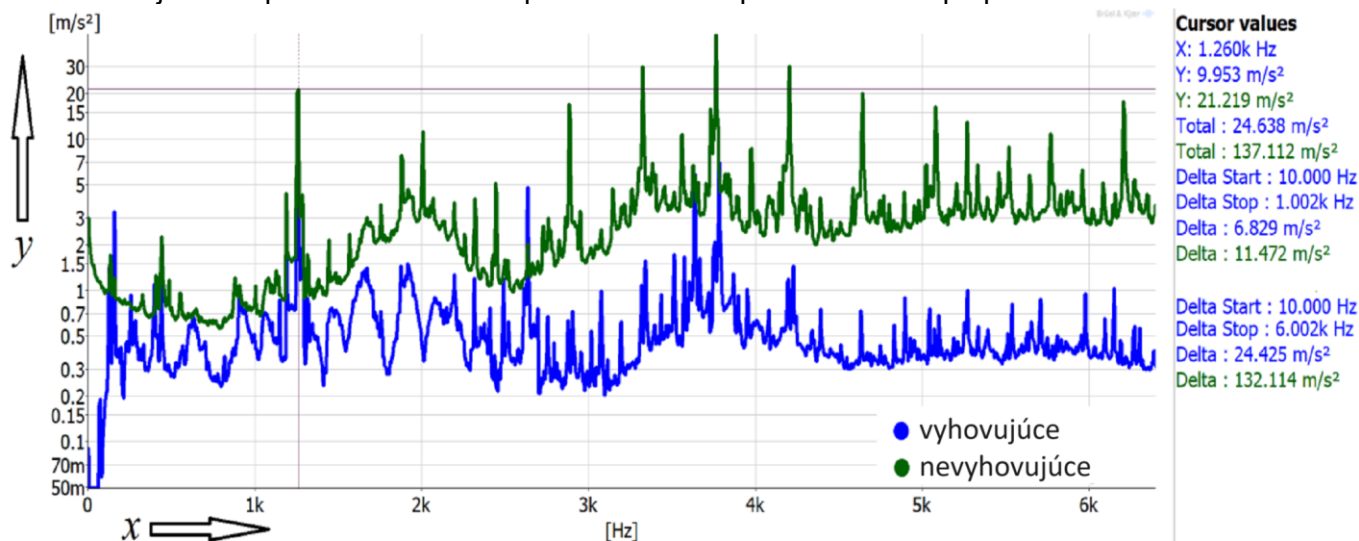
**Časové priebehy:** Dynamické zaťaženie má vplyv na priebeh generovania hladín kmitania a hluku. Časové priebehy nameraných zrýchlení kmitania nových ložísk (Obrázok 2) reprezentujú výber z významnej štatistickej vzorky od dynamického zaťaženia generovaného vyhovujúcim (hore) a nevyhovujúcim (dole) guľôčkovým ložiskom. Priebeh zrýchlenia kmitania je pri kvalitných ložiskách približne konštantný s malou amplitúdou, než pri nevyhovujúcich ložiskách, kde amplitúda zrýchlenia kmitania je v priemere niekoľkonásobne väčšia s výraznejšími pravidelnými a nepravidelnými maximálnymi amplitúdami dosahujúcich vysokých hodnôt zrýchlenia kmitania charakterizujúce napríklad pulzné zadrhávajúce. Tieto deterministické alebo náhodné maximálne amplitúdy signálu sú prejavom poškodenia obežných dráh ložiska, či jeho komponent a sú použiteľné len pre recykláciu. Bližšia špecifikácia je možná s využitím frekvenčnej analýzy, ktorá umožňuje detegovať príčiny a druhy poškodenia ložiska. Abnormálny časový dynamický prejav ložiska prostredníctvom maximálnej hodnoty zrýchlenia kmitania je jedným z kritérií objektívneho hodnotenia kvality ložísk<sup>3,5</sup>. Bližšia špecifikácia je možná s využitím frekvenčnej analýzy, ktorá umožňuje detegovať príčiny a druhy poškodenia ložiska a na základe druhu poškodenia vo výrobe detegovať druh výrobných operácií, kde k poškodeniu dochádza.



**Obrázok 2: Časový záznam dynamického zaťaženia ložísk: hore vyhovujúce a dole nevyhovujúce**

**Frekvenčná analýza:** Z nameraných časových priebehov sa spracuje frekvenčné spektrum pre identifikáciu presnej frekvencie otáčania, ktorá bola 75 600 r/min (1 260 Hz) pri nastavenej frekvencii otáčania 85 000 r/min (Obrázok 3). Na základe presnej frekvencie otáčania sa vypočítali charakteristické

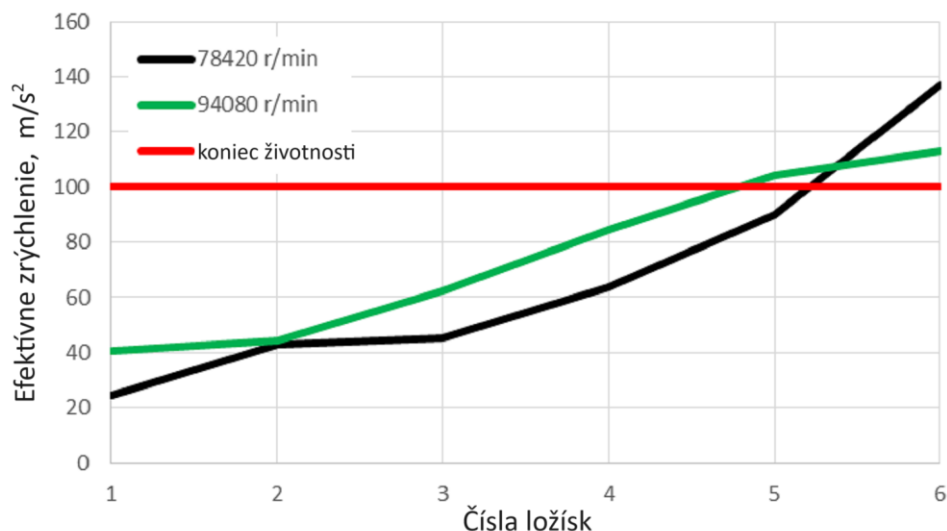
frekvencie prislúchajúce jednotlivým komponentom ložiska a pristúpilo sa k analýze príčin poškodení ložiska. Táto frekvenčná analýza poskytuje výrobcovi a/alebo prevádzkovateľovi vykonať zodpovedajúce opatrenia súvisiace s kvalitou výroby ložísk a u prevádzkovateľa súvisiace najmä s údržbou podľa prevádzkového stavu ložiska. Údržba podľa prevádzkového stavu strojovej sústavy je výrazne ekonomickejšia ako preventívna údržba podľa časového plánu a údržba po poruche<sup>6</sup>.



Obrázok 3: Frekvenčné spektrum ložísk vyhovujúcej a nevyhovujúcej spriadacej jednotky

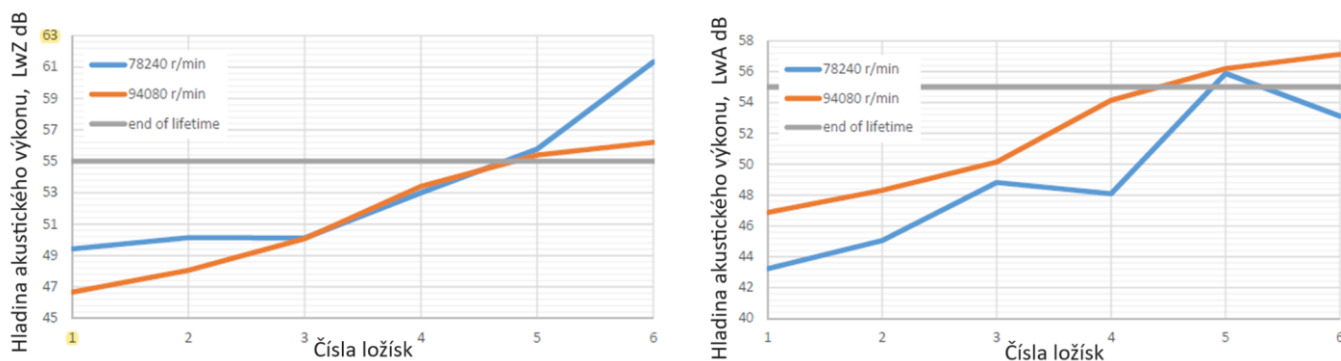
**Trendové charakteristiky vretenníkov:** Vzchádzajúc z nameraných alebo vypočítaných hodnôt získaných z prevádzkového monitorovania ložísk vretenníkov sa spracujú ich trendové charakteristiky, a to buď na základe nameraných hodnôt kmitania (obrázok 4), alebo na základe vypočítaných hodnôt hladín akustického výkonu z nameranej mohutnosti kmitania (obrázok 5)<sup>8</sup>. Využitie zrýchlenia kmitania je výhodné z hľadiska životnosti ostatných komponentov strojného zariadenia a využitie hladín akustického výkonu z hľadiska zabezpečenia vyžadovaných pracovných podmienok v dôsledku expozície hluku zamestnancov<sup>7</sup>.

Meranie efektívnych hodnôt zrýchlenia kmitania sa vykonalo pre šesť náhodne vybraných vysokootáčkových spriadacích vretenníkov pri presnej frekvencii otáčania 78 420 r/min a v následnom kroku pre presnú frekvenciu otáčania 94 080 r/min. Týchto 6 vretenníkov sa skúšalo pre každú uvedenú frekvenciu otáčania, z jednej a tej istej výrobnéj sady, ktorých skúška sa začala za rovnakých prevádzkových podmienok. Z grafov na obrázkoch 4 a 5 je vidieť rozdielnu úroveň rizika vo vnútri hranice spoľahlivosti určitej zostávajúcej životnosti pre šesť ložísk skúšaných vysokootáčkových spriadacích vretenníkov. Táto skutočnosť charakterizuje kvalitu výroby vretenníkov, ako aj technický prístup k ich mazaniu. S využitím normy ISO 20816-1<sup>11</sup> a na základe posúdenia prevádzkového stavu vysokorýchlostných spriadacích vretenníkov sa stanovila ich hranica konca životnosti vychádzajúca z efektívneho zrýchlenia kmitania (obrázok 4).



**Obrázok 4: Trendové charakteristiky ložísk z merania zrýchlenia kmitania vysokootáčkových spriadacích vretenníkov s odporúčanou hranicou životnosti**

Hranice životnosti možno stanoviť aj na základe vypočítanej hladiny akustického výkonu<sup>8</sup>, a to buď s použitím frekvenčného váženía Z alebo A (obrázok 5). Na základe stanovenej hranice životnosti možno konštatovať, že ložisko vretenníka číslo 6 je už za hranicou životnosti a ložisko vretenníka číslo 5 je na hranici životnosti, čo si vyžaduje ich výmenu. Následná analýza ložísk vymenených vretenníkov po ich rozobraní to aj potvrdila.



**Obrázok 5: Trendové charakteristiky ložísk z vypočítaných hladín akustického výkonu s vážením Z a A vysokootáčkových spriadacích vretenníkov s odporúčanou hranicou životnosti**

## Záver

V prípadoch, kde sledované strojné zariadenie zaujíma kľúčové postavenie vo výrobe a má rozhodujúci vplyv na tvorbu produkcie, a teda aj ekonomickú stránku alebo bezpečnosť a zdravie človeka, sa odporúča zavádzať systémy diagnostiky pri sledovaní prevádzkového stavu ložísk strojných zariadení. Monitorovanie kmitania okamžite indikuje zmeny prevádzkového stavu sledovaných strojných zariadení. Prevádzkové monitorovanie prináša viac ako 60 % úspor v rámci údržby<sup>9</sup>. Preto sa odborníkmi zásadne odporúča údržba podľa prevádzkového stavu pretože sa predikuje potenciálna porucha stroja či strojovej sústavy, a to na základe pravidelného monitorovania jeho prevádzkového stavu, pričom údržba sa vykoná v optimálnom čase. Má to ekonomické výhody v porovnaní s údržbou po poruche alebo preventívnou údržbou, ale vyžaduje spoľahlivý prístup pri sledovaní prevádzkového stavu, ktoré meraním kmitania alebo inými metódami technickej diagnostiky je schopné nielen určiť súčasný stav, ale dáva aj racionálne predikcie na zostávajúcu prevádzkovú životnosť<sup>10</sup>. Teda, údržbárske práce sa majú vykonávať len vtedy, keď vibroakustické merania ukazujú, že je ich potrebné vykonať.

## Pod'akovanie

Výskum prezentovaný v tomto príspevku je výsledkom projektu č. APVV-19-0538 „Progresívny hybridný vysokorýchlostný spriadačí aktuátor“ financovaného Agentúrou pre výskum a vývoj. Výskum prezentovaný v tomto príspevku je výsledkom projektu č. 030STU-4/2022 „RORESA – Aplikácia rozšírenej reality vo vzdelávacom procese obrábacích strojov a výrobných systémov“ financovaného Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR Slovenskej republiky.

## Literatúra

1. CHLEBO, O., ŽIARAN, S., ŠOOŠ, Ľ.: Diagnostický senzor vretenníka. Úžitkový vzor 9571, Úrad priemyselného vlastníctva SR, 2022.
2. ŽIARAN, S., CHLEBO, O., ŠOOŠ, Ľ.: Methodology of Objective Evaluation of Quality Bearings by Vibro-Acoustics and Its Comparison with a Subjective Method. *Akustika*. Volume 37, pp. 58 – 66, 2020.
3. ŽIARAN, S., ŠOOŠ, Ľ., CHLEBO, O.: Primary Noise Control in the Work Environment by Increasing the Quality of Bearings and Effective Mounting of Machines. *ARCHIVES OF ACOUSTICS*, Vol. 45, No. 2, pp. 253 – 262, 2020
4. CHLEBO, O., ŠOOŠ, Ľ., ŽIARAN, S., MUSIL, M.: Application of Vibroacoustics in Subjective and Objective Assessment of Bearing Quality. *Proceedings of the International Conference Acoustics 2019 High Tatras 2019*, pp. 203-208, ISBN 978-80-228-3157-4.
5. ŽIARAN, S., MUSIL, M., CHLEBO, O.: Determination of the Bearing Quality by Means of Vibroacoustic Response. *Proceedings of Internoise/ASME NCAD Noise control and acoustics division conference 2015*, Article number: V001T01A004-1.
6. ŽIARAN, S.: *Technická diagnostika. Vedecká monografia*. Vydavateľ STU v Bratislave 2013, str. 332, ISBN 978-80-227-4051-7.
7. ŽIARAN, S.: *Ochrana človeka pred kmitaním a hlukom. Vedecká monografia*. Vydavateľ STU v Bratislave 2008, str. 264, ISBN 978-80-227-2799-0.
8. CEN ISO/TS 7849-1 Acoustics. Determination of airborne sound power levels emitted by machinery using vibration measurement. Part 1: Survey method using a fixed radiation factor. CEN-CENELEC Management centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels.
9. RANDAL, R. B.: *Vibration-based Condition Monitoring Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. John Wiley & Sons, Ltd. 2011.
10. *Publikácia fy Bruel & Kjaer: Machine Condition Monitoring*. DK-2850 Naerum Denmark 1989.
11. ISO 20816-1 Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 1: General guidelines. ISO, CH-1214 Vernier, Genève 20, Switzerland.