

ZVYŠOVÁNÍ UŽITNÝCH VLASTNOSTÍ VŘETEN OBRÁBĚCÍCH STROJŮ S VALIVÝM ULOŽENÍM

Autor: Ing. Jiří Sova, školitel: Doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D., školitel specialista: Ing. David Burian, Ph.D.
Studijní obor: Konstruktivní a procesní inženýrství, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze

1. MOTIVACE PRÁCE

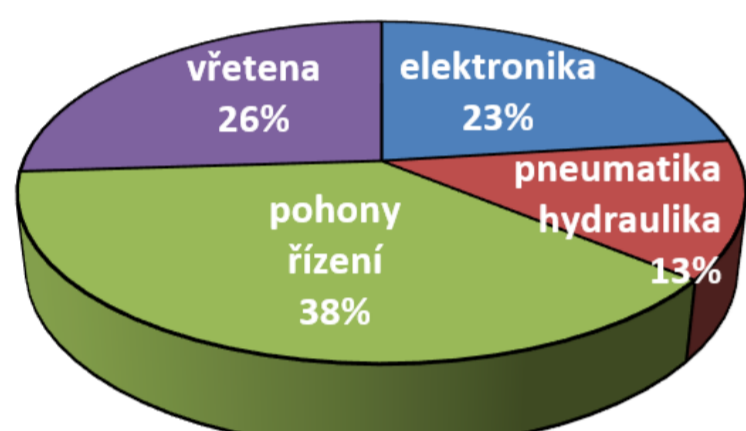
Disertační práce se zabývá hlavním komponentem obráběcích strojů (OS), za který jsou považovány vřetenové jednotky „srdce stroje“. Samostatná práce je zaměřena na výpočtovou metodu zbytkové trvanlivosti vřetenových ložisek. Motivací návrhu nové metodiky je potřeba zavádět dostupnou a srozumitelnou metodu, kterou je možné aplikovat na starší typy vřeten OS a řídicích systémů, např. během oprav vřeten. A umožnit tak modernizaci strojů zavedením cenově dostupných prvků „Průmyslu 4.0“ bez velké náročnosti zásahu do řídicího systému a umožnit tak výrobě lépe plánovat servisní zásahy a předcházet tím tak havarijním stavům vřeten. Současné modely zbytkové trvanlivosti jsou hodnocené na základě vibrací, ale i fuzzy logiky, neuronových sítí a strojového učení. Zmíněná problematika zbytkové trvanlivosti vřetenových ložisek je hlavním tématem práce. Samotná práce popisuje návrh nového přístupu hodnocení zbytkové trvanlivosti oproti popsaným přístupům v technických publikacích a vědeckých člancích. Novost metodiky spočívá v kombinaci sledování historie zatížení vřeten, simulačního modelu výpočtu trvanlivosti ložisek pro skutečná zátěžná spektra s ověřováním průběžného aktuálního stavu vřeten za pomoci vibrodiagnostiky. Metodou je možné stanovit zbytkovou trvanlivost vřetenových ložisek s ohledem na aktuální vibrační projev vřetenové jednotky.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem práce je vytvořit návrh metodiky hodnocení stavu vřetenových ložisek na základě zbytkové trvanlivosti založené na kombinaci jednotlivých metod: metoda zbytkové trvanlivosti L_{10h} dle ISO 281; vibrodiagnostiky hodnocené v závislosti na efektivní hodnotě vibrací podle ČSN ISO 10816-1; měřných dat z řídicího systému OS a jejich propojením do jedné metodiky s následným ověřením. Dílčí cíle jsou následující:

- Navrhnout způsob hodnocení aktuálního stavu vřeten kombinací dostupných diagnostických měření a záznamu historie provozu vřeten.
- Vytvořit metodiku informující o stavu ložisek vřetenových jednotek implementovatelnou a dostupnou pro malé a střední podniky.
- Ověřit novou metodiku experimentálním měřením v praxi.

3. SOUČASNÝ STAV TECHNIKY A MODEL TRVANLIVOSTI LOŽISEK



Obr.1 Hlavní příčiny havárií OS

Současná konstrukce vřetenových jednotek je na poměrně vysoké technické úrovni z důvodu vysokých požadavků na přesnost, výkonnost, produktivitu, spolehlivost a monitorování stavu. Zmínované požadavky nesou s sebou také druhou stránku, a tou je sledování provozního stavu stejné a vřetenových jednotek. Poruchy vřetenových jednotek Obr. 1 zapříčiňují cca 26 % odstávek obráběcích strojů.

3.1 MODEL TRVANLIVOSTI LOŽISEK

Modely trvanlivosti ložisek vycházejí ze zmiňovaných Harrisových modelů ložisek a ze základní teorie valivých ložisek na základě zkoušek výrobců ložisek SKF, FAG, ZKL aj., kteří se historicky podíleli se na tvorbě norem např. ISO 281 a ISO/TS 16 281.

Většina současných vědecky popsaných metod se zabývá určením zbytkové trvanlivosti na základě trendování měřených veličin nebo porovnáním vibračních analýz pomocí vizuální kontroly diagnostiky. Další přístupy vyhodnocování zbytkové trvanlivosti jsou popisovány v publikacích pomocí algoritmů zakládajících se na fuzzy logice, neuronových sítí nebo pokročilého strojového učení. Výše zmiňované přístupy, v tvorbě modelů, převážně hodnotí pouze stav s ohledem na vibrace nebo vyhodnocovací algoritmy. Ale rozvoj chyb ložisek závisí hlavně na použití a volbě strategie obrábění (hrubování, dokončování). Algoritmy nejsou schopny určit ani předvídat výrobu, která bude nasazena na strojích a tudíž tyto metody mohou špatně hodnotit a předvídat budoucí stav ložisek. Protože hodnotí pouze stav poškození ložisek a zároveň neobsahují informaci o průběhu jejich zatěžování. Pokud existují dokonalejší metody zbytkové trvanlivosti, nejsou zmiňovány ve vědeckých člancích a jedná se o firemní „know-how“.

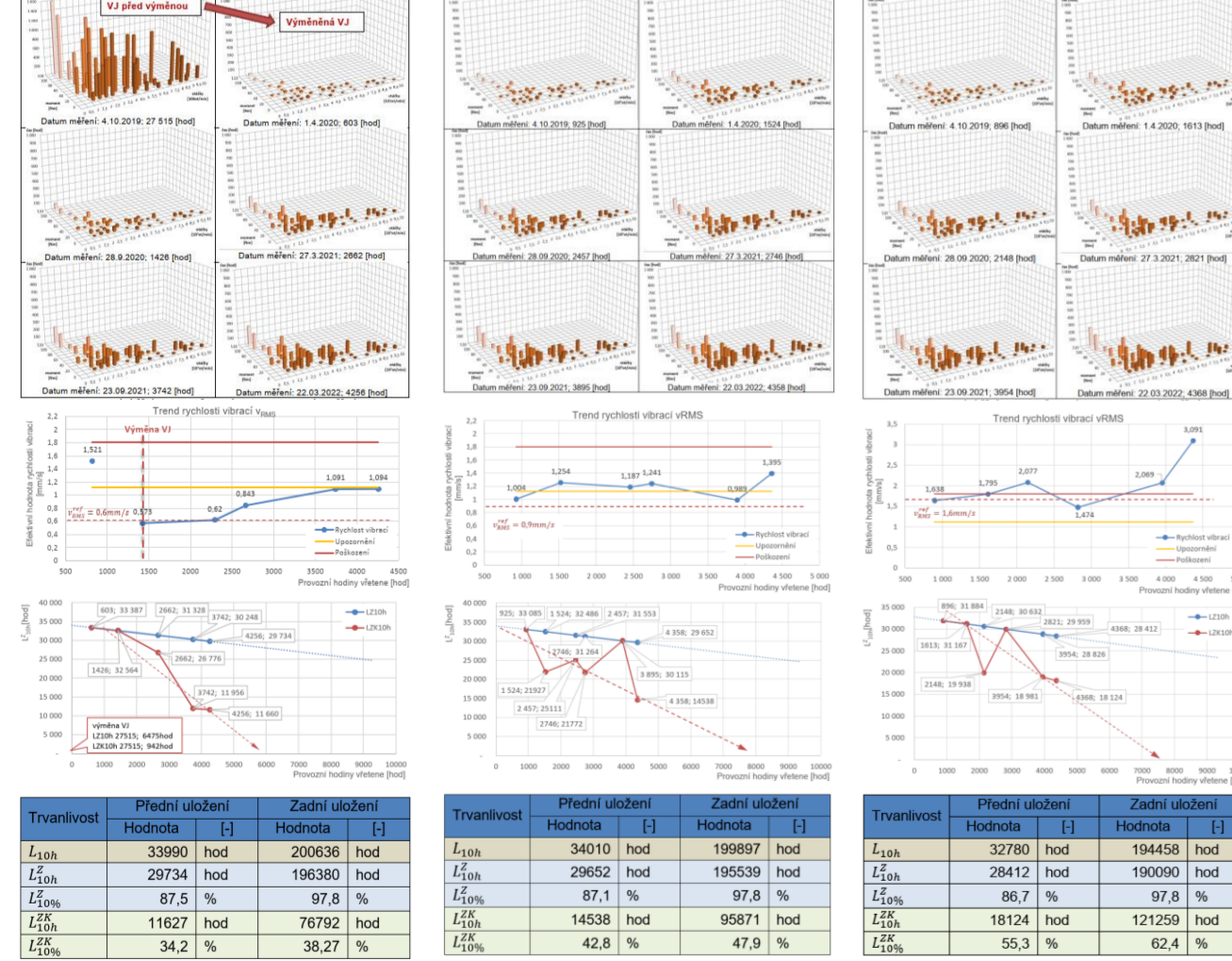
5. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ METODIKY

Pro ověření navržené metody hodnocení stavu ložisek vřeten zbytkové trvanlivosti bylo provedeno měření na frézovacích strojích v praxi a za provozu. Z důvodu ověření metodiky probíhalo měření celkem na 9 vřetenech. Vytvořená matice měření na 3x 3 vřetenech stejného typu zaručuje ověření metodiky a objektivitu, přičemž vylučuje možnost náhodné chyby u jednoho měření. Výběr vřeten pro ověření metodiky je sepsán v Tab. 2. Měření vřeten probíhalo během tvorby této práce v letech 2019 až 2022, v rámci běžné pochůzkové kontroly při prediktivní údržbě vřeten ve spolupráci s firmou Vopss Řepeč vykonávaných na jednotlivých strojích.

Tab. 2 Typ vřeten a jejich označení na strojích

stroj	EL FR 1M 10	stroj	EL FR OJ 10	stroj	EL FR OJ 14
A1	EL FR 1M 10 2087	B1	EL FR OJ 10 0329	C1	EL FR OJ 14 1869
A2	EL FR 1M 10 2096	B2	EL FR OJ 10 0330	C2	EL FR OJ 14 1258
A3	EL FR 1M 10 2097	B3	EL FR OJ 10 0426	C3	EL FR OJ 14 1004
Typ A / EL FR 1M 10		Typ B / EL FR OJ 10		Typ C / EL FR OJ 14	
typ: elektro výkon: 27/20 kW otáčky: 10000 rpm up. rozhraní: HSK A100 orientace: horizontální HCS7020-E-T-P4S_0 HCS7016-E-T-P4S_0 vzdálenost L=480 mm vzdálenost a=120 mm 5osé frézovací centrum		typ: elektro výkon: 15/11 kW otáčky: 10000 rpm up. rozhraní: SK 50 orientace: vertikální HS71914-C-T-P4S_0 N1011-K-M1-SP vzdálenost L=400 mm vzdálenost a=80 mm 3osý frézovací stroj		typ: elektro výkon: 18,5 / 11 kW otáčky: 14000 rpm up. rozhraní: MAS BT40 orientace: horizontální HC7016-EDLR-T-P4S-UL HCB7011-C-T-P4S_0 vzdálenost L=320 mm vzdálenost a=90 mm 3osý frézovací stroj	

Tab. 3 Vyhodnocení výsledků vřeten typu A / EL FR 1M 10



Tab. 4 Vyhodnocení výsledků vřeten typu C / EL FR OJ 14



Shrnutí výsledků:

Porovnání výsledků zbytkové trvanlivosti vřetenových ložisek viz. Tab. 5 vypracované dle studie, byla experimentálně ověřena správnost postupu navržené metodiky. Vypočtená korigovaná zbytková trvanlivost předního uložení vřetenových ložisek L_{10h}^{ZK} se vůči dvojici expertních odhadů liší v rozmezí pouze $\pm 10\%$.

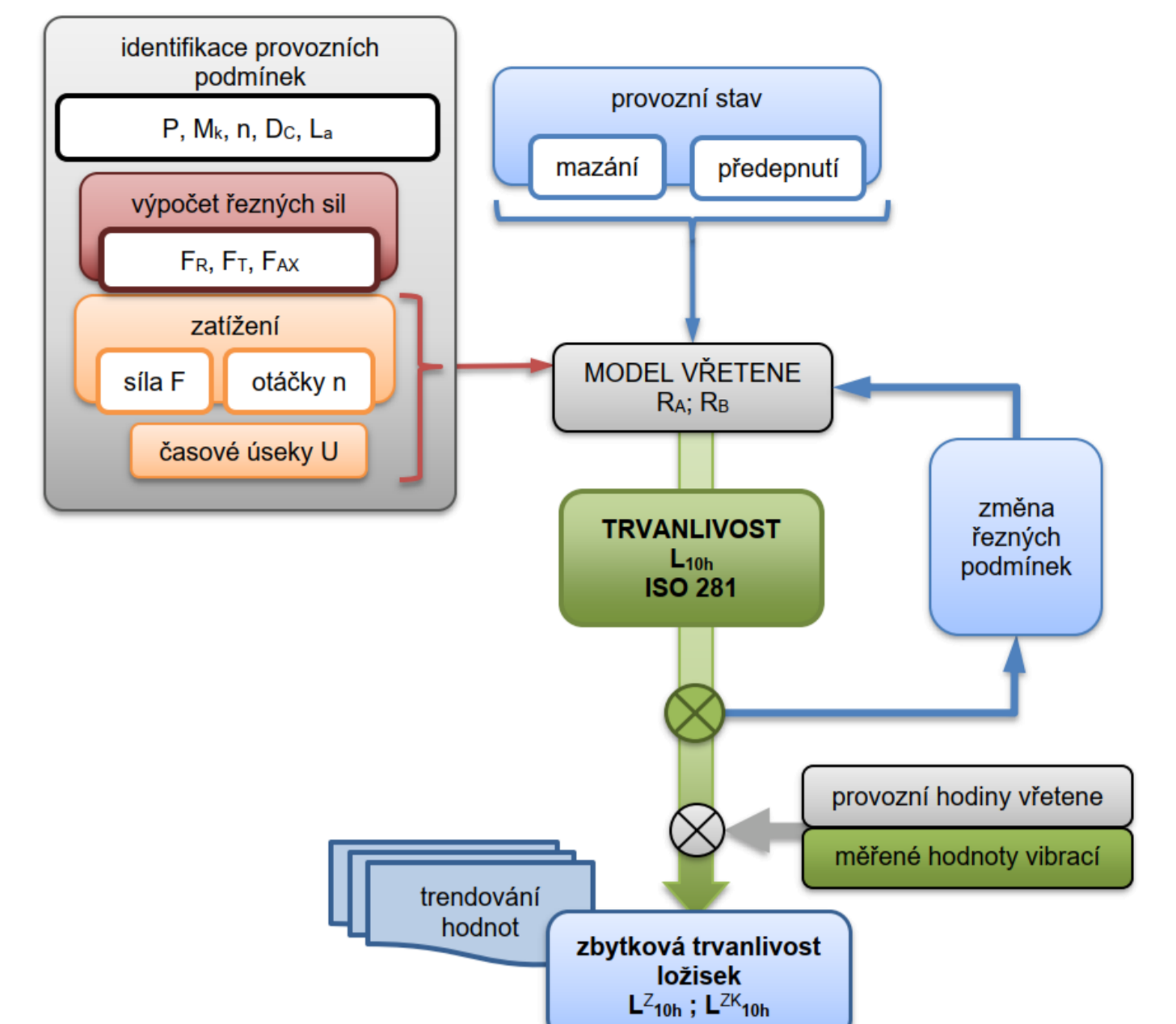
Tab. 5 Porovnání výsledků zbytkové trvanlivosti

typ vřeten	odhad stavu VJ dle 2 expertů [%]	výpočet zbytkové trvanlivosti		výpočet korigované zbytkové trvanlivosti	
		L_{10h}^{ZK} [hod]	rozdíl od odhadu [%]	L_{10h}^{ZK} [hod]	rozdíl od odhadu [%]
A1 / EL FR 1M 10 2087	40	87,5 / 97,8	-47,5	34,2/38,3	5,8
A2 / EL FR 1M 10 2096	40	87,1 / 97,8	-47,1	42,8/47,9	-2,8
A3 / EL FR 1M 10 2097	45	86,7 / 97,8	-41,7	55,3/62,4	-10,3
B1 / EL FR OJ 10 0329	70	68,2 / 97,9	9,3	68,2 / 97,9	9,3
B2 / EL FR OJ 10 0330	75	68,9 / 98,0	6,1	68,9 / 98,0	6,1
B3 / EL FR OJ 10 0426	65	60,8 / 97,9	4,2	60,8 / 97,9	4,2
C1 / EL FR OJ 14 1869	0	33,4 / 98,6	33,4	1,39 / 4,12	1,39
C2 / EL FR OJ 14 1258	0	16,1 / 98,1	16,1	0,05 / 0,32	0,05
C3 / EL FR OJ 14 1004	85	90,0 / 99,8	-5,0	90,0 / 99,8	-5,0

Pozn.: Znaménko v rozdílu od odhadovaného stavu VJ značí: odhadovaná hodnota je větší než vypočtená odhadovaná hodnota je menší než vypočtená

4. MODEL ZBYTKOVÉ TRVANLIVOSTI

Metodika odhadu zbytkové trvanlivosti vřeten Obr. 3 je založena na známém provozním stavu a provozních podmínkách. Pro které je nutné znát výkon, krouticí moment, otáčky, průměr nástroje a jeho vyožení. Z nichž je možné stanovit řezné podmínky, a zátěžné spektrum. Časové spektrum zatížení následně vstupuje do zjednodušeného modelu vřeten. Kde dojde k výpočtu sil pro dané zátěžné spektrum právě jednoho časového intervalu. Vypočtené hodnoty časových úseků budou dosazeny do základního modelu trvanlivosti ložisek. Zbytková trvanlivost ložiska bude stanovena dle měřených hodnot vibrací a provozních hodin vřeten.



Obr.3 Schéma metodiky hodnocení zbytkové trvanlivosti ložisek

4.1 POPIS VÝPOČTU ZBYTKOVÉ TRVANLIVOSTI

Teorie výpočtu je postavena na principu základní trvanlivosti dle normy ISO 281. Uvažujeme, že model zbytkové trvanlivosti je funkcí času a zátěžného spektra. Rozděleného podle velikosti zatížení a otáček, které jsou v určitém časovém úseku neproměnné.

Dle stanoveného zátěžného spektra vřetenové jednotky, dojde k přepočítání krouticího momentu na složku síly F_R dle vzorce; průměr nástroje D_c :

$$F_R = \frac{2 \cdot M_{kvret}}{D_c} [N]$$

Obr.4 Základní zjednodušený model vřeten

Dosažením naměřených a vypočítaných hodnot do modelu Obr.4 zbytkové trvanlivosti, vypočteme základní trvanlivost ložisek pro jednotlivé časové úseky.

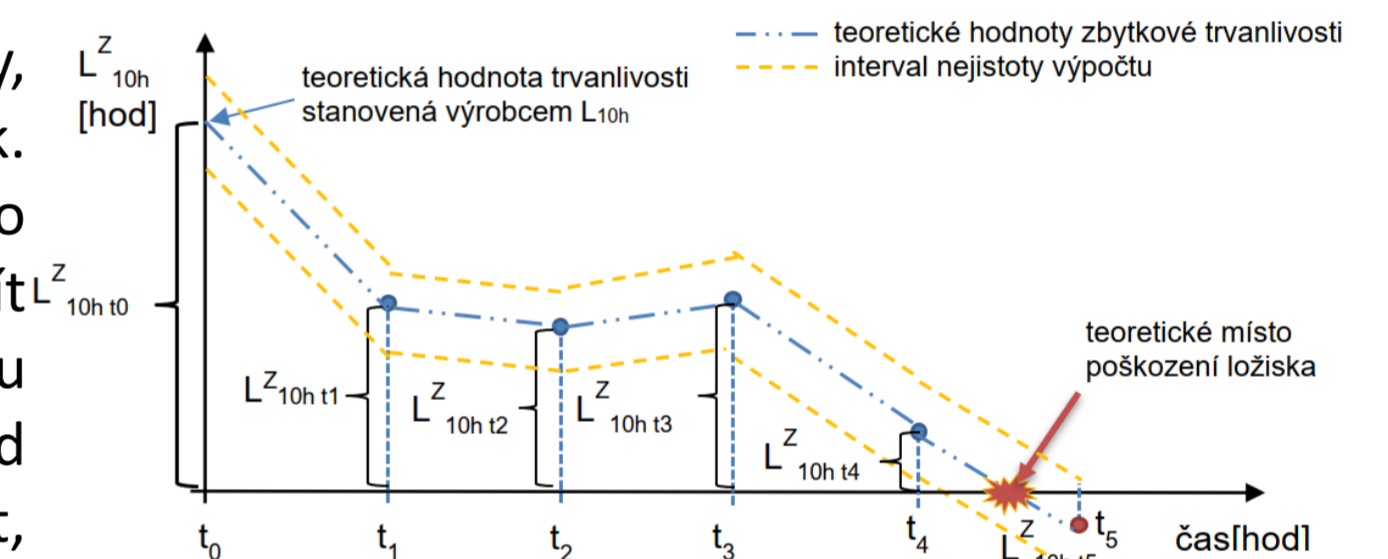
$$L_{10h} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{U_i}{L_{10i}}} \Rightarrow L_{10h ti} = L_{10i} \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n_m} [hod]$$

Definice výpočtu zbytkové trvanlivosti v provozním čas t_i

Hodnota zbytkové trvanlivosti je definována jako rozdíl vypočtené teoretické hodnoty základní trvanlivosti L_{10h} z provozních podmínek od provozních hodin vřeten t_i , v závislosti na skutečném spektru zatížení vřeten vyjádřená v hodinách, než se objeví první známky poškození únavy materiálu na ložisku.

$$L_{10h ti} = L_{10h ti} - t_i [hod]$$

Graf trendu Obr. 5 zbytkové trvanlivosti $L_{10h ti}^Z$, vždy, reprezentuje pouze jedno ložisko nebo skupinu ložisek. Hodnocení je znázorněno v trendovém grafu rozděleného do jednotlivých časových úseků t_i . Dle teorie by mělo dojít k určité nejistotě (pravděpodobnosti) k teoretickému poškození ložiska, když čára trendu protne osu X. Pokud hodnota zbytkové trvanlivosti je záporná, je možné tvrdit, že ložisko dosáhlo hodnoty své teoretické trvanlivosti.



Obr.5 Graf trendu vývoje zbytkové trvanlivosti

Výpočet korigované zbytkové trvanlivosti s ohledem na diagnostický stav vřetenové jednotky

Teorie korigované zbytkové trvanlivosti L_{10h}^{ZK} vychází z potřeb zpřesnění výpočtu zbytkové trvanlivosti L_{10h}^Z , vyplývající z teoretických výpočtů trvanlivosti zohledňující skutečné zátěžné spektrum vřeten.

Pro hodnocení zbytkové životnosti ložisek, podle skutečného stavu, byl zaveden korekční faktor vibrací K_v , posuzující trvanlivost na základě časové změny měřené efektivní hodnoty rychlosti vibrací ΔK_v .

Parametr efektivní hodnoty vibrací v_{RMS} byl vybrán z hlediska nejběžněji používaného parametru pro monitorování vibrací v praxi a udávaného např. v normách: ČSN 20 0065; ČSN ISO 10816-1; ČSN ISO 20816-1.

Hodnocení pomocí korekčního faktoru vibrací K_v

Korektivní zbytkové trvanlivosti vychází z poměru měřené efektivní hodnoty v_{RMS} a referenční hodnoty viz. Tab.1, aby bylo možné hodnotit, „o kolik“ došlo ke změně vůči referenční hodnotě. Teorie korekce trvanlivosti ložisek je odvozena z dlouholetých praktických zkušeností odhadu vlivu změny dynamického zatížení (vibrací) na trvanlivosti ložisek popsaného firmou Brüel & Kjaer.

Tab.1 Změna trvanlivosti ložisek a podmínky stanovení korekčního faktoru K_v

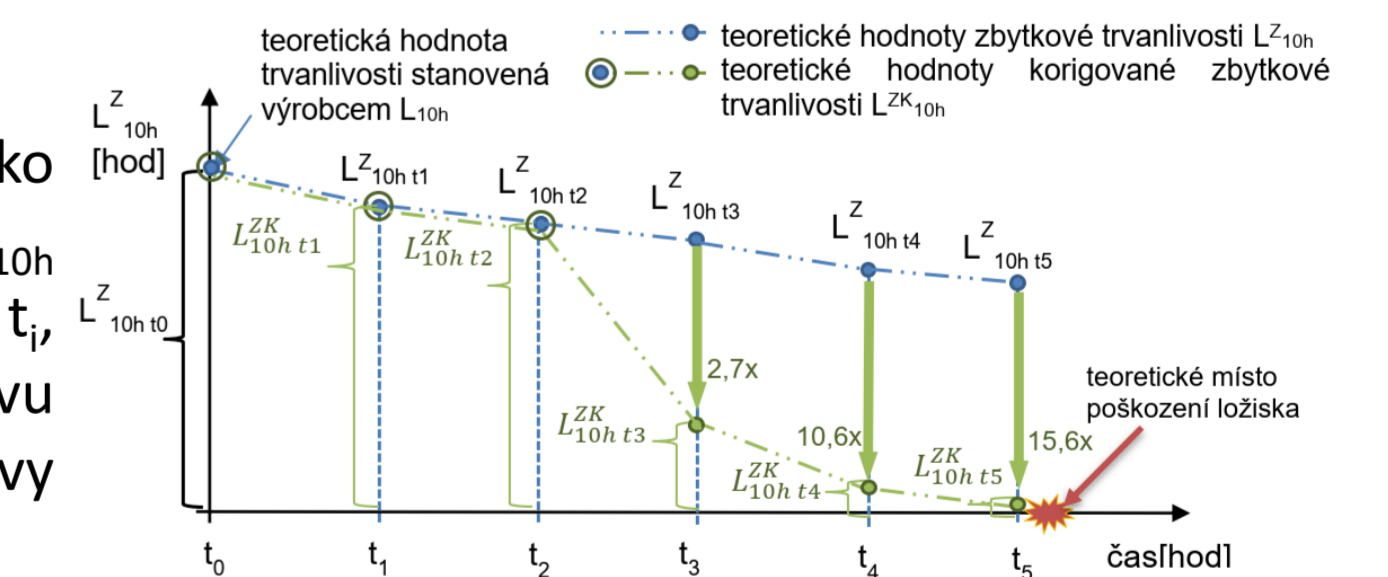
poměr $\frac{v_{RMS}}{v_{RMS,ref}}$	pokles trvanlivosti K_v^3	podmínka	hodnota
2	8x	$\frac{v_{RMS}}{v_{RMS,ref}} \leq 1$	$K_v = 1$
3	27x	$\frac{v_{RMS}}{v_{RMS,ref}} > 1$	$K_v = \frac{v_{RMS}}{v_{RMS,ref}}$
4	64x		
5	125x		

Definice výpočtu korigované zbytkové trvanlivosti

Hodnota korigované zbytkové trvanlivosti je definována jako rozdíl vypočtené teoretické hodnoty základní trvanlivosti L_{10h} z provozních podmínek od provozních hodin vřeten t_i , korigované s ohledem na posouzení aktuálního stavu vřeten K_v , než se objeví první známky poškození únavy materiálu na ložisku.

$$L_{10h ti}^{ZK} = \frac{(L_{10h ti} - t_i)}{K_v^3} = \frac{L_{10h ti}^Z}{K_v^3}; [hod]$$

Na obrázku Obr. 6 vidíme srovnání výsledků po korekci zbytkové trvanlivosti $L_{10h ti}^{ZK}$ na základě časové změny měřené efektivní hodnoty vibrací Obr. 7, která během úseku t_3 překročila referenční hodnotu.



Obr.6 Graf trendu vývoje korigované zbytkové trvanlivosti

6. ZÁVĚRY

V disertační práci byla odvozena metoda zbytkové trvanlivosti vřetenových ložisek s ohledem na skutečné provozní podmínky s jejich následným zpracováním pomocí zjednodušeného modelu vřeten a výpočtů základní trvanlivosti ložisek L_{10h}^Z dle ISO 281. Na základě, nichž dochází k výpočtu zbytkové trvanlivosti ložisek L_{10h}^Z , která je sledována vůči provozním hodinám stroje. Metoda je rozšířena o teorii korigované zbytkové trvanlivosti L_{10h}^{ZK} s ohledem na aktuální změřený vibrační projev efektivní hodnoty vibrací v_{RMS} .

Zásadním přínosem je možnost metodiku zbytkové trvanlivosti algoritmovat na základě logických pravidel stanovení korigované zbytkové trvanlivosti a matematicky popsanou vyhodnocování známých (dostupných) veličin z řídicího systému stroje a řezného procesu i při off-line režimu. Posuzování trvanlivosti vřetenových jednotek by bylo možné bez nutnosti složitějšího (expertního) a náročného strojového učení projevů frekvenčních spekter vibrací.

Navržená metodika byla úspěšně ověřena experimentálním měřením v praxi na souboru devíti vřeten. Navzdalo se o tři různé konstrukční typy vřeten, přičemž vřeten stejného typu byla používána na shodných strojích ve shodném typu výroby.