

ISSN 1210-311X MK ČR: 5 979

TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

1 ROČNÍK XXX 2021

ASOCIACE TECHNICKÝCH DIAGNOSTIKŮ ČESKÉ REPUBLIKY, z. s.

VIBRODIAGNOSTIKA A USTAVOVÁNÍ STROJŮ

Vibrační diagnostika v praxi – příklady

Examples of vibration diagnostics application in a practice

TD4

Aplikace vibrodiagnostiky na klíčovém zařízení čerpadel a posouzení vhodnosti metody pro reengineering údržby ofsetového tiskového stroje

Application of vibrodiagnostics on key pump devices and assessment of the suitability of the method for reengineering of offset printing machine maintenance

TD10

Možnosti použití umělé inteligence pro on-line vibrodiagnostiku

Possibilities of using artificial intelligence for online vibrodiagnostics

TD15

Několik postřehů k ustavování rotačních strojů aneb Jak s minimálními náklady výrazně zefektivnit výkon této činnosti

Some observations about the shaft alignment practice or how to make it more effective with no extra costs

TD19

Využití metod umělé inteligence v technické diagnostice – Deep Learning

The use of artificial intelligence methods in technical diagnostics – Deep Learning

TD21



Asociace technických diagnostiků ČR, z.s.
Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

40. mezinárodní vědecká konference
40th International Scientific Conference



DIAGO® 2021



TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA STROJŮ A VÝROBNÍCH ZAŘÍZENÍ
Technical Diagnosis of Machines and Manufacturing Equipment

Konference se koná pod záštitou
Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky

Prof. RNDr. Václava Snášela, CSc., rektor VŠB-TU Ostrava
prof. Ing. Bohumír Čepa, Ph.D., děkan fakulty strojní

1. - 2. ledna 2021
2. - 3. January 2021

Orea Resort Devět Skal ****, Sněžné - Jihlava
Podrobnější informace a registrace na www.diago.cz



DIAGO® 2021



... a tak nezbyvá, než si připomenout 39. ročník konference



DIAGO® 2020



DIAGO® 2020



Vážení čtenáři, příznivci myšlenek technické diagnostiky!

V minulém úvodníku nás prezident ATD ČR František Vdoleček oslovoval v období, kdy byla naše společnost pod tlakem opatření proti šíření koronaviru a zdálo se, že krátké období rozvolnění směřuje k blížícímu se konci pandemie. Bohužel se tak nestalo a já vás nyní oslovuji v období, které přináší další naději. Poučili jsme se, zvykli jsme si na nezbytná opatření, jsme opatrnější, omezujeme cestování, nepropadáme přehnanému optimismu a připouštíme, že cesta může být ještě dlouhá. Prezident Vdoleček rovněž konstatoval, co vše nám pandemie vzala nebo zkomplikovala. Nemohli jsme pořádat konference a další akce, na kterých se setkává více lidí, naše komunikace se přenesla do neosobního on-line prostředí a velmi se nám ztížila možnost cokoliv plánovat v blízkém i vzdáleném časovém horizontu. Silně byla zasažena i oblast vzdělávání a přípravy k certifikaci. Technická diagnostika nestaví jen na teoretických základech, ale opírá se o nezastupitelné experimenty a praktické činnosti, které nelze jednoduše vysvětlovat a procvičovat v on-line režimu. A nejsme v tom sami, obsluha strojů, řídicí struktury a další pracovníci zapojení do údržby strojů se potýkají s podobnými problémy.

Co nám současné období vzalo, můžeme shrnout a vyhodnotit. Otázkou je, co nám přineslo. Na prvním místě bych viděl fakt, že i ve složitých, dosud nevidaných, podmínkách průmysl fungoval a fungovala i údržba. Naučili jsme se novým způsobům komunikace a přenosu informací tak, abychom chránili své zdraví. Na druhém místě bych viděl fakt, že diagnostika získala další rozměr – je jím monitoring společnosti, který se velmi podobá našim činnostem. Monitorujeme, vyhodnocujeme, plánujeme, děláme závěry s cílem zabránit šíření koronaviru, a pokud dojde k nákaze, existují potřebná opatření.

Čtenářům se dostává k rukám vydání časopisu zaměřené na vibrační diagnostiku. Jedná se o téma pravidelné a v současné skladbě témat je zřetelný i současný trend, kterým je zaměření na management údržby a moderní způsoby zpracování dat. Současná výjimečná doba nás staví před otázku, jak dál, jak zefektivnit práci diagnostika, jak jej zbavit rutinních činností při zpracování naměřených dat a dát mu větší a spolehlivější prostor pro rozhodování. Průmysl se určitě změní, převládne snaha o robustnost a především schopnost čelit podobným problémům, kterým čelíme nyní. Děkuji autorům za zajímavá témata a odhodlání podělit se s námi o své zkušenosti.

Výhled do budoucna není ještě zcela jasný, odborníci se na dalším vývoji pandemie neshodují a vyzývají k opatrnosti, lidé se k opatřením stavějí individuálně. Mohu však, slovy svými i za prezidenta Vdolečka, poděkovat autorům článků, čtenářkám a čtenářům časopisu Technická diagnostika a též všem kolegyním a kolegům z ATD ČR za to, že stále podporujete myšlenku údržby strojů a technické diagnostiky, že jste pracovali a komunikovali v komplikovaných podmínkách a že jste udrželi fungující strukturu vzdělávání a certifikace. Průmysl je páteří našeho státu a jeho fungování je třeba zajistit. Přeji vám do budoucna pevné zdraví a věřím, že se situace mění k lepšímu; také doufám, že se brzy setkáme osobně a bez obtěžujících preventivních opatření.



*Pavel Němeček
víceprezident ATD ČR, z.s.*

ŠÉFREDAKTOR:
ZÁSTUPCE ŠÉFREDAKTORA:
GRAFICKÁ ÚPRAVA:
REDAKČNÍ RADA:

ING. DANIEL ZUTH, PH.D.
ING. LADISLAV HRABEC, PH.D.
JIŘÍ RATAJ
DR HAB. INŽ. WITOLD BIALY
ING. MARTIN HOLEK, PH.D.
PROF. ING. VÁCLAV LEGÁT, DRSC.
DOC. ING. VIERA PEŤKOVÁ, PH.D.
ING. FRANTIŠEK VDOLČEK, CSC.

VYDAVATEL:

ASOCIACE TECHNICKÝCH
DIAGNOSTIKŮ ČR, Z. S.
VŠB-TU OSTRAVA
17. LISTOPADU 15 / 2172
708 33 OSTRAVA - PORUBA

VYCHÁZÍ:

MK ČR:

ISSN:

2× ROČNĚ

5 979

1210-311X

EDITOR-IN-CHIEF:
ZÁSTUPCE ŠÉFREDAKTORA:
GRAPHIC EDIT:
EDITORIAL BOARD:

ING. DANIEL ZUTH, PH.D.
ING. LADISLAV HRABEC, PH.D.
JIŘÍ RATAJ
DR HAB. INŽ. WITOLD BIALY
ING. MARTIN HOLEK, PH.D.
PROF. ING. VÁCLAV LEGÁT, DRSC.
DOC. ING. VIERA PEŤKOVÁ, PH.D.
ING. FRANTIŠEK VDOLČEK, CSC.

PUBLISHER:

ASOCIACE TECHNICKÝCH
DIAGNOSTIKŮ ČR, Z. S.
VŠB-TU OSTRAVA
17. LISTOPADU 15 / 2172
708 33 OSTRAVA - PORUBA

2× ROČNĚ

5 979

1210-311X

ETICKÝ KODEX: ČASOPIS TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA SE PŘI SVÉM VYDÁVÁNÍ ŘÍDÍ ETICKÝM KODEXEM, KTERÝ STANOVUJE PRAVIDLA PRO PUBLIKACI PŘÍSPĚVKŮ. TO SE TÝKÁ JAK POSUZOVÁNÍ AUTORSKÝCH PŘÍSPĚVKŮ, TAK NÁSLEDNÉHO RECENZNÍHO ŘÍZENÍ. JEHO ZNĚNÍM JSOU POVINNI SE ŘÍDIT AUTOŘI, RECENZENTI I REDAKCE. CELÉ ZNĚNÍ ETICKÉHO KODEXU JE ZVEŘEJNĚNO NA WWW.ATDCR.CZ.

Vibrační diagnostika v praxi – příklady

Examples of vibration diagnostics application in a practice

JAN BILOŠ

SPECIALISTA VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKY KATEGORIE IV

Anotace

Jsou uvedeny příklady využití systému na monitorování vibrací a diagnostiku při řešení závad, jako jsou nevyváženost, mechanické uvolnění, mechanické závady elektromotorů, a je uvedena informace o částečně úspěšném pokusu zjišťování trhlin v turbínových lopatkách s použitím modální analýzy.

Annotation

Examples are given of PC based vibration monitoring and diagnostic system application in solving of faults such as unbalance, mechanical looseness of machines and mechanical faults of electro engines. An information is given on partially successful attempt to apply an experimental modal analysis in turbine blades cracks detection.

1. Úvod

Po roce 1985 se začaly používat systémy pro vibrační diagnostiku s počítačovou podporou. Podstatné části těchto systémů – analyzátor, počítač a software – byly v té době embargořeny a vyřídít jejich nákup znamenalo dosti velké úsilí.

Jeden takový systém založený na dvoukanálovém analyzátoru a technickém počítači se softwarem v jazyku Basic začal být používán v Ostravsko-karvinských elektrárnách a prakticky současně v jaderné elektrárně Dukovany (po Černobylu).

Jenže takový systém sice poskytoval široké možnosti využití, ty však vyžadovaly dobré speciální znalosti diagnostiků. A těch bylo zpočátku málo.

Dále jsou uvedeny příklady využití systému pro řešení nevyváženosti, mechanického uvolnění, mechanických závad elektromotorů a pro zjišťování trhlin lopatek aplikací experimentální modální analýzy.

2. Provozní vyvažování

Pokud dojde ke zvýšení vibrací stroje, je obvyklým požadavkem provozního personálu „Tak to vyvaž“. Často to jde, a dokonce docela dobře, ale přesto se v tomto problému někdy skrývá past: Příčina vibrací na frekvenci otáčení může být jiná než obyčejná nevyváženost anebo je dosti malá nevyváženost kombinována s jinou dominantní závadou.

Pro ty, kteří se s touto problematikou setkávají jen občas, doporučuji podívat se na nově vydanou normu ČSN ISO 13373-5: Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – část 5: Diagnostické metody pro ventilátory a dmychadla, kde je tabulka A.2 – Pozorovatelné symptomy typických poruch.

V této tabulce je uvedeno celkem 15 typů závad, které se projevují na frekvenci otáčení (1X): nesouosost hřídelů / chyby koncentricity, mechanické uvolnění, nadměrná vůle v ložisku, předpětí od potrubí, měkká patka, přidírání, nevyváženost, ohnu-

tý hřídel, deformace skříně, rezonance, naklápění základu, rám není ustavený, aerodynamické síly, závady řemenů, rezonance řemene, velké napnutí řemene, excentricita řemenice nebo nesouosost řemene/řemenic. (Je vhodné zvážit i mechanické závady elektromotorů – prasklé tyče apod.)

A jen jedna z uvedených možných příčin je nevyváženost!

To je vážné varování, které je třeba mít na paměti při rozhodování, zda vyvažovat.

Před provozním vyvažováním je třeba ověřit, že příčinou vibrací na frekvenci otáčení je nevyváženost.

Poznámka autor: V jednom moudrém článku, který napsal zkušený praktik, je věta „Pokus o vyvažování v blízkosti rezonance udělá z člověka úplného troubu“. I to se mi stalo.

3. Provozní tvary kmitu (PTK)

Jednou z dosti častých příčin vysokých vibrací, která dovejde hodně potrápít, je mechanické uvolnění často způsobující přeladění konstrukce do blízkosti rezonance.

Někdy lze příčinu mechanického uvolnění najít při pečlivé prohlídce – mnoho podložek pod patkami elektromotoru, šrouby, které drží jen části dosedací plochy, viditelné praskliny konstrukce. Někdy však prohlídka nevede k nalezení příčiny.

Někdy stačí porovnávat hodnoty vibrací a fáze nad a pod spojem. Ale přiznávám, že v literatuře uváděný rozdíl fází cca 180° jsem nikdy v praxi „nepotkal“. Zato mě silně potrápil případ uvolnění základové desky, kde rozdíl fáze mezi deskou a betonem byl pouhých 7°. Takže může zklamat i tento pokus o nalezení místa uvolnění.

V minulosti se používaly různé grafické metody znázornění pohybu částí – byly co do vytvoření i co do interpretace pracné. (Občas to někteří diagnostici stále zkoušejí.)

Proto byl po dohodě s SVÚSS (tehdy Státní výzkumný ústav pro stavbu strojů) vytvořen počítačový program pro náš počítač (v jazyce Basic), který umožnil zviditelnění pohybu konstrukce na dominantní frekvenci.

Metoda byla opakovaně s úspěchem použita a po víceletých zkušenostech byly hlavní poznatky a doporučení pro použití zpracovány v disertační práci.

Podstatné informace z používání metody jsou všeobecně známé:

1. Metoda zviditelnění provozních tvarů kmitu je z hlediska aplikace jednoduchá.
2. Metoda poskytuje výsledky jen pro zadaný model, který má být dostatečně věrným zobrazením skutečnosti, jinak nevede k cíli.

– **Geometrický model:** Důležité body je třeba zvolit nejen na samotném stroji (zejména nad a pod všemi konstrukčními spoji), ale také na podstatných částech, které jsou s ním spojeny (včetně relevantní části základu).

– **Dynamický model (volba směrů měření v bodech):** Doporučuje se zásadně měření ve všech třech směrech v každém

bodě. Vynechání zdánlivě nevýznamného směru (malé hodnoty vibrací) může znamenat, že výsledek analýzy je prakticky nepoužitelný, tj. nevede k určení příčiny problému.

V současnosti je program PTK zahrnut do softwarových balíčků (obvykle drahých).

Takový moderní program umožňuje zviditelnění kmitání na více frekvencích (v různých oknech). S aplikací pro více frekvencí však nemám osobní zkušenost.

Existuje také program, který umožňuje zviditelnění na základě časových průběhů. Protože tyto časové úseky musejí být synchronní, myslím, že pro řešení úlohy uvolnění (kdy se model skládá ze 40 i více bodů) může být program dosti obtížně použitelný. Vstup synchronních signálů vyžaduje stejný počet vstupních kanálů.

Ale existují i jednoduché programy, obvykle s ručním vstupem dat. I když zadávání dat je poněkud obtížné (trvá obvykle nejméně jednu směnu), domnívám se, že dobrý výsledek může nahradit tuto časovou ztrátu.

Dále je příklad porovnání výsledků měření provozních tvarů kmitu a provozní modální analýzy.

4. Příklad zjištění provozního tvaru kmitu a provedení provozní modální analýzy

Toto je příklad pro porovnání obou metod. Měření provozního tvaru kmitu (PTK) i měření pro provozní modální analýzu (OMA) zadního stojanu generátoru provedli studenti v rámci předmětu vibrační diagnostika na katedře mechaniky FS VŠB.

Cíle měření byly tyto:

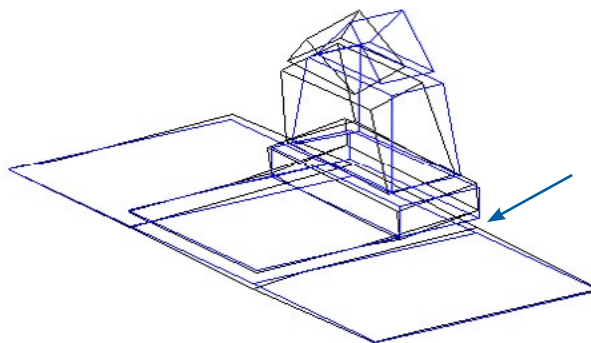
- zjistit příčinu nadměrných vibrací stojanu generátoru v axiálním směru za ustáleného provozu;
- porovnat výsledky PTK a softwaru pro provozní modální analýzu (OMA).

Příklad výsledku analýzy metodou PTK na 100 Hz je na obrázku 3. Zde je patrný náznak uvolnění základové desky jako možné příčiny zvýšení axiálních vibrací.

Z programu pro provozní modální analýzu lze jako výsledky získat jednak módy, které odpovídají provozním tvarům kmitu, a jednak módy, které jsou vlastními módy měřené konstrukce. Ukázalo se, že nadměrné vibrace v axiálním směru na druhém



Obrázek 2: Ukázka displeje s jedním měřením

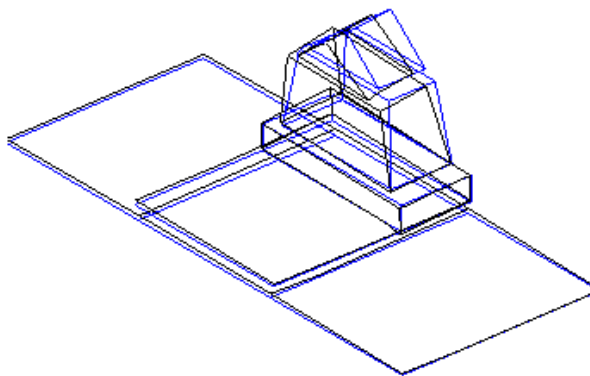


Obrázek 3: Výsledek analýzy PTK na 100 Hz

harmonické složce otáčkové frekvence (100 Hz) jsou způsobeny hlavně tím, že konstrukce má za provozu velmi blízko vlastní frekvenci 95,7 Hz a kmitá tedy v podstatě prvním vlastním tvarem kmitu.



Obrázek 1: Buzení kladivem (za provozu)



Obrázek 4: Vlastní tvar kmitu z OMA na 95,7 Hz (prakticky shodný s PTK na 100 Hz)

Dílčí závěry:

- Analýza PTK ukázala slabé místo – uvolněné připevnění základové desky.
- Analýzou OMA bylo zjištěno, že zvýšené hodnoty axiálních vibrací stojanu jsou způsobeny blízkostí vlastní frekvence konstrukce za provozu a budicí frekvence (blízkost rezonance) a také dílčím mechanickým uvolněním základové desky.
- Bylo ověřeno, že přirozené buzení při chodu stroje spolu s přidavným buzením pomocí úderů kladivem s měkkou špičkou je dostatečné k tomu, aby byly získány módy konstrukce pomocí programu pro provozní modální analýzu.
- Bylo by vhodné ověřit, zda se pro OMA lze při měření na rotačních strojích obejít bez přidavného buzení kladivem (zda je stochastické buzení postačující).

Poznámka autor: Byl zjištěn dosti velký rozdíl mezi vlastní frekvencí „za klidu“ (116 Hz) a vlastní frekvencí za provozu (97,5 Hz). Příčina není exaktně známá.

5. Diagnostika mechanických závad asynchronních elektromotorů

Ve snaze zdokonalit identifikaci mechanických závad asynchronních elektromotorů bylo ve spolupráci s katedrou elektroenergetiky VŠB a s diagnostickým střediskem OKD prováděno ověření metody analýzy napájecího proudu. Laboratorní zkoušky byly provedeny na motoru 5 kW s postupným přerušováním tyčí. Spektrum je na obrázku 5. Postranní pásma jsou výrazná a lze je použít pro diagnostiku.

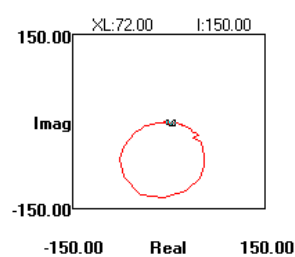
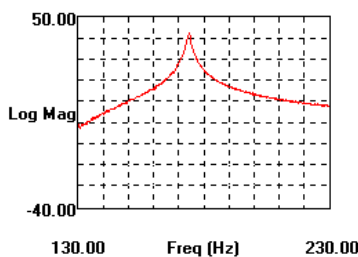
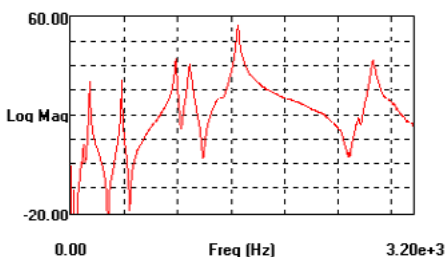
Provozní zkoušky byly provedeny na motoru 110 kW, rovněž byly úspěšné.

Výzkumné a ověřovací práce trvaly 2 roky a jsou popsány ve zprávách.

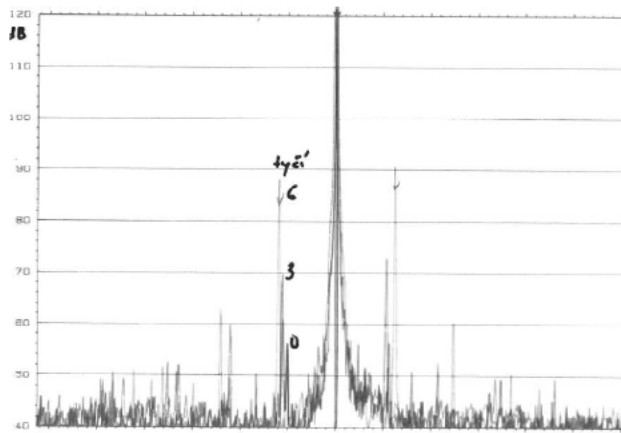
6. Zjišťování trhlin s využitím experimentální modální analýzy

Ve spolupráci s katedrou mechaniky FS VŠB probíhal několikaletý výzkum pro ověření možností a omezení experimentální modální analýzy (EMA) při její aplikaci na zjišťování trhlin v konstrukci. Pro experimenty byl zvolen nosník (lopatka).

Byly provedeny experimenty, a to jak laboratorní, tak provozní, při nichž byla ověřena přesnost a spolehlivost, se kterou je možné modální parametry – vlastní frekvenci, modální tlumení a vlastní tvary – z naměřených dat získat. Podrobně byl prozkoumán zejména vliv okrajových podmínek. Byl použit program založený na neuronové síti.



Obrázek 6: Příklad FRF a Nyquistova diagramu neporušené prismatické lopatky



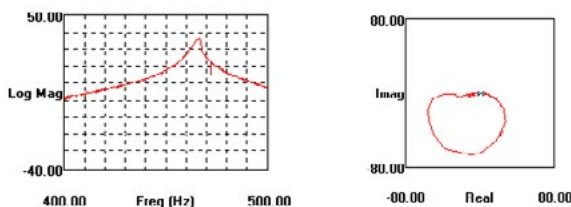
Obrázek 5: Příklad spektra napájecího proudu

Použití EMA k diagnostice poruch ve strukturách je téma, jemuž byla v době tohoto výzkumu věnována samostatná sekce na konferencích IMAC pořádaných v USA i na konferencích ISMA (International Seminar on Modal Analysis) pořádaných každé dva roky v belgickém Leuvenu. Avšak bylo publikováno relativně málo příspěvků, které se zabývaly skutečnými experimenty, a ne pouze počítačovými modely.

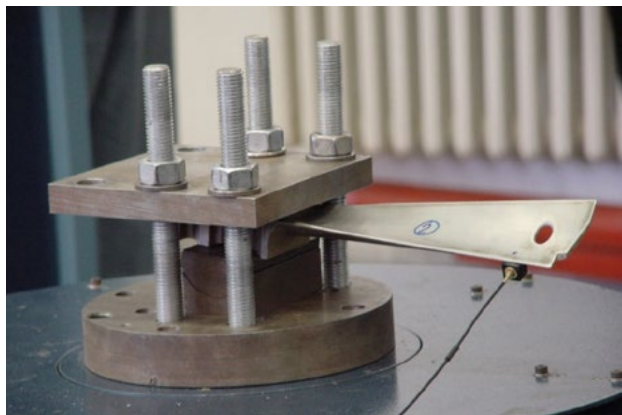
Při experimentech s tyčemi se zářezy byly vyzkoušeny různé metody identifikace porušení založené na změnách vlastních frekvencí a vlastních tvarů. Modální tlumení nebylo u těchto experimentů vyhodnocováno. Pokus naučit neuronovou síť poruchu lokalizovat nebyl úspěšný z důvodu malého množství dat použitelných pro učení neuronové sítě.

Pro únavové zkoušky s vytvořením skutečné trhliny byly zvoleny dva druhy turbínových lopatek – prismatické o délce 220 mm s uchycením ve svérce modelující skutečné uchycení v rotoru a zkroutené lopatky s vlastním závěsem s délkou listu 180 mm. Zkoušky byly prováděny na elektrodynamickém vibrátoru. Výsledky viz obr. 6 až 9.

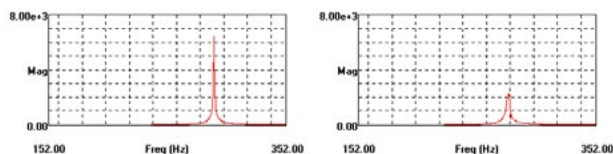
Provedené únavové zkoušky turbínových lopatek v obou případech prokázaly, že v průběhu únavové zkoušky je možné bez problémů zjistit počátek vzniku trhliny podle poklesu vlastní frekvence, na které je lopatka nucena kmitat. Z dat získaných během únavové zkoušky je možné i později existenci trhliny prokázat, protože vlastní frekvence při rozvoji trhliny klesají a tlumení módu, na němž lopatka kmitala, roste. Jednoznačné je to pouze v případě laboratorního experimentu, kdy jsou k dis-



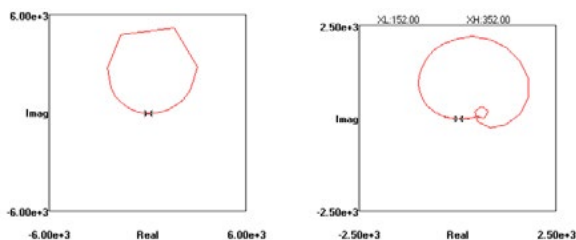
Obrázek 7: Příklad FRF a Nyquistova diagramu stejné lopatky po rozvoji trhliny v uchycení



Obrázek 8: Uspořádání při únavové zkoušce zkroucené lopatky



Obrázek 9a: Vlastní frekvence neporušené lopatky (vlevo) a lopatky s trhlinou



Obrázek 9 b: Nyquistův diagram neporušené lopatky (vlevo) a lopatky s trhlinou

pozici data v neporušeném stavu lopatky a průběžně získávaná data při rozvoji trhliny.

V provozních podmínkách je situace jiná – ideální by bylo, kdyby trhlínu bylo možné identifikovat na základě jejích projevů, aniž by byla k dispozici původní data. Původní myšlenka na počátku tohoto výzkumu byla sice taková, že bude vytvořena databáze lopatek na nových rotorech a při odstávce turbíny se budou sledovat změny stavu každé jednotlivé lopatky.

Provedená měření na jednom rotoru – novém a po třech letech provozu – však ukázala, že ani tento přístup není jednoznačný, protože vlastní frekvence a jim příslušející poměrné útlumy jsou ovlivněny i jinými vlivy než existencí trhliny. Při srovnání těchto veličin u lopatek na novém rotoru a u stejných lopatek po třech letech provozu bylo vidět, že vlastní frekvence některých lopatek se změnily více, než se mění vlastní frekvence při únavových zkouškách, přitom trhlina na těchto lopatkách nebyla.

Využití neuronové sítě k identifikaci trhliny v lopatce je opět bezproblémové v laboratorních podmínkách. Neuronovou síť se podařilo adaptovat na data z únavových zkoušek více kusů lopatek stejného typu. Prokázalo se, že neuronová síť je schopna generalizace, takže teoreticky by mělo být možné ji použít v provozních podmínkách, kde je třeba vyhodnotit data mnoha lopatek stejného typu. Problém je ale v tom, že nebyla k dispozici učící množina, na které by proces adaptace proběhl.

Jako další, dosud nevyzkoušená možnost se jeví sledování změn tvaru modální kružnice prvního módu. Vzniklá trhlina způsobí, že struktura je nelineární a modální kružnice se významně deformuje.

Měření lopatek na rotorech bylo vždy provedeno v širším frekvenčním pásmu, ve kterém se vyskytovalo několik vlastních frekvencí. Ale zkušenost ukazuje, že nejspolehlivější je vždy první mód a interpretace změn modálních parametrů vyšších módů je problematická. Navíc první mód přísluší u lopatek prvnímu tvaru kmitu a většinou způsobuje trhlínu u závěsu lopatky.

Celý popisovaný výzkum byl motivován snahou najít metodu, která bude schopna identifikovat trhlínu u závěsu lopatky, tedy v místě, které je pro jiné metody nedestruktivní defektoskopie nepřístupné.

Bylo by vhodné v budoucnosti aplikovat následující postup: sledovat pouze první mód pomocí měření s frekvenční lupou v úzkém frekvenčním pásmu. Výhodou tohoto postupu by mimo jiné bylo, že by bylo možné zobrazovat naměřenou FRF ve formě Nyquistova diagramu přímo na obrazovce analyzátoru, a pokud by se deformace Nyquistovy kružnice vyskytla, byla by podezřelá lopatka zjištěna okamžitě na místě a bez nutného následného zpracování naměřených dat.

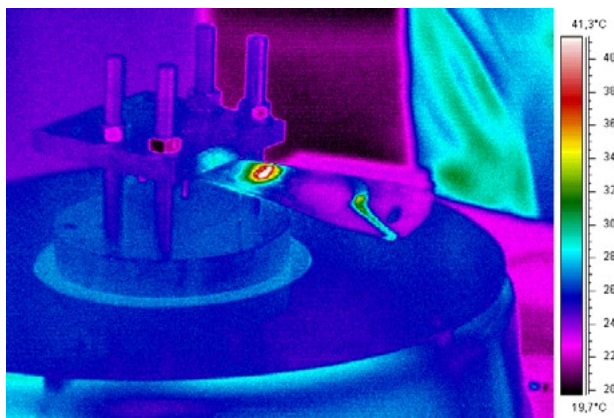
Při dostatku času, což bývá u provozních měření spíše výjimečně, by bylo vhodné provést navíc i měření podle původně plánované metodiky, tj. měření v širším frekvenčním pásmu, aby bylo možné srovnávat aktuální hodnoty modálních parametrů s předchozím stavem.

Pokud se v budoucnu použije EMA ke sledování i jiných struktur, bude možné uplatnit dosud získané zkušenosti.

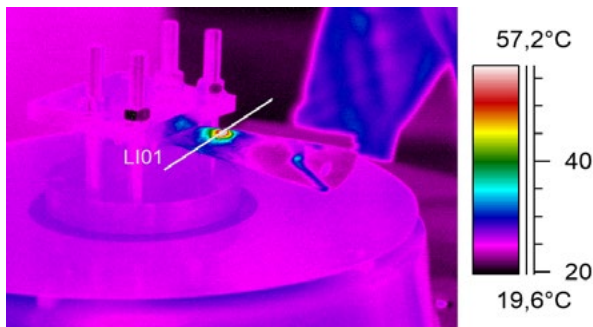
Poznámka pro případné zájemce o tuto aplikaci EMA: Podrobný popis prací a výsledky měření i jejich zpracování je v pěti dílčích zprávách a v disertační práci.

A pro pobavení jedna perlička na závěr

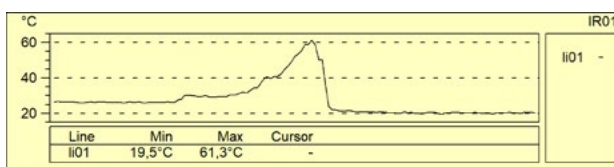
Když jsem se jako mladý, zvědavý inženýr účastnil únavové zkoušky problematické lopatky, zkoušel jsem, jestli nelze v průběhu zkoušky zjistit začínající trhlínu prstem/nehtem. Ze začátku nic... a pak jsem se spálil (opravdu byla lopatka v jednom místě velmi horká).



Obrázek 10: Jeden ze snímků v průběhu zkoušky, a to ještě před vznikem trhliny – vždy bylo nutné vypnout buzení vibrací, takže teplo se v oceli trochu „rozprostřelo“; skutečná místní teplota je pravděpodobně vyšší



Obrázek 11a: Snímek lopatky s trhlinou, pro kterou byl proveden termogram (viz 11 b)



Obrázek 11 b: Příklad zpracování termogramu snímku v obr. 11a

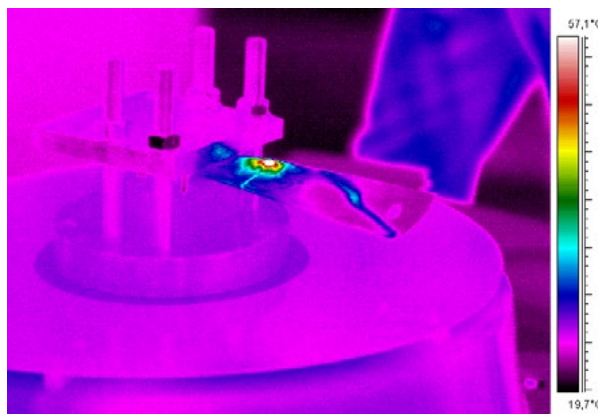
A tak mi tato zkušenost utkvěla v paměti a při výše popsáných únavových zkouškách jsem se pokusil o objektivní ověření pomocí termografické metody. Na obr. 10 až 12 je uveden příklad z dat (obrázků), která pro tento účel získal externista (celkem bylo pořízeno při zkoušce lopatky č. 1 jen 7 snímků, lopatky č. 2 pak 12 snímků, lopatky č. 3 nakonec 53 snímků).

Výzkumné a ověřovací práce trvaly několik let a jsou popsány ve zprávách.

Závěry

Předpokladem pro dobré vyvážení je posouzení a odstranění jiných příčin vibrací na frekvenci otáčení, a to ještě před vyvažováním.

Téměř neskutečně krásné, ale...



Obrázek 12: ...jak pochopit, že se trhlina nakonec rozvinula z náběžné hrany?

V případě mechanického uvolnění je vhodné uvážit aplikaci zviditelnění tvaru kmitu pomocí programu PTK. Pro dosažení dobrého výsledku je však nutné, aby model pro PC byl geometricky i dynamicky správný. Je možné zvážit i použití programu pro provozní modální analýzu OMA na zjištění, jestli příčinou vibrací není blízkost vlastního tvaru kmitu a provozních podmínek (blízkost rezonance).

Pro analýzu poškození částí trhlínami se jeví jako slibná aplikace experimentální modální analýzy spolu s neuronovou sítí a případné využití termografické diagnostiky.

Soubor norem pro monitorování a diagnostiku obsahuje řadu doporučení a pomůcek pro diagnostickou práci (zejména v přílohách jednotlivých částí).

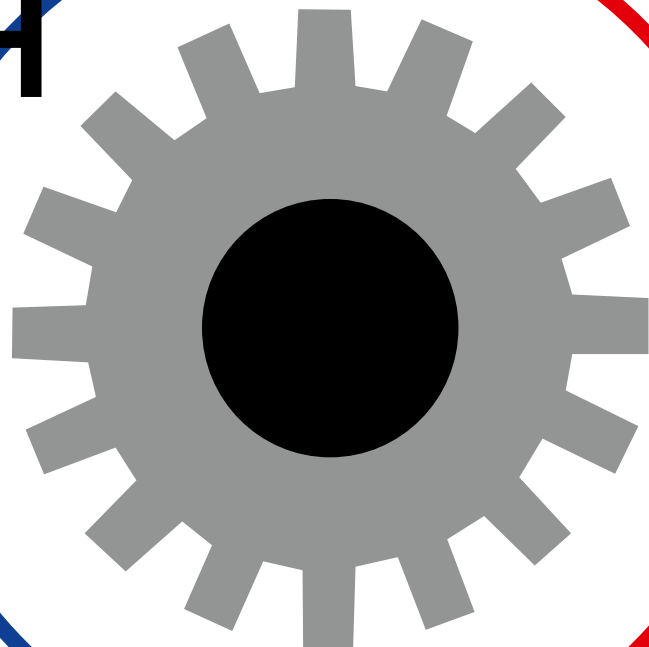
Použitá literatura:

- ČSN ISO 13373 (soubor): Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací
- Biloš J.: Metoda zviditelnění provozních tvarů kmitu – její místo a použití ve vibrační diagnostice (disertační práce) VŠST-TU Liberec 1993
- Bilošová A.: Využití experimentální modální analýzy k diagnostice porušení strojních součástí (disertační práce) VŠB-TU Ostrava 2002
- Bilošová A.: Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Modální zkoušky VŠB TU Ostrava 2012
- Bilošová A.: Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika VŠB TU Ostrava 2012
- Firemní dokumentace k softwaru na analýzu vibrací
- Firemní dokumentace k softwaru pro experimentální modální analýzu a pro provozní modální analýzu

Recenzent:

Kolář Lumír, SEW-EURODRIVE CZ s.r.o., Hostivice, pracoviště Ostrava; osoba certifikovaná na funkci Specialista vibrační diagnostiky - Kategorie IV

62. —————→ MEZINÁRODNÍ STROJÍRENSKÝ VELETRH



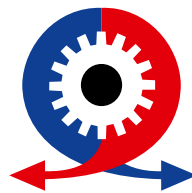
NOVÝ TERMÍN

8.–12. 11. 2021
BRNO



BVV
Veletrhy
Brno

**DIGITAL
FACTORY**



MSV 2021

Aplikace vibrodiagnostiky na klíčových zařízeních čerpadel a posouzení vhodnosti metody pro reengineering údržby ofsetového tiskového stroje

Application of vibrodiagnostics on key pump devices and assessment of the suitability of the method for reengineering of offset printing machine maintenance

KRISTÝNA KUTIOVÁ, MICHAL PODSTAWKA
VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Abstrakt

Tento text se zabývá vibrodiagnostickými zkouškami použitými při testování elektromotorů a čerpadel a následným posouzením vhodnosti použití této metody pro testování čerpadla ofsetového tiskového stroje v rámci reengineeringu jeho údržby. Testování bylo provedeno celkem na 8 elektromotorech a čerpadlech a každý test byl vykonán nejméně dvakrát v rozmezí alespoň tří měsíců. Na základě výsledků byly doporučeny vhodné zásahy. Metoda byla označena jako vhodná také pro reengineering údržby ofsetového tiskového stroje.

Abstract

This paper deals with vibrodiagnostic tests applied to the testing of electric motors and pumps and the subsequent assessment of the suitability of applying this method to the testing of the pump of an offset printing machine as part of the reengineering of its maintenance. Testing was carried out on a total of 8 electric motors and pumps and each test was carried out at least twice within an interval of at least three months. Based on the results, appropriate interventions were recommended. The method was also found to be suitable for reengineering the maintenance of the offset press.

1. Ofsetové tiskové stroje

Ofsetové tiskové stroje slouží k nepřímé tiskové metodě – z tiskové formy se tiskne na pryží potažený válec a z něj na papír. Barva se tudíž přenáší dvakrát. Oproti knihtisku umožňují tyto stroje tisk jemných detailů i na méně kvalitní papír či karton. To je umožněno pryžovým válcem, který dokáže přilnout i na ne zcela hladký povrch.

Tyto stroje jsou často využívány v tiskárnách zabývajících se potiskem cenin, knih a časopisů, kalendářů, ale také kartonů a krabic.

Princip tisku je založen na rozdílných fyzikálně-chemických vlastnostech tiskové formy (TF) obepínající formový válec. TF je v podstatě hliníková deska, na níž jsou naneseny dvě vrstvy s rozdílnými vlastnostmi. Barva je hydrofobní kapalina, která se nemísí ani s vodou, ani alkoholy. Vrchní vrstva je hydrofobní a je nenarušená, tzn. že odpuzuje vodu, ale mastnou barvu přijímá. Při nanášení tiskového vzoru se naruší hydrofobní povrch v místech, kde se nebude tisknout. Tím vzniká spodní vrstva, která je narušena a stává se hydrofobní. Přijímá roztok, jenž zabraňuje mastné barvě nalepit se na tuto plochu. V místech, kde se tisknout má, je povrch nenarušen.

Narušení povrchu se provádí vysvěcováním z filmů nebo laserovým vypalováním. Tisková forma projede vývojkou, která z budoucích netisknoucích míst vyplaví narušenou tisknoucí hydrofobní vrstvu.

Následně se tisková forma napne do stroje pomocí pneumatických čelistí na formový válec. Jak se tento válec otáčí, rolují po něm čtyři barevníkové válce s jednotlivými barevnými složkami tisku a jeden vlhčící válec s roztokem. Válec s formou se zároveň dotýká také s pryžovým přenášecím válcem, na němž s každým otočením ulpívá barva, která se nanese na papír či jiný tištěný povrch. [1]

2. Vodní čerpadla

Ofsetové tiskové stroje využívají pro dopravu vlhčícího roztoku na tiskovou formu vodní odstředivé čerpadlo, jež se skládá z elektromotoru a samotného čerpadla.

Čerpadlo čerpá vlhčící roztok, což je směs vody a alkoholu, ze zařízení Technotrans. Roztok je čerpán do nádrží věží, kde se navlhčí TF a dochází k chemické reakci, při které se naruší druhá vrstva popsána v kapitole 1. K tomuto vlhčení dochází v každé věži – každá věž tiskne jednu barvu.

V tiskovém stroji, jehož reengineering údržby se chystá, je použito odstředivé čerpadlo. Toto čerpadlo se skládá z oběžného kola s lopatkami, které se otáčí ve spirálové komoře, a elektromotoru. Vstup kapaliny je u osy rotoru, výstup na jeho obvodu.

Důvodem, proč se reengineering údržby vztahuje i k čerpadlům, je jejich častá poruchovost. Mezi nejčastější závady patří např. prasklá spirálová komora, což má za důsledek pění kapaliny. Z důvodu rozpěnění kapaliny dochází k ovlivnění hodnot pH roztoku vody a alkoholu. Následné měřáky pH a alkoholu vykazují hodnoty nevhodné pro práci stroje. Další častou závadou jsou nevyvážené hřídele motoru a také vady na ložiscích.

3. Vibrodiagnostika

Vibrodiagnostika je jednou z metod technické diagnostiky. Používá se u rotačních strojních zařízení, jako jsou elektromotory, čerpadla, turbíny, kompresory, ventilátory a podobně. O technickém provozním stavu kontrolovaného zařízení nám poskytují informace vibrace, jež mohou být vyvolány poškozením ložisek, nesouosostí hřídelí, nevyváhou rotujících částí, poškozením ozubených kol, zadíráním rotoru, špatným mazáním ložisek atd.

Cílem vibrodiagnostiky je zjistit technický stav strojního zařízení, případně lokalizovat místo budících vibrací. Tato metoda nám pomáhá naplánovat odstávku strojního zařízení

pro údržbu a také včas objednat potřebné díly. Můžeme tak snížit nutné preventivní kontroly a zároveň předejít nečekaným haváriím. [2] [3]

3.1 Základní veličiny a vyhodnocování

Základní veličiny pro vyhodnocení vibrací vycházejí ze základních parametrů mechanického kmitání, jež je periodické a má sinusový charakter. Jedná se o okamžitou výchylku, rychlost a zrychlení. Důležitý je také časový signál, z něhož se zaměřujeme na peak, peak-peak, průměrnou a efektivní hodnotu.

Pro vyhodnocování se často používá rychlé Fourierovy transformace, která hledá ve vibračním signálu opakující se děje, jež se zobrazí ve frekvenčním spektru pod určitou frekvencí. Frekvenční spektrum časového signálu je tvořeno množstvím sinusových signálů s amplitudou a počáteční fází. Toto je pro odhalování technického stavu strojního zařízení důležité. Určit však jednotlivé složky původního časového signálu je obtížné. Z tohoto důvodu je výhodnější použití frekvenčního spektra.

Nejdominantnějším signálem, který je možno pozorovat na otáčkové frekvenci, bývá harmonický signál – projev nevyváženosti. Nevyváženost je způsobena hmotností nevyvážku a projevuje se tak vlivem odstředivé síly $1 \times$ za otáčku.

Druhý signál projevující se ve frekvenčním spektru bývá způsoben nesouosostí nebo vadami na ložiscích. Tady dochází k většímu počtu vibračních impulzů, které jsou způsobeny přechodem valivých elementů přes vady ložiska. Existují vzorce pro výpočet poruchových frekvencí ložiska, díky nimž umíme určit, zda se jedná o vnitřní nebo vnější kroužek, klec či valivé tělísko. Tyto frekvence bývají často uvedeny v katalogu ložiska.

Třetím signálem je pak zubová frekvence, kde se projevuje poškození na ozubení převodu. Tuto frekvenci zjistíme, když mezi sebou vynásobíme otáčkovou frekvenci hřídele s počtem zubů ozubeného kola na stejném hřídeli.

Z naměřených hodnot se následně vytváří trend. Porovnáním všech naměřených hodnot nebo jejich porovnání s normální hodnotou vyňatou z příslušné normy dostáváme informace o technickém stavu strojního zařízení a můžeme začít uvažovat, co způsobilo vyšší naměřené hodnoty vibrací. Pro získání věrohodných výsledků je potřeba měření pravidelně opakovat a porovnávat s předchozím trendem. Je však potřeba zajistit, aby měření probíhalo vždy za stejných podmínek: měřit při stejných otáčkách, při stejném zatížení, snímač vibrací musí být umístěn na stejném místě.

Mezi nejčastější sledované hodnoty patří vibrace, zrychlení a teplota. Vývoj naměřených hodnot pak můžeme sledovat díky vytvořené vanové křivce.

Pokud se vývoj zhoršuje, lze konstatovat, že se zařízení dostává do poslední etapy životnosti, a pokud se včas nezasáhne, může dospět v poruchu. [2] [3]

Norma ČSN ISO 10816-7 uvádí doporučené hodnoty vibrací v pásmu 10–1 000 Hz. Meze pásem vibrací na nerotujících částech čerpadel o výkonu nad 1 kW. Jsou použitelná pro oběžná kola s počtem lopatek $z \geq 3$. Měřenou vyhodnocovanou veličinou je efektivní hodnota rychlosti vibrací v_{RMS} (mm/s). Hodnoty jsou uvedeny níže v tabulce č. 1.

Doporučené hodnoty pro zrychlení vibrací v pásmu 500–2 500 Hz jsou uvedeny v tabulce č. 2. [4] [5] [6]

Tabulka 1: Doporučené hodnoty vibrací v pásmu 10–1000 Hz

10–1 000 Hz	v_{RMS}
Rozhraní pásem	Efektivní hodnota vibrací (mm/s)
A/B	2,5
B/C	4
C/D	6,6

Tabulka 2: Doporučené hodnoty pro zrychlení vibrací v pásmu 500–2500 Hz

t	a_{RMS}
Rozhraní pásem	Efektivní hodnota zrychlení vibrací (g)
A/B	0,5
B/C	2
C/D	4

3.2 Volba vhodných měřicích míst

Výsledky měření musejí co nejlépe zobrazovat skutečnou amplitudu vibrací. Snímače vibrací umísťujeme na očistěná místa co nejbližší k ložiskům a v zásadě ve třech směrech: horizontálním, vertikálním a axiálním směru. Největší vibrace bývají v horizontálním směru (motor je v tomto směru nejpoddajnější), v axiálním směru bývají vibrace nejmenší (jsou projevem nesouososti nebo ohnuté hřídele).

Měření se nikdy neprovádí na krytech, ale přímo na konstrukci, která je v přímém kontaktu s ložiskem, abychom předešli zkreslení signálu. Důležitá je také bezpečnost, a tak se nikdy snímače neumísťují na místa, kde bychom mohli přijít do styku s rotující částí stroje. Abychom předešli poškození snímače velkou přitlačnou silou, nejprve se přikládá pod úhlem a až následně celou plochou, snímač vibrací je totiž magnetický.

Pokud měření provádíme na nemagnetických materiálech, je potřeba vložení vhodné měřicí podložky, která se na konstrukci lepí speciálním lepidlem.

Na obrázku č. 1 je znázorněn motor se šipkami, které nám ukazují vhodná místa pro dosažení přesných výsledků.

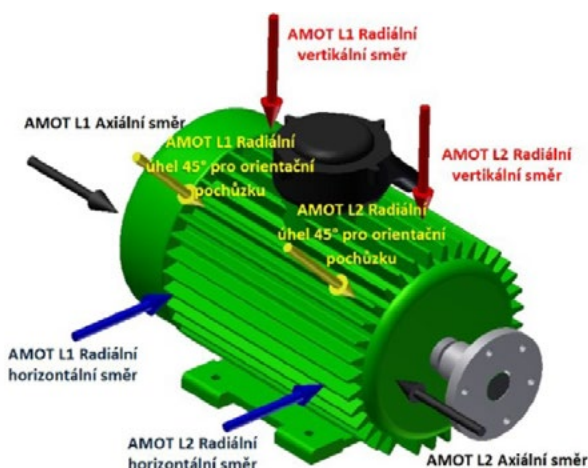
4. Vlastní měření čerpadel a výsledky

Pro měření byl použit vibrační analyzátor A440 – VA4 od firmy ADASH.

Ve firmě GWK (tepelná a chladicí technika) bylo provedeno měření u elektromotoru s čerpadlem s parametry uvedenými v příslušné tabulce. Měření proběhlo celkem na osmi elektromotorech s čerpadly. Měření se uskutečnilo na motorech označených čísly 35, 37, 39, 21, 23, 25, 29 a 31.

Měření každého elektromotoru s čerpadlem proběhlo vždy nejméně dvakrát s odstupem alespoň 3 měsíců a všechny elektromotory s čerpadly při měření pracovaly se zátěží.

Pokud první měření neodhalilo žádné zhoršené či nepříjemné hodnoty, bylo rozhodnuto o sledování stavu a zopakování měření. Účelem tohoto druhého měření bylo ověřit, zda elektromotor s čerpadlem stále setrvává ve vyhovujícím stavu



Obrázek 1: Možnosti umístění snímačů na motoru [2]

nebo zda došlo k nějakému zhoršení.

Z důvodu zkrácení článku zde nebudeme uvádět tabulky s elektromotory, jež měly obě měření z hlediska hodnot v pořadí, a proto byly označeny jako vyhovující. Jedná se o elektromotory s čerpadly s čísly 35, 39, 21, 25, 29 a 31.

4.1 Měření elektromotoru s čerpadlem č. 37

Tabulka 3: Elektromotor s čerpadlem č. 37

Elektromotor	
Název	KSB Aktiengesellschaft
Výkon	15 kW
Otáčky	2 940 min ⁻¹
Hmotnost	84 kg
Čerpadlo	
Chybějící parametry – Nečitelný štítek čerpadla	



Obrázek 2: Měřicí místa na elektromotoru a čerpadle č. 37, L1 (vlevo), L2 (uprostřed), L3 (vpravo) [7]

Měření bylo provedeno nejdříve na elektromotoru v místě L1 a L2, následně bylo měřeno čerpadlo v místě L3. Ve všech třech měřicích místech byl použit tříosý snímač vibrací. Rozmístění snímačů je vidět na obrázku č. 2.

Měření elektromotoru č. 37 proběhlo také celkem dvakrát. V tabulce č. 3 nejsou uvedeny parametry čerpadla, jelikož štítek nebyl čitelný.

Výsledky z měření jsou zapsány v tabulce č. 4. Hodnoty v tabulkách z měřicích míst L1, L2 i L3 jsou barevně rozlišeny podle hodnot, které uvádí norma ČSN ISO 10 316, dle tabulek č. 1 a č. 2 v předchozí kapitole.

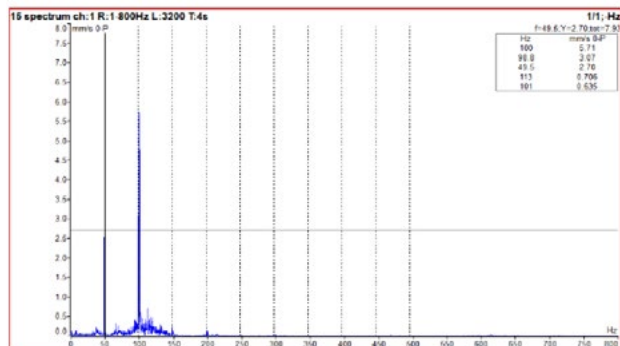
Z tabulky č. 4 můžeme vyčíst, že v měřicím místě L1 ve vertikálním směru je zvýšená hodnota vibrací, která leží v pásmu C. Toto pásmo informuje o tom, že vibrace jsou pro trvalý a dlouhodobý provoz neuspokojivé. Pod tabulkou je tedy uveden obrázek č. 3, na němž je frekvenční spektrum pro zjištění důvodu zvýšených vibrací. Ostatní naměřené hodnoty jsou vyhovující. Jelikož jsou naměřené hodnoty zrychlení vibrací nízké, není potřeba výměny ložisek.

Z frekvenčního spektra na obr. č. 3 je viditelný vysoký peak na otáčkové frekvenci (49,5 Hz) a na druhém násobku síťové frekvence 100 Hz. Důvodem zvýšené hodnoty je nevývaha, která může způsobit poškození ložisek, jehož vedlejším projevem je nadměrný hluk. Vysoký peak o velikosti 5,71 mm/s na dvojnásobku síťové frekvence značí nesymetrii elektromagnetického pole.

Druhé měření bylo provedeno po třech měsících. Účelem měření bylo zjistit, zda se zvýšené hodnoty v měřicím místě L1

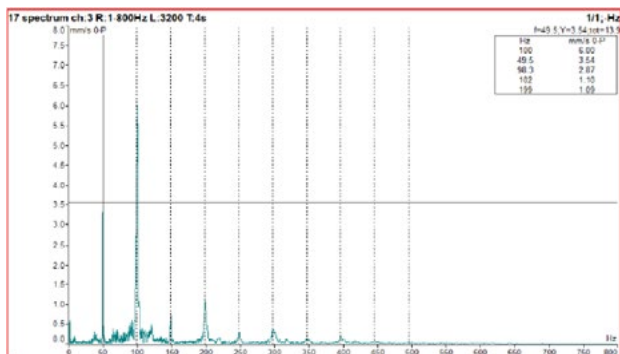
Tabulka 4: Naměřené hodnoty na elektromotoru s čerpadlem č. 37

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10–1000 Hz (v_{RMS}) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 500–25600 Hz (a_{RMS})							
Veličina	Směr	Měření 1			Měření 2		
		L1	L2	L3	L1	L2	L3
v_{RMS}	Horizontální	2,7	2,13	2,7	5	3	3,1
	Vertikální	5,4	3,1	3	4,4	2,5	2,7
	Axiální	3	0,72	0,9	5,1	3,1	3,2
a_{RMS}	Horizontální	0,31	0,28	0,44	0,02	0,08	0,28
	Vertikální	0,13	0,29	0,43	0,04	0,08	0,24
	Axiální	0,37	0,53	0,97	0,03	0,08	0,28



Obrázek 3: Spektrum rychlostí pro elektromotor č. 37, L1 – 2940 ot./min, vertikální směr, měření první [7]

ve vertikálním směru dostaly do pásma D a jestli se nepřenesly i do ostatních měřicích míst. Zvýšené hodnoty byly naměřeny ve všech směrech, ale stále v pásmu C. Neuspokojivé vibrace z hlediska dlouhodobého provozu je potřeba zkoumat a provést patřičná opatření, aby byly vibrace sníženy. Hodnoty zrychlení vibrací byly stále nízké, a tak nebyla potřeba výměna ložisek. Níže je na obr. č. 4 uvedeno spektrum rychlostí L1 v axiálním směru, kde byly hodnoty nejvyšší.



Obrázek 4: Spektrum rychlostí pro elektromotor č. 37, L1 – 2940 ot./min, vertikální směr, měření druhé [7]

Frekvenční spektrum vykazuje obdobné hodnoty jako při prvním měření. Je zde vidět vysoký peak na otáčkové frekvenci (49,5 Hz) a na druhém násobku síťové frekvence (100 Hz). Důvodem zvýšené hodnoty vibrací na otáčkové frekvenci je nevyvážení. Vysoký peak 6,00 mm/s na dvojnásobku síťové frekvence značí nesymetrii elektromagnetického pole.

Je doporučeno při příští odstávce motor rozebrat a prozkoumat vinutí motoru.

4.2 Měření elektromotoru s čerpadlem č. 23

Tabulka 5: Elektromotor s čerpadlem č. 23

Elektromotor	
Název	SIEMENS
Výkon	15 kW
Otáčky	2 940 min ⁻¹
Hmotnost	85 kg

Čerpadlo

Název	KSB Aktiengesellschaft 67227 Frankenthal
Průtok	75 m ³ /h
Dopravní výška	42 m
Jmenovitý průměr výtlačného hrdla	50 mm
Jmenovitý průměr oběžného kola	200 mm

První měření proběhlo na elektromotoru v místě L1, druhé v místě L2 a jako třetí bylo měřeno čerpadlo v místě L3; umístění snímačů je zobrazeno na obr. č. 5. Parametry měřeného elektromotoru a čerpadla jsou uvedeny v tabulce č. 5. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 6.

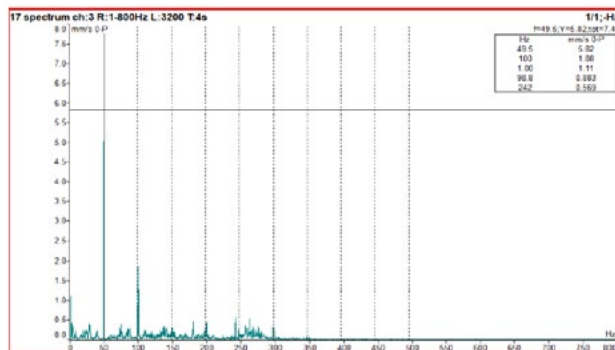


Obrázek 5: Měřicí místa na elektromotoru a čerpadle č. 23, L1 (vlevo), L2 (uprostřed), L3 (vpravo) [7]

Z tabulky naměřených hodnot je patrné, že po prvním měření byl stav motoru i čerpadla vyhovující. Nízké hodnoty zrychlení vibrací tedy nenaznačují, že by byla potřeba výměna ložisek. Účelem druhého měření po téměř čtyřech měsících bylo zjištění, zda se stav nezměnil.

Z tabulky naměřených hodnot je patrné, že po prvním měření byl stav motoru i čerpadla vyhovující. Nízké hodnoty zrychlení vibrací tedy nenaznačují, že by byla potřeba výměna ložisek. Účelem druhého měření po téměř čtyřech měsících bylo zjištění, zda se stav nezměnil.

Je patrné, že celkový stav se ve všech třech měřených místech zhoršil, nejvíce však v oblasti L1, kde jsou hodnoty vibrací v pásmu C. Opět je důležité zjistit, co je příčinou nárůstu vibrací, a podniknout potřebná opatření.



Obrázek 6: Spektrum rychlostí pro elektromotor č. 37, L1 – 2940 ot./min, vertikální směr, měření první [7]

Tabulka 6: Naměřené hodnoty na elektromotoru s čerpadlem č. 23

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10–1 000 Hz (v_{RMS}) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 500–25 600 Hz (a_{RMS})							
Veličina	Směr	Měření 1			Měření 2		
		L1	L2	L3	L1	L2	L3
v_{RMS}	Horizontální	2,3	1,8	1,4	5,7	3	2,1
	Vertikální	3,6	2,4	1,7	4,9	2,6	1,8
	Axiální	2,4	1,3	1,1	5,9	3,1	2,2
a_{RMS}	Horizontální	0,28	0,19	0,1	0,02	0,05	0,08
	Vertikální	0,2	0,14	0,18	0,05	0,06	0,1
	Axiální	0,5	0,34	0,36	0,02	0,05	0,08

Z frekvenčního spektra na obr. č. 6 je patrný vysoký peak na otáčkové frekvenci (49,5 Hz) a na druhém násobku síťové frekvence (100 Hz). Zvýšená hodnota vibrací (5,82 mm/s) na otáčkové frekvenci je způsobena nevývahou. Vysoký peak o velikosti 1,88 mm/s na dvojnásobku síťové frekvence značí nesymetrii elektromagnetického pole.

Je doporučeno i nadále sledovat stav vibrací a v případě nárůstu vibrací až do pásma D je nezbytné naplánovat odstávku zařízení a provést výměnu motoru.

4.3 Závěry z měření

Měření proběhlo celkem na 8 elektromotorech s odstředivými čerpadly. Hodnoty téměř všech měření naznačovaly vyhovující stav. Kromě elektromotoru s číslem 37, jehož stav byl mírně zhoršený a kde bylo doporučeno při plánované odstávce motor rozebrat a zkontrolovat rotor. Hodnoty zrychlení vibrací dosahovaly pouze minimálních hodnot, a tak nebylo potřeba zabývat se výměnou ložisek.

Elektromotor s číslem 23 dosáhl taktéž zhoršených hodnot v pásmu C. Jelikož k tomuto zhoršení došlo přibližně v rámci tří měsíců, bylo doporučeno motor nadále sledovat a v případě dosažení hodnot do pásma D okamžitě motor vyměnit. Hodnoty zrychlení vibrací i zde dosahovaly minimálních hodnot, a tak nebyla výměna ložisek nutná.

5. Závěr

Ofsetové tiskové stroje jsou komplexním zařízením, kde může reengineering údržby vést k vysokým úsporám. Jelikož je ofsetový stroj velmi komplexní, je potřeba určit, na kterých komponentech bude reengineering proveden jako první.

Častou závadou ofsetových tiskových strojů jsou poruchy čerpadel, která mají za úkol čerpat vlhčící roztok vody a alkoholu do nádrží jednotlivých tiskových věží, odkud se následně nanáší na vlhčící válec. Bez tohoto vlhčení nedochází ke správné chemické reakci s barvou na tiskové formě a není tak možné provést tisk dle požadavků.

Je důležité zvolit vhodnou metodu měření. V úvahu přichází vibrodiagnostika, která je schopna odhalit závady jak na elektromotoru, tak na čerpadle samotném, ať už jde o nevývažky, či závady na ložiscích.

Popsaná měření byla provedena na elektromotorech s odstředivými čerpadly ve firmě GWK. Výsledky byly použity pro zhodnocení, zda bude vibrodiagnostika vhodná také pro měření na čerpadlech ofsetových tiskových strojů, neboť ta používají stejný typ čerpadel.

Výsledky měření jsou uspokojivé a je možné zjistit příčiny zvýšených hodnot vibrací a zrychlení vibrací, což značí nevývažky i vady na ložiscích. Díky nim je také možné zjistit nesymetrii elektromagnetického pole.

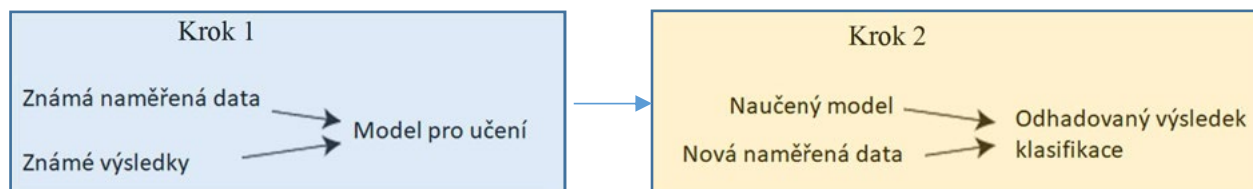
Tyto hodnoty je potřeba sledovat i u čerpadel ofsetových tiskových strojů; vibrodiagnostika s výše uvedeným postupem je tedy vhodná pro začlenění do údržby ofsetových tiskových strojů.

Použitá literatura

1. KUTIOVÁ, Kristýna. Teze disertační práce: Výzkum možnosti nasazení nedestruktivní diagnostiky za účelem reengineeringu systému údržby ofsetového tiskového stroje. Ostrava, 2021.
2. BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej: teorie a praktyka. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. 134 s. ISBN 978-80-248-2997-5.
3. HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. Technická diagnostika a spolehlivost II. Vibrodiagnostika. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2004. 178 s. ISBN 80-248-0650-9.
4. ČSN ISO 10816-1. Vibrace – Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech, část 1: Všeobecné směrnice, 1998. 24 s. ISSN 011412.
5. ČSN ISO 10816-7. Vibrace – Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech, část 7: Odstředivá čerpadla pro průmyslová použití včetně měření na rotujících hřídelích, 2010. 24 s.
6. ČSN ISO 10816-3. Vibrace – Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech, část 3: Průmyslové stroje se jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými otáčkami mezi 120 1/min a 15 000 1/min při měření in situ, 2010. 20 s.
7. POSPÍŠIL, Vojtěch. Aplikace metod vibrodiagnostiky na klíčových zařízeních. Ostrava, 2018. Bakalářská. VŠB – Technická Univerzita Ostrava.
8. BLATA, Jan. Manuál pro výuku: Vibrodiagnostika strojních zařízení. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. 24 s.

Recenzent:

doc. Ing. Helebrant František, CSc., VŠB – Technická univerzita Ostrava; osoba certifikovaná na funkci Specialista vibrační diagnostiky – Kategorie III



Obrázek 2: Funkční schéma

jeví jako nejvhodnější klasifikace. V našem reálném případě byly zvoleny tyto parametry, na základě kterých bude prováděna klasifikace:

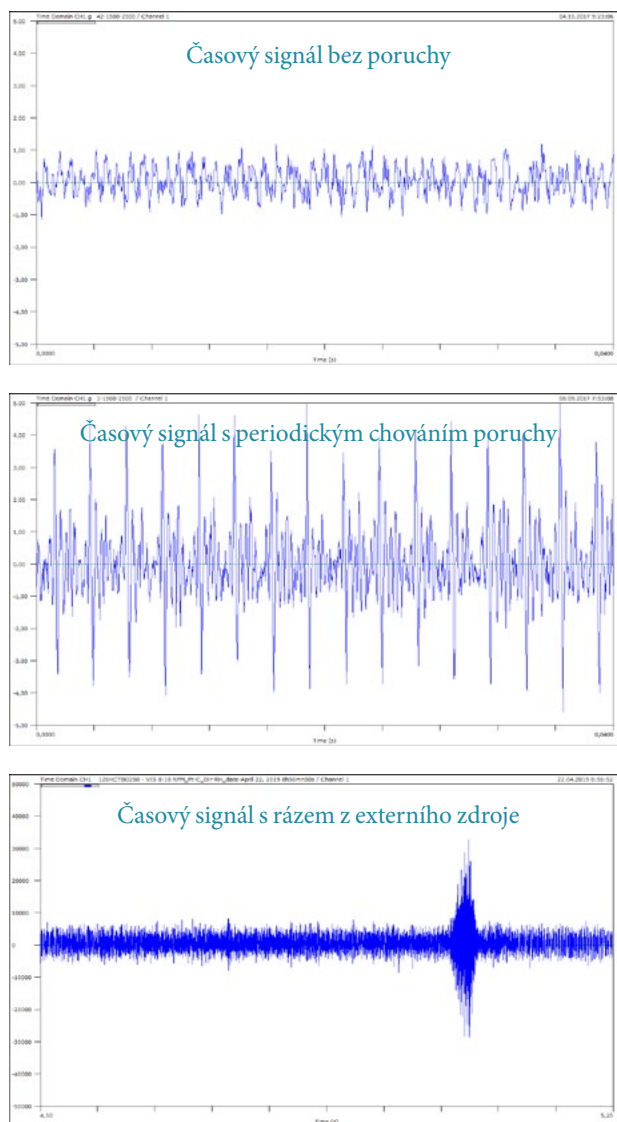
- RMS hodnota zrychlení z frekvenčního rozsahu 2–10000 Hz;
- špičková hodnota zrychlení ze stejného frekvenčního rozsahu;
- Crest faktor;
- špičkatost naměřeného souboru dat;
- šikmost naměřeného souboru dat.

RMS hodnota rychlosti dle normy ISO 28016-9 není zařazena do klasifikace pomocí Machine Learningu, ale je posuzována samostatně podle limitů v normě. Tato hodnota reaguje především na poruchy z pohledu uvolnění dílců, na nevyváhu, nesouosost a dále na poruchy ozubení a ložisek v pokročilém stadiu, proto není plně dostačující pro prediktivní, popř. proaktivní údržbu. Pro detailnější pohled na zdroj vibrací v FFT spektru v jednotkách rychlosti je vhodný algoritmus Deep Learningu, který bude popsán v následující kapitole.

Pro autonomní zpracování dat, kde bude výsledkem klasifikace naměřeného časového signálu, je nutné nejprve zpracovat tabulku s uvedenými parametry ze známých naměřených dat a přiřadit k nim odpovídající klasifikační stupeň. Takto probíhá učicí proces; čím více těchto známých dat je k dispozici, tím kvalitněji je algoritmus naučen data správně klasifikovat. Na obrázku 2 je naznačen postup ve dvou krocích. Většina zákazníků, kteří vyžadují výsledky z takto zpracovaných dat, chce pouze 3 klasifikační stupně, a to stroj (převodovka) bez poruchy, začínající porucha a omezení provozu, popř. stop stav. Takto koncipovaný algoritmus je schopen zachytit všechny základní druhy poškození ozubení a poruchy ložisek podle otáček hřídele. Ložiska s otáčkami nad 300 ot./min snáze zachytitelná takovýmto algoritmem a pro nízké otáčky na ložiscích je nutné ještě přiřadit další algoritmy s možností porovnávání FFT spektru zrychlení ve frekvenčním rozsahu vyšším než 10 kHz.

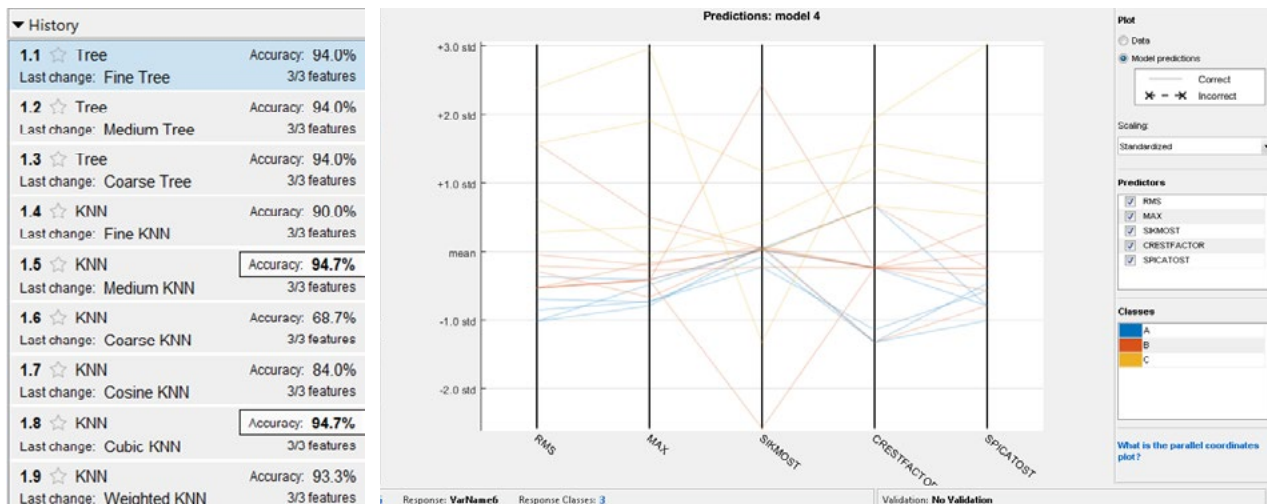
Algoritmus nástroje Machine Learningu zahrnuje také oddělení periodického a neperiodického rázového chování. V současnosti řada monitorovacích zařízení posílá zbytečné alarmany v případech, kdy se do naměřených hodnot dostane ráz z externích zdrojů, třeba při práci s klavírem (obrázek 3 dole). Například u mixérů, extruderů nebo lisů dochází v technologickém procesu k častým rázům, které opět nejsou periodické, ale navyšují hodnoty v trendech. Takovýto stav musí být buď pomocí statistických funkcí, nebo filtrů vstupních dat oddělen.

Ve fázi, kdy je vypracovaná odpovídající tabulka v MS Excel s vyplněnými danými parametry pro učení pro známé případy naměřených dat, následuje ještě další krok, a to výběr vhodného matematického algoritmu. Ve výběru, který má např. software

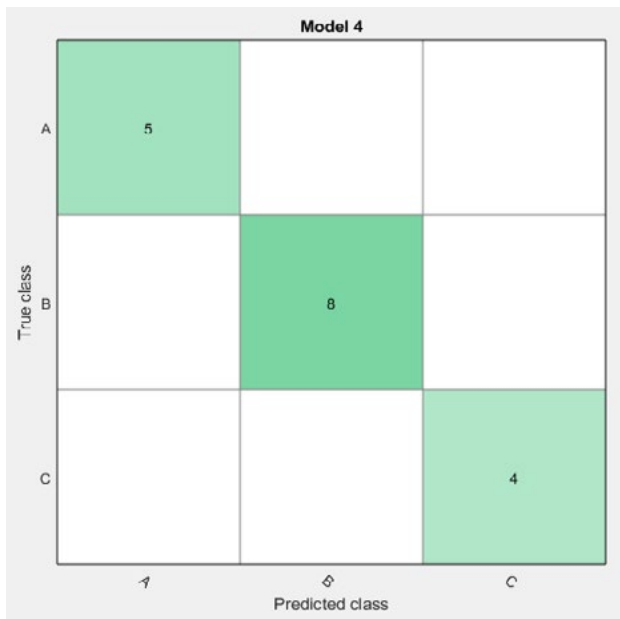


Obrázek 3: Příklady sledovaných časových signálů

MATLAB, jsou algoritmy od jednoduchých stromových algoritmů až po nelineární kubické algoritmy (obrázek 4). Pro náš konkrétní případ se nejlépe chovaly algoritmy KNN medium a Cubic KNN s přesností odhadu klasifikace 94,7 %. Tato přesnost je dána nejen výběrem typu algoritmu, ale i učicími daty v excelovské tabulce. V případě dalšího vhodného dopl-



Obrázek 4: Výběr vhodného algoritmu



Obrázek 5: Prověření správnosti algoritmu

ňování dat pro naučení je možné dosáhnout i 100% přesnosti. Na obrázku 5 je vidět výsledek vnitřního prověření přesnosti klasifikace algoritmu.

Jelikož jsou všechna pole zelené barvy, nedošlo ke špatnému klasifikačnímu zařazení.

3. Klasifikace stavu převodovky pomocí nástroje Deep Learning

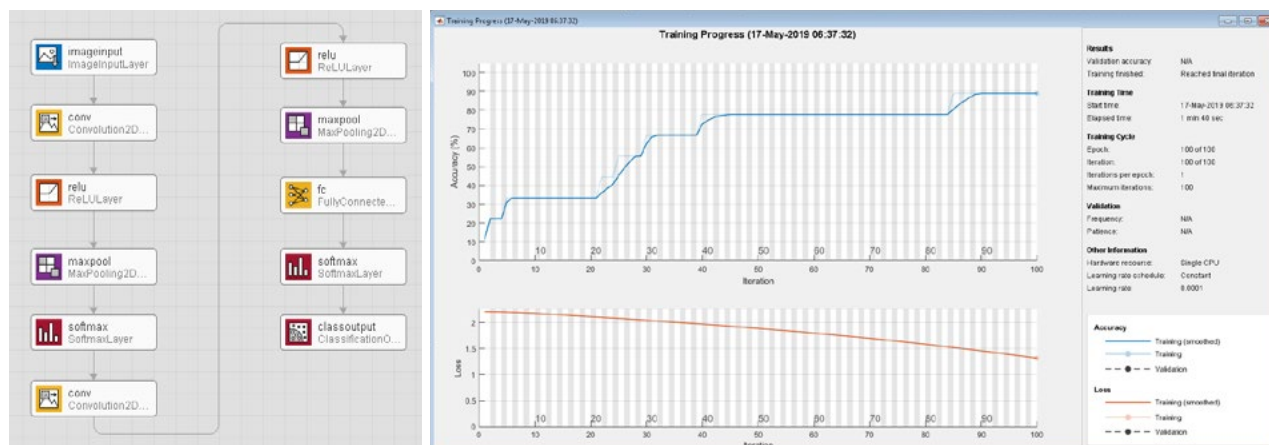
Algoritmy Deep Learningu pracují na bázi klasifikace obrazu. Postup je podobný jako u Machine Learningu, kde bylo nutné v prvním kroku naučit na známé databázi algoritmus a potom tento algoritmus klasifikoval nově zpracovaná data do stupňů poškození. V dnešní době jsou tyto algoritmy hojně

využívány pro identifikaci osob nebo zvířat z kamerových obrazů, překážek při pohybu robotů atd. Tento algoritmus je možné využít také pro klasifikaci FFT spekter vibrací, spektrogramů, scalogramů, časových záznamů a tvarů orbit při hřídelovém kmitání. Pro použití takového nástroje je nutné nejprve vytvořit vlastní neuronovou síť (obrázek 6) nebo použít volně dostupné neuronové sítě, jako je např. alexnet, googlenet a další, jenže ty jsou zbytečně náročné na čas zpracování dat. Dále je nutné naměřená data zpracovat do podoby grafů, které se převedou na obrázek o předepsaném rozměru a počtu pixelů.

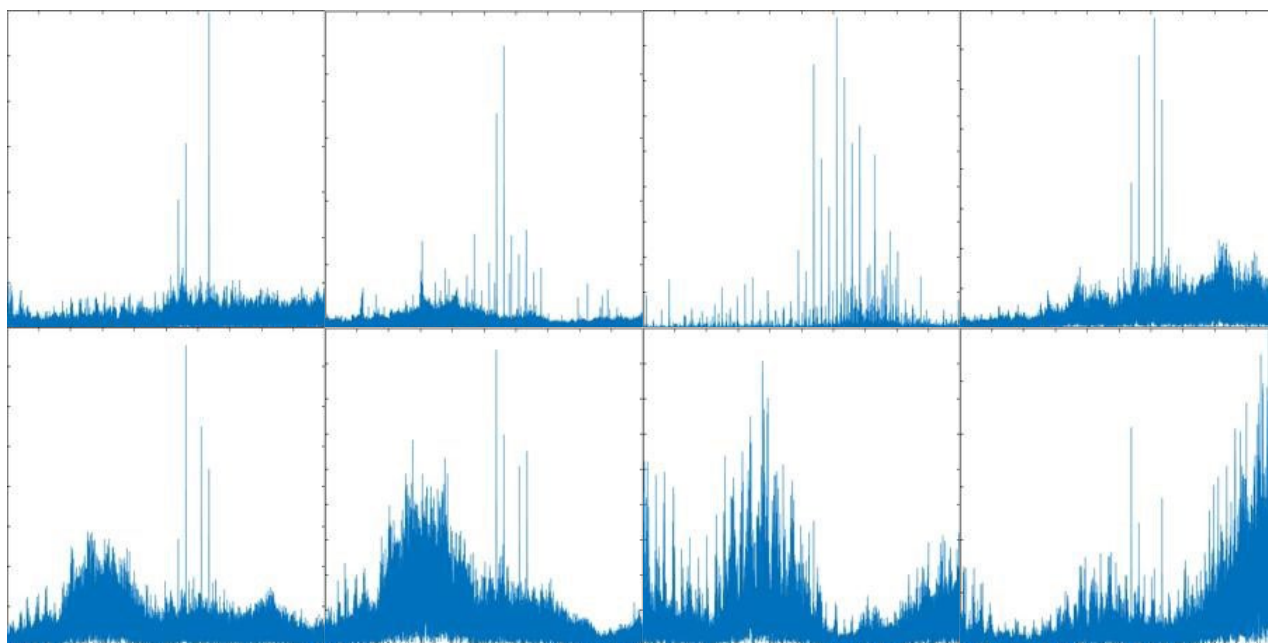
Na obrázku 7 je možné vidět ukázkou typů FFT spekter pro identifikaci problémů na ložiscích. Zpravidla nová ložiska, která běží optimálně, nevytvářejí oblasti šumu ve spektru zrychlení. Algoritmus Deep Learningu je nutné naučit z obrázků spekter, jak vypadá nepoškozené ložisko a potom jak se postupně ve spektru vyvíjí porucha (obrázek 7). Tentýž princip lze použít i pro další druhy zobrazení naměřených vibrací. Na obrázku 8 je možné vidět klasifikace pracovních cyklů ze spektrogramů s grafem, který ukazuje skóre daného obrázku vůči dalším variantám klasifikace.

Při navrhování souboru obrázků grafů učícího algoritmu je nutné brát ohled na správnou volbu počtu intervalů vývoje poruchy, aby se algoritmus při aproximacích mezi jednotlivými stupni vývoje nedopouštěl velké chyby. V případě algoritmu Deep Learningu se nabízí možnost mít klasifikaci poruch do více tříd než u Machine Learningu, protože je možné se už více zaměřit na určitý druh poruchy na konkrétním ložisku nebo ozubení.

Jak už bylo uvedeno výše, algoritmy Machine Learningu i Deep Learningu umožní autonomní vyhodnocování poruch převodovky nejen pro správné spouštění alarmů, ale i pro predikci poškození, včetně správné lokalizace. Nad vyhodnocováním poruch musela bez těchto algoritmů v minulosti sedět řada odborníků dlouhé hodiny, což se dnes postupně může přesunout do pozice, kdy tito odborníci nastaví autonomní systém vyhodnocování a mohou být použiti na další odbornou práci.



Obrázek 6: Blokové schéma a proces učení vlastní neuronové sítě pro danou aplikaci

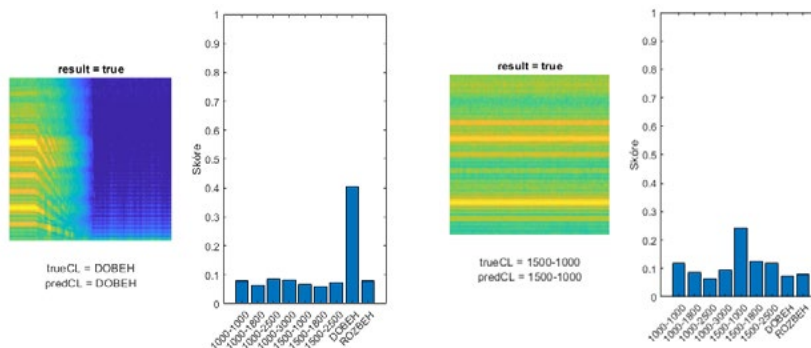


Obrázek 7: Příklady oříznutých obrázků FFT spekter při klasifikaci

Samozřejmě k takovéto situaci bude zapotřebí ještě několik kroků vývoje, protože poruchy mechanických komponent jsou většinou únavového charakteru a každá takováto porucha má svůj specifický vývoj podle zátěžových provozních cyklů, které se ještě navíc mohou v čase různě měnit.

4. Závěr

- Použití algoritmů Machine Learningu a Deep Learningu umožňuje ušetřit lidské kapacity při on-line dozoru monitoringů.



Obrázek 8: Příklady spektrogramů se zobrazeným skóre

- Přesnost těchto algoritmů závisí na velikosti souboru dat pro učení, na kvalitě nastavení neuronové sítě a v neposlední řadě na schopnostech učitele.

Použitá literatura

- www.mathwork.com, MATLAB Documentation-Math Works, 2019
- A. A. Pinheiro, I. M. Brandao, C. da Costa: Vibration Analysis of Rotary Machines Using Machine Learning Techniques,

European Journal of Engineering Research and Science, Vol.4, February 2019

- U. Ilić, B. Trojić, V. Lazić, F. Filipić: Classification models of machine learning for vibration analysis of induction motor, Conference IcTRAN, Silver lake, June 2019

Recenzent:

Bc. Křivohlavý Jan, Pelhřimov – Moravec; osoba certifikovaná na funkci Specialista vibrační diagnostiky – Kategorie III

Několik postřehů k ustavování rotačních strojů aneb Jak s minimálními náklady výrazně zefektivnit výkon této činnosti

Some observations about the shaft alignment practice or how to make it more effective with no extra costs

MGR. MAREK ŠEREMETA
LAMI KAPPA, SPOL. S R. O.

Anotace

Text je věnován praktickým problémům souvisejícím s konstrukcí nebo provedením rotačních strojů a jejich základů, které komplikují, prodlužují a tím prodražují jejich ustavování a také demotivují pracovníky údržby. Vyhnout se těmto problémům nebo je vyřešit lze často s minimálními náklady, stačí si jen tyto skutečnosti uvědomit.

Annotation

The article focuses on the practical issues related to the design or implementation of the rotating machinery and its foundations, which hamper, protract and therefore make more expensive its shaft alignment and also demotivate the maintenance staff. It is often possible to avoid or solve these problems with minimum extra costs by just keeping these issues in mind.

Během naší práce zahrnující technickou diagnostiku v mnoha aspektech – od prodeje vybavení přes školení uživatelů až po měření a analýzu dat – se stále setkáváme s opakujícími se nešvary a problémy, které zdržují, způsobují vícenásledky či ztěžují, ba dokonce znemožňují řádné provedení potřebných činností.

V tomto článku se zaměříme na oblast ustavování rotačních strojů, což je „disciplína“, která je (nebo by měla být) běžná pro naprostou většinu průmyslových firem, jimž záleží na životnosti a spolehlivosti vlastního strojního zařízení. Nejedná se o žádnou „vědeckou“ nebo „zázračnou“ činnost, je ale důležité znát určité zákonitosti, mít praktické zkušenosti a také odpovídající vybavení. Nicméně to, jak dobře a rychle lze rotační stroje ustavit, může podstatnou měrou ovlivnit už jejich návrh, konstrukce a instalace. A tady se stále setkáváme s opakujícími se, navíc často zbytečnými nedomyšlenostmi a komplikacemi, které by bylo možné odstranit nebo se jim vyhnout s minimálními, či dokonce žádnými vícenásledky. Pamatujme, že i čas jsou peníze, odstavený stroj nevydělává a také že našťavý a frustrovaný pracovník není ten, který by

měl tendenci odvádět co nejlepší práci.

A nyní již ke konkrétním příkladům maličkostí, na něž je vhodné myslet již při návrhu a instalaci stroje, protože jinak mohou výrazně zkomplikovat, znesnadnit a prodloužit samotné ustavování:

- 1) Během ustavování je třeba strojem pohybovat ve vertikálním směru, aby bylo možné jeho výškovou polohu upravovat pomocí vkládání nebo odebrání podložek. Někdy je k dispozici zvedací zařízení (jeřáb, kladkostroj, hydraulický zvedák apod.), často je ale na pracovníkovi, který ustavování provádí, aby si s nadzvednutím stroje poradil sám. V tomto případě velmi pomáhá, pokud je stroj vybaven zvedacími šrouby. To jsou šrouby, které skrz otvor se závitem procházejí patkami stroje, mohou se opřít o frému a umožňují stroj plynule přizvednout (pro vložení nebo odebrání podložek) pouze pomocí odpovídajícího montážního klíče. Jen pozor na to, aby zvedací šrouby nebyly v patkách stroje umístěny tak, že by komplikovaly umístění podložek nebo manipulaci s nimi.
- 2) Stroje jsou většinou instalovány na frémě/základu či jiné konstrukci zajišťující jejich upevnění. Není-li tato konstrukce dostatečně tuhá, je velmi obtížné dosáhnout přesného ustavení strojů. Jestliže během ustavování zjistíte, že se sousost strojů mění podle toho, z jaké strany k nim zrovna



Obrázek 1: Příklad málo tuhé a nevhodně navržené konstrukce upevnění stroje

přistoupíte nebo kolik vážíte, případně že se při utahování kotevních šroubů konstrukce uchycení deformuje, pak už víte, že takové ustavování vám bude trvat výrazně déle a výsledek je nejistý. Navíc zde není ani záruka, že bude souosost strojů zachována po jejich uvedení do provozu (působení krouticího momentu, tlaků a dalších provozních vlivů).

- 3) S konstrukcí upevnění stroje souvisí i další možná komplikace. Stále častěji se vyskytují frémy, které jsou stejně široké jako vnější okraj patek stroje. Cílem je pravděpodobně snížit materiálovou náročnost, případně zástavbové rozměry. Pokud je ale stroj potřeba přizvedávat např. páčidlem, není někdy o co páčidlo zapřít. Fréma, která nepřesahuje šířku patek, může také způsobit, že vložené podložky částečně přesahují „obrys“ frémy a představují nebezpečí poranění pro pracovníky údržby.



Obrázek 2: Příklad úzké frémy s vyčnívajícími podložkami

- 4) Při ustavování je potřeba pohybovat strojem také v horizontálním směru. Je nutné si uvědomit, že při ustavování běžných strojů jde o přesnost v řádu setin nebo maximálně desetiny milimetru. Je opravdu frustrující a časově obvykle náročné snažit se posunout stroj s takovou přesností pomocí páčidla, palice, „hupcuku“ či jiného podobně „přesného“ prostředku. Přitom řešení je již dlouho známé, osvědčené a za pár korun. Jsou to odtlačovací šrouby, tedy šrouby směřující vodorovně do kraje patek stroje a upevněné k frémě



Obrázek 3: Příklad ne zcela vhodně umístěných odtlačovacích šroubů (vzhledem ke konstrukci stroje) způsobujících komplikace při vkládání a odebírání podložek

dostatečně dimenzovanými úchyty a umožňující přesné horizontální polohování stroje pouze pomocí odpovídajícího montážního klíče. Nicméně jako u zvedacích šroubů (viz bod 1) platí i zde, že odtlačovací šrouby mají být umístěny tak, aby nekomplikovaly manipulaci s podložkami.

- 5) Ustavování rotačních strojů se provádí nejen před jejich prvním spuštěním do provozu, ale během celé jejich životnosti (opravy, výměny, modernizace apod.). Z praktických důvodů (minimalizace pozdějších komplikací při ustavování) se doporučuje při instalaci strojů vložit pod patky všech strojů přesné podložky tloušťky 2 až 3 mm. Tím se minimalizuje riziko, že při pozdějších ustavováních vznikne situace, kdy bude potřeba polohu stroje snížit, ale jeho patky budou ležet přímo na frémě a nebudou pod nimi žádné podložky, které by bylo možné odebrat. Cena několika kusů podložek je ve srovnání s cenou strojů nebo drahých komplikací při ustavování naprosto zanedbatelná položka.
- 6) Průměr otvorů v patkách pro kotevní šrouby stroje by měl být navržen tak, aby umožňoval určitou flexibilitu v polohování stroje. Jestliže je průměr otvorů dimenzován jen na to, aby jimi prošly kotevní šrouby, ale bez možnosti jakéhokoli posunu stroje, je to téměř zárukou, že ustavování se řádně zkomplikuje a prodlouží.
- 7) Ustavování neznamena jen řádně ustavit stroje výškově a stranově, ale také nastavit správnou axiální vzdálenost obou částí spojky vůči sobě. Spojka natlačená příliš k sobě nebo naopak natažená moc od sebe není pro dlouhodobý bezproblémový provoz stroje ideální. Optimálním řešením je (pokud to konstrukce stroje dovoluje), když jsou obě části spojky nebo alespoň jedna z nich na hřídelích upevněny suvně s následnou fixací a vzdálenost mezi nimi lze tedy jednoduše přesně doladit. Pro možnost správného axiálního ustavení strojů je také důležitý bod 6 výše.
- 8) Mnoho strojů je do technologie napojeno pomocí potrubí, případně kabelů nebo jiných externích rozhraní. Toto napojení by mělo být navrženo a provedeno tak, aby síly působící přes tato rozhraní na daný stroj byly minimalizovány. Stroj nemá být kotevním prvkem. Přenáší-li se na stroj cizí síly, je jeho ustavování velmi problematické a není ani zaručena jeho správná souosost za provozu.
- 9) Pro účely ustavování je podstatné, aby bylo možno během měření otáčet s hřídelem stroje s instalovanými komponenty laserové-



Obrázek 4: Příklad konstrukce stroje a jeho příslušenství s výrazným prostorovým omezením pro instalaci komponent pro ustavování na straně elektromotoru



Obrázek 5: Příklad obtížného přístupu ke kotevnímu šroubu (prostřední kotevní šroub je „dosažitelný“ pouze z boku frémy otvorem v nosníku cca 12 × 10 cm na vzdálenost přesahující délku paže)

ho přístroje použitého pro ustavování a aby tyto komponenty (laserový vysílač a detektor) bylo možné vůbec na hřídele upevnit. Máme zde na mysli alespoň elementární dostatek prostoru pro upevnění komponent a pro (alespoň částečnou) rotaci hřídelů s těmito komponenty, které u většiny způsobů jejich uchycení radiálně vyčnívají nad obvod spojky.

- 10) A nakonec to úplně základní – při návrhu rotačních strojů a jejich instalaci je nutné myslet také na to, že ke strojům musí být rozumný přístup a že při jejich ustavování (a nejen ustavování) je potřeba s nimi pohnout a používat nářadí, a ne pouze mobilní telefon. Pokud je hodně komplikované se ke stroji vůbec dostat s přístrojem, podložkami a nářa-

dím, pokud nelze povolit šroub bez toho, aby bylo nutné rozebrat polovinu příslušenství nebo mít „jednu ruku dlouhou“, pokud není kam vložit „panenku“ zvedáku nebo pokud je nutné při práci u stroje stát na jedné noze, pak je dost pravděpodobné, že se nikomu nebude moc chtít se takovým strojem zabývat, a tedy o něj řádně pečovat. A to přece není cílem žádného manažera ani pracovníka údržby.

Výše uvedené příklady „maličkostí“ komplikujících ustavování rotačních strojů si nedělají nárok na úplnost nebo

paušální platnost (strojů je nepřehledné množství druhů a typů), ale mají být upozorněním a inspirací pro to, jak lze často s minimálními náklady zefektivnit a usnadnit běžnou činnost údržby, jako je ustavování. Věříme, že nikdo z nás nemá zálibu dělat věci zbytečně pracně, dlouho a v důsledku toho i drazé. A nezapomeňme – chuť pracovníků údržby vykonávat svou práci dobře nezávisí pouze na výši platu, ale také na podmínkách, které ke své práci mají. Nestálo by tedy za úvahu popřemýšlet, zdali by se ustavování strojů i ve vaší firmě nedalo zefektivnit?

Recenzent:

Ing. Suchomel Michal, ČEZ, a. s., Praha; osoba certifikovaná na funkci Specialista vibrační diagnostiky – Kategorie II

Využití metod umělé inteligence v technické diagnostice – Deep Learning

The use of artificial intelligence methods in technical diagnostics – Deep Learning

DANIEL ZUTH

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ – VUT V BRNĚ

Abstrakt

Článek se zabývá možností využití metod umělé inteligence pro klasifikaci stavu (poruch) stroje na základě obrazových dat. Konkrétně se jedná o metodu Deep Learning, zpracovanou ve volně dostupném prostředí Python a knihoven Keras a TensorFlow. Výsledky jsou porovnány s dříve publikovanými metodami [1][2] na známém datasetu za účelem posouzení vhodnosti nasazení této metody pro řešení složitějších problémů.

Abstract

The paper deals with the possibility of using artificial intelligence methods for classification of machine condition (faults) based on image data. Specifically, it is a Deep Learning method, developed in the freely available Python environment and the

Keras and TensorFlow libraries. The results are compared with previously published methods [1][2] on a known dataset in order to assess the suitability of deploying this method for solving more complex problems.

Úvod

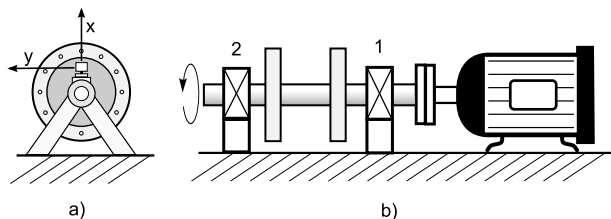
Současná technická praxe v oboru technické diagnostiky se s rozšiřující digitalizací potýká s problémem nadměrného množství dat, která je nutno zpracovat v relativně krátké době. Tuto výzvu je tedy nutné řešit pomocí účinných metod umělé inteligence, jež nahradí (lidské) experty, kterých v praxi spíše ubývá než naopak. Tento článek představuje další metodu, která dokáže vhodně klasifikovat stavy či poruchy stroje na základě historických, ale dostatečně popsanych dat. V minulých článcích [1][2] byla představena metoda klasifikace pomocí známých klasifikátorů, kdy bylo ovšem nutné předzpracovat data a extrahovat ukazatele neboli prediktory, jež nějakým

způsobem rozlišují jednotlivé poruchy. To znamená, že je nutná jistá znalost nebo zkušenost, které prediktory jsou vhodné a které nikoli. Metoda představená v tomto článku předkládá data pouze v nezpracované podobě, tzn. bez jakékoli znalosti problematiky a nutnosti předzpracování. Data jsou předkládána formou grafů a umělá inteligence vyhodnocuje tato obrazová data. Je to totéž, jako by zkušený expert, který má dlouholeté zkušenosti, zhlédl graf a s jistotou mírou pravděpodobnosti určil, o jakou závadu se jedná. Zde použitá metoda se nazývá Deep Learning a využívá umělé neuronové sítě; jedná se o neuronovou síť využívající několik skrytých vrstev. Základem je využití konvoluční neuronové sítě (CNN), která pracuje vhodně s obrazovými daty, a to tak, že zpracovává malé segmenty z celého obrazu a segmentuje si je na menší části. Následují další vrstvy, jako například Pooling vrstvy, které snižují počet vstupů pro další zpracování. Vnitřní struktura neuronové sítě je volitelná a záleží na požadovaných vlastnostech; její volba také ovlivňuje náročnost výpočtu. To, co je však jasné, je vstupní a výstupní vrstva. Vstupní vrstva obsahuje tolik vstupů, kolik má pixelů vstupní obrázek, případně velikost vstupních dat, i když nejsou obrazového charakteru, a výstupní vrstva má tolik výstupů, kolik stavů/tříd/poruch chceme klasifikovat. Z toho je patrné, že výpočetní náročnost této metody je mnohem vyšší než klasifikace dat pomocí klasifikátorů popsaných dříve, protože zde existuje nutnost extrahovat prediktory automaticky a až poté provést „jednoduchou“ klasifikaci.

Metody Deep Learningu se běžně používají k rozpoznání/klasifikaci obrazových dat například v lékařství nebo ve strojovém vidění (autonomní automobily a podobně), jejich uplatnění je však univerzální a lze je úspěšně aplikovat do dalších odvětví technické praxe

Zdroj dat (dataset)

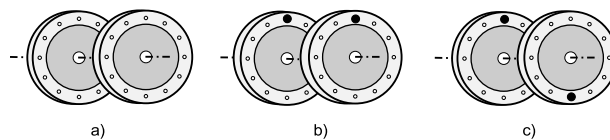
Zdrojem dat jsou naměřené hodnoty ze dvou akcelero-
metrů ADXL335, které měří vibrace diagnostického modelu, kde byly simulovány poruchy rotačních strojů, a to konkrétně statická a dynamická nevývaha ve dvou různých úrovních. Schéma modelu a umístění snímačů je na obrázku 1. Závady byly simulovány umístěním závaží do kotoučů, jak je znázorněno na obrázku 2. Pro každý vzorek dat bylo sejmuto 1000 vzorků rychlostí 2 kHz, pro obrazový vstup bylo použito pouze prvních 500 vzorků.



Obrázek 1: Vibrodiagnostický model: a) pohled zleva – umístění snímače a směry os, b) přední pohled – znázorněné pozice 1 a 2

Sledované kategorie/třídy nebo stavy byly následující:

- třída 1 „OK“ – z obou kotoučů jsou odstraněna závaží, jedná se o bezporuchový stav;



Obrázek 2: Znázornění umístění závaží: a) bezporuchový stav, b) statická navývaha, c) dynamická navývaha

- třída 2 „ST1“ – statická nevývaha 1, do obou disků jsou umístěna závaží o hmotnosti 2,5 gramu dle obr. 2 b;
- třída 3 „DYN1“ – dynamická nevývaha 1, do obou disků jsou umístěna závaží o hmotnosti 2,5 gramu dle obr. 2c;
- třída 4 „ST2“ – statická nevývaha 2, do obou disků jsou umístěna závaží o hmotnosti 3,7 gramu dle obr. 2 b;
- třída 5 „DYN2“ – dynamická nevývaha 2, do obou disků jsou umístěna závaží o hmotnosti 3,7 gramu dle obr. 2c.

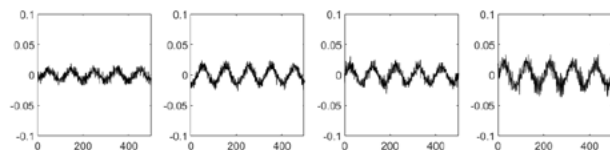
Zpracování dat

Nyní následuje příprava dat, která budou předkládána do procesu učení. Oproti metodám, kde je nutno vytvořit prediktory, tzn. mít znalost problematiky a vědět, jaké prediktory vystihují podstatu problému, zde provedeme pouze normalizaci dat do určité konstantní obrazové podoby, tedy aby vstupní data měla stejný počet vstupních pixelů, a to jak data určená pro učení, tak data budoucí, jež se budou vyhodnocovat. V následujícím příkladu byly provedeny dva experimenty (dvě různé sady obrázků) a budou porovnány jejich výsledky.

Z minulých experimentů popsaných v [1][2] neměla klasifikace problém rozpoznat závady, pokud měla k dispozici zdroje dat z obou míst (1 a 2) a z obou os, a dosahovala úspěšnosti 100 %, proto byl proveden druhý experiment, kdy byla poskytnuta data pouze z místa 2, to znamená údaje pouze z jednoho snímače. Pak dosahovala úspěšnost „pouze“ 91 %. Podobně byl zvolen přístup i v tomto případě.

Experiment 1 – Data z obou snímačů

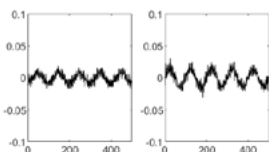
Byla předkládána data z obou míst (obou snímačů) a jednalo se o časové průběhy zrychlení, příklad předkládaných obrazových dat pro jedno měření je na obr. 3.



Obrázek 3: Ukázka předkládaného grafického vstupu pro experiment 1 – rozměr je 1040 x 260 pixelů (pozice 1 osa X, pozice 1 osa Y, pozice 2 osa X a pozice 2 osa Y)

Experiment 2 – Data z jednoho snímače

Byla předkládána data pouze z jednoho snímače a opět se jednalo o časové průběhy zrychlení, příklad je na obr. 4. Vzhledem k tomu, že vibrace se kvůli rozdílné tuhosti pozice 1 a pozice 2 budou projevovat odlišně, byla vyhodnocena každá pozice zvlášť.



Obrázek 4: Ukázka předkládaného grafického vstupu pro experiment 2 – rozměr je 520 × 260 pixelů (jedna pozice 1 nebo 2, osa X a Y)

Proces trénování sítě

Postup pro práci s metodou Deep Learning je následující. Nejprve je nutno definovat model sítě (topologii sítě), tzn. pořadí, druh a počet vrstev neuronové sítě. Následně tento model natrénovat, což pro síť znamená nalezení několika parametrů (tzv. vah). V tomto případě se jednalo o počet 311 502 021 (pro pozice 1 a 2). Toto číslo je zbytečně vysoké a je dáno neoptimálním nastavením jednotlivých vrstev; přidáváním dalších vhodně nastavených vrstev by bylo možné redukovat výstupní parametry z každé vrstvy a tím dosáhnout nižšího počtu nastavitelných parametrů. V tomto experimentu byla síť sestavena spíše minimalisticky než optimálně a vzhledem k dobrým výsledkům s experimentem 1 ji nebylo nutné více optimalizovat. Nicméně je nutné podotknout, že počet vrstev a neuronů by měl být co nejnižší, jinak se může síť začít chovat jako paměť, tzn. sice se perfektně naučila předkládaná data, ale o to horší je na nových (neznámých) datech.

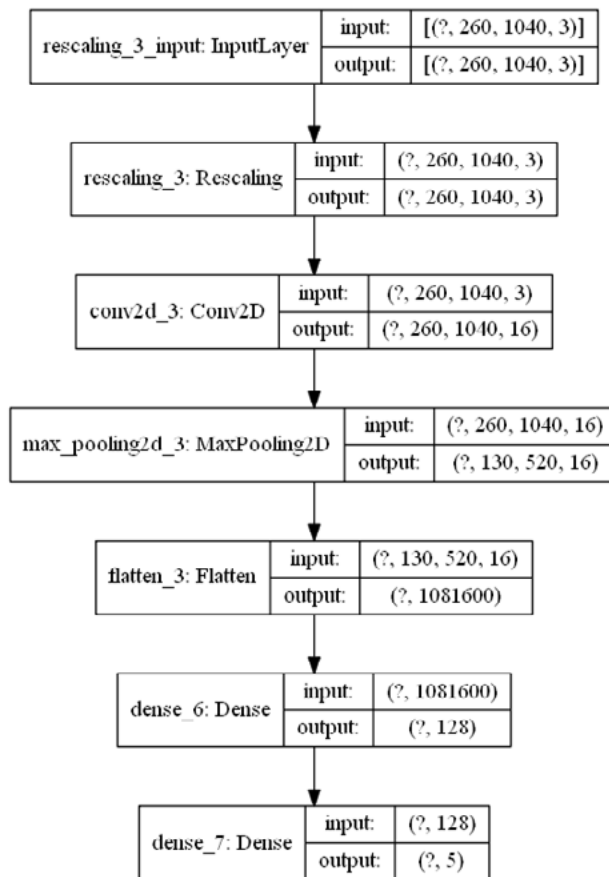
Jako programové prostředí bylo zvoleno prostředí Python 3.x [5] a knihovny Keras [3] a TensorFlow [4], a to zejména díky vhodným licenčním podmínkám, což v tomto případě znamená, že oba použité nástroje je možné zdarma šířit a používat i pro komerční použití (Keras – MIT licence, TensorFlow – Apache License 2.0 a Python – OSI-approved open source license).

Konkrétní topologie sítě použitá u obou experimentů byla následující:

- layers.experimental.preprocessing.Rescaling(1./255, input_shape=(img_height, img_width, 3));
- layers.Conv2D(16, 3, padding='same', activation='relu');
- layers.MaxPooling2D();
- layers.Flatten();
- layers.Dense(128, activation='relu');
- layers.Dense(num_classes).

Jedná se tedy o vstupní vrstvu, která upraví jednotlivé pixely na matici 0–1, následuje konvoluční vrstva, dále aplikace Max-Pooling, poté úprava výstupu pomocí vrstvy Flatten (převod na 1D objekt) a potom přijdou na řadu plně propojené dvě vrstvy Dense, kdy výstupů je stejný počet jako počet klasifikačních tříd, což je v tomto případě 5. Grafické znázornění struktury sítě je na obr. 5.

Po vytvoření modelu nastává proces učení, který je náročný na výpočetní výkon; je tedy časově náročný, avšak plně automatizovaný. Umělá inteligence se učí (trénuje), což znamená, že nastavuje 311 502 021 parametrů (69 223 621 u experimentu 2) tak, aby úspěšnost klasifikace byla co nejvyšší. Uživatel zadává počet „pokusů“, při nichž dochází k dosahování lepších výsledků. Pokud se výsledek již nelepší nebo byl dosažen stanovený limit pokusů, dojde k zastavení procesu učení a výsledkem je parametr „accuracy“, což je maximální dosažená úspěšnost predikce a samozřejmě naučený model, který lze používat k predikci nových neznámých dat. Vlastní predikce již není výpočetně ani časově náročná.



Obrázek 5: Grafické znázornění topologie použité sítě

Poté následuje proces ověření, což znamená otestovat naučený model na nových (pro UI neznámých) datech a ověřit si skutečnou přesnost predikce. K tomuto účelu je vhodná tzv. klasifikační matice (confusion matrix), jež nám ukazuje nejen dosaženou přesnost predikce, ale i které třídy jsou při predikci navzájem zaměňovány. Například pokud by se jednalo o rozpoznávání textu, pak by zřejmě docházelo k záměně znaků „O“ a „0“.

Vyhodnocení

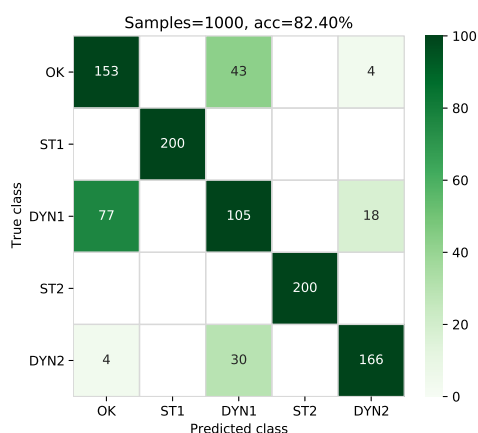
Z dříve provedených metod klasifikace [1][2] byly výsledky následující. Pokud do systému vstupovala všechna data, tzn. osy X a Y z míst 1 i 2, byla úspěšnost klasifikace 100 %, a pokud do systému vstupovala data pouze z pozice 1, dosahovala klasifikace úspěšnosti 91 %; při datech z pozice 2 to bylo 100 % (nově provedený výpočet).

Podobná úspěšnost byla očekávána i při metodě Deep Learning. Konkrétní výsledky jsou v tab. 1 a na obr. 6 a 7 jsou klasifikační matice, a to pro data pouze z pozice P2 (obr. 6) a pouze z pozice P1 (obr. 7); pro obě pozice by vypadala stejně jako P2, tzn. 100% úspěšnost. Klasifikační matice zobrazuje nejen celkovou míru úspěšnosti klasifikace (predikce), ale co je důležité, umožňuje lokalizovat, které třídy umělá inteligence zaměňuje mezi sebou. Na ose Y s názvem „True class“ jsou

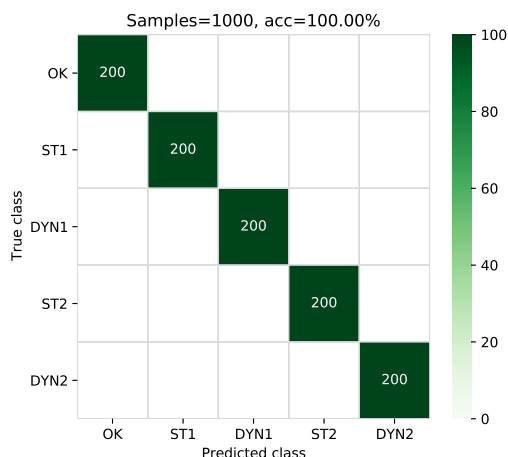
skutečně předkládány třídy a na ose X s názvem „Predicted class“ jsou výsledky predikce; v ideálním případě by měly být hodnoty pouze na diagonále, jak je tomu u pozice P2 (obr. 7), avšak u P1 na obr. 6 je patrné, kolikrát a které třídy (v tomto případě poruchy) byly zaměňovány, tzn. hodnoty mimo diagonálu jsou špatně predikovány.

Tabulka 1: Porovnání úspěšnosti klasifikace

Vstupní data (M – místa)	Deep Learning	Metody z [1][2]
P1 a P2	100 %	100 %
P1	82 %	91 %
P2	100 %	100 %



Obrázek 6: Výsledná klasifikační matice pro experiment 1 – pozici 1 („samples“ je počet vzorků použitých pro ověření, „acc“ je celková úspěšnost klasifikace)



Obrázek 7: Výsledná klasifikační matice pro experiment 1 – pozici 2 („samples“ je počet vzorků použitých pro ověření, „acc“ je celková úspěšnost klasifikace)

Závěr

Tento příspěvek měl za cíl představit metodu Deep Learning s konkrétním použitím v technické diagnostice při úkolu rozpoznat stavy stroje na základě grafických dat a zároveň sloužil jako porovnání metody s dříve testovanou metodou klasifikace u známého datasetu.

Výsledná úspěšnost v tabulce 1 a na obr. 6 a 7 je vysoká a potvrdila schopnosti této metody pro řešení zadaného úkolu; bude tedy dále testována v úkolech rozpoznávání stavu stroje v praxi. Nutno však podotknout, že testovací data byla pořízena v laboratoři a mají charakter ideálních průběhů; takto ideální hodnoty nelze očekávat u měření v praxi, kde hlavním nedostatkem je malé množství dat obsahujících záznamy při poruše, protože cílem je samozřejmě mít poruch co nejméně.

Výhodou metody Deep Learning a využití konvolučních neuronových sítí je nejen schopnost učit se, ale také extrahovat prediktory a poté provést klasifikaci, to znamená, že je lze využít i v situacích, kde nejsou známy expertní podrobnosti problematiky. Tato skutečnost však může být problematická v situaci, kdy není známo, co je hlavním ukazatelem (prediktorem) klasifikační třídy (stavu stroje), a tudíž není jasné, jak případnou nízkou úspěšnost vylepšit (není známo, co ji způsobuje). U metod popsaných dříve [1][2] a vycházejících z tradičních klasifikátorů je sice nutná určitá znalost problematiky a také i složitější předzpracování dat při tvorbě prediktoru, nicméně je jasné, co jsou důležité ukazatele; dle potřeb lze pak přidávat další, které více vystihují daný stav (poruchu).

Další možností je metody kombinovat, tzn. předzpracovávat vstupní data (například FFT) a předkládat data i s dalšími ukazateli stavu stroje, což by mohlo dále zvyšovat míru úspěšnosti klasifikace u problémů, které v počáteční fázi nevykazují dobré výsledky.

Poděkování

Publikované výsledky byly dosaženy s podporou projektu TAČR č. FW01010485 – Automatické kontroly vyhrazených technologických zařízení s využitím strojového učení.

Použitá literatura

- [1.] ZUTH, D.; MARADA, T. Utilization of Machine Learning in Vibrodiagnostics. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, č. 2017, s. 271-278. ISSN 2194-5357.
- [2.] ZUTH, D. Ukázka využití strojového učení ve vibrodiagnostice. *Řízení & údržba průmyslového podniku*, 2018, č. 4, s. 14-16. ISSN 1803-4535.
- [3.] Keras: the Python deep learning API. Keras: the Python deep learning API [online]. [cit. 17. 05. 2021]. Dostupné z: <https://keras.io/>
- [4.] TensorFlow. TensorFlow [online]. [cit. 17. 05. 2021]. Dostupné z: <https://www.tensorflow.org/>
- [5.] Welcome to Python.org. Welcome to Python.org [online]. Copyright © 2001 [cit. 17. 05. 2021]. Dostupné z: <https://www.python.org/>

Recenzent:

Ing. Blata Jan, Ph.D., VŠB-Technická univerzita Ostrava; osoba certifikovaná na funkci Specialista vibrační diagnostiky – Kategorie II

ELEKTRONIKA A TECHNIKA NA JEDNOM MÍSTĚ

EATON
Powering Business Worldwide



669,-

Eaton M22-PVL30 nouzový vypínač

- vestavné provedení
- krytí IP65, IP66, IP69
- možnost podsvícení

Obj. č.: 2335773

Schneider
Electric



2.802,-

Schneider Electric LC1D18BD, 3fázový stykač

- 1x NO, 1x NC kontakt
- montáž na DIN lištu
- spínací napětí min. 17 V, AC/DC

Obj. č.: 1667517

WERMA

7.017,-

Werma Signaltechnik SignalSet CO2, 649.000.10

- zobrazení koncentrace CO2 pomocí semaforu
- provozní napětí 230V/AC
- rozměry (Ø x v) 70 x 287 mm

Obj. č.: 2338536



3.132,-

Pepperl+Fuchs reflexní světelná závora RLK29-55/25/116-SET

- provozní napětí 24 - 240 V, AC/DC
- max. dosah 12 m
- spíná i za výrazného světla, polarizační filtr
- vlnová délka 640 nm

Obj. č.: 501950



Ceny jsou uvedeny bez DPH a zaokrouhlené na KČ. Právo na chyby vyhrazeno. Kompletní nabídku naleznete na www.conrad.cz.

CONRAD

PROCUREMENT. SIMPLE. FAST. COMPREHENSIVE.



+420 226 224 254
v pracovní dny 8 - 16 hodin



velkoobchod@conrad.cz



www.conrad.cz



KOMPLETNÍ ŘADA MOTORŮ DO VÝBUŠNÝCH ATMOSFÉR

SIMOTICS XP

univerzální Ex řešení

- certifikované motory pro veškeré typy výbušných atmosfér;
- optimalizovaná platforma totožná s nevýbušnými motory – snížení TCO;
- v provedení se sníženým startovacím proudem (600%, 700%);
- certifikované použití s napěťovými měniči frekvence všech výrobců;
- snadná a rychlá konfigurace s možností přímého objednání v nástroji DT-C;
- nátěrový systém od C2 po CX s kompletním barevným řešením;
- IECEx, EACEx, CCC Ex, VIK, IOGP a další.

Druh atmosféry	Plyn			Prach		
Ex Zóna	1			2	21	22
Třída ochrany	Ex db/eb IIB	Ex db/eb IIC	Ex eb	Ex ec	Ex tb	Ex tc
Osová výška	71 - 355	71 - 355	63 - 315	63 - 450		
Výkon	0,25 - 460 kW	0,25 - 460 kW	0,12 - 165 kW	0,09 - 1000 kW		
Napětí	230 až 690 V, 50/60 Hz					
Počet pólů	2 - 8	2 - 8	2 - 6	2 - 8		
Třída účinnosti	IE3			až IE3, IE4 (1MB5 315-450)		
Krytí	IP55 až IP66					

Zjednodušte si práci. SIMOTICS XP předčí Vaše očekávání ve všech aspektech.
Máte zájem o více informací? Napište nám na simotics.cz@siemens.com

[siemens.cz/nizkonapetove-motory](https://www.siemens.cz/nizkonapetove-motory)