

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Asociace technických diagnostiků ČR, z.s., Ostrava
pod záštitou
Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky



„DIAGO[®] 2023“

TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA STROJŮ A VÝROBNÍCH ZAŘÍZENÍ

KOLEKTIV AUTORŮ

SBORNÍK
40. MEZINÁRODNÍ VĚDECKÉ KONFERENCE



SNĚŽNÉ - MILOVY, 2023

Editor :

- **Ing. Ladislav HRABEC, Ph.D.,** VŠB - TU Ostrava, FS

Vydavatel : **VŠB - TU Ostrava**

Počet výtisků : **170 ks**

Vydáno : **leden 2023**

Tato publikace neprošla jazykovou úpravou.

Za obsah jednotlivých článků plně zodpovídají uvedení autoři.

ISBN 978-80-248-4656-9

Organizátoři konference :

- Asociace technických diagnostiků České republiky, z.s., Ostrava
- Katedra konstruování, FS, VŠB - Technická univerzita Ostrava

Záštita nad konferencí :

- Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky

Patroni konference :

- prof. RNDr. Václav Snášel, CSc. rektor VŠB-TU Ostrava
- prof. Ing. Robert Čep, Ph.D. děkan Fakulty strojní, VŠB-TU Ostrava

Hlavní partner :

-  prof. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D. - ředitel
Centrum energetických a environmentálních technologií

Odborní garanti :

- p. Ondřej Švec, DiS. TRIFOSERVIS s.r.o., Čelákovice
- doc. Ing. Lukáš Prokop, Ph.D. CEET, VŠB-TU Ostrava
- Ing. Jakub Všolák ČEZ, a.s., Elektrárna Štěchovice, Štěchovice
- prof. Ing. Milan Honner, Ph.D. Západočeská univerzita v Plzni, NTC
- Mgr. Marek Šeremeta LAMI KAPPA, spol. s r.o., Teplice

Mezinárodní programový výbor :

- Dr.h.c. prof. Ing. Juraj Sinay, DrSc. koordinátor vodík. technologií SR, Košice, SR
- prof. dr hab. inž. Zbigniew Matuszak Politechnika Morska w Szczecinie, Polsko
- prof. Dr. Ing. Pavel Němeček viceprezident ATD ČR, z.s., TU v Liberci
- doc. Ing. Jozef Žarnovský, PhD. proděkan TF, SPU v Nitre, SR
- doc. Ing. Juraj Grenčík, PhD. podpředseda SSÚ, Žilinská univerzita v Žilině, SR
- prof. Ing. Hana Pačaiová, PhD. viceprezidentka ATD SR, TU v Košiciach, SR
- Ing. Jan Hroch výkonný ředitel, ČSPÚ, z.s., Praha
- Ing. Ladislav Hrabec, Ph.D. tajemník ATD ČR, z.s., VŠB-TU Ostrava
- doc. Ing. František Helebrant, CSc. FS, VŠB-TU Ostrava

Organizační výbor :

- Ing. Ladislav Hrabec, Ph.D. tajemník ATD ČR, z.s., FS, VŠB-TU Ostrava
- Ing. Jan Blata, Ph.D. katedra 340, FS, VŠB-TU Ostrava
- Bc. Marcela Dluhošová katedra 340, FS, VŠB-TU Ostrava

Mediální partneři :



SEZNAM PŘÍSPĚVKŮ

1. František Beneš: ANALÝZA A ŘEŠENÍ MOMENTOVÉ NEVÝVAHY	6
2. Milan Honner, Lukáš Muzika, Jiří Skála: AUTOMATIZOVANÁ TERMODIAGNOSTIKA S UMĚLOU INTELIGENCÍ V PRŮMYSLVÉ VÝROBĚ.....	13
3. Piotr Cheluszka, Grzegorz Głuszek, Jaroslav Melecký: SYMULATOR OPARTY NA ROZSZERZONEJ RZECZYWISTOŚCI W DIAGNOSTYCE TECHNICZNEJ KOMBAJNÓW CHODNIKOWYCH I SZKOLENIU OPERATORÓW	14
4. Petr Chytka: DOPADY A KONSEKVENCE PŘECHODU ZE SPALOVACÍCH MOTORŮ NA ELEKTROMOBILITU Z POHLEDU MAZIV A JEJICH VÝROBY, APLIKACE, IDENTIFIKOVANÁ RIZIKA	27
5. Ondřej Janík, Jan Zatloukal: NOVÉ TRENDY: STROJOVÉ UČENÍ A BEZROZVÁDĚČOVÁ ONLINE VIBRODIAGNOSTIKA.....	37
6. Tomasz Kądziołka, Józef Janczura, Patryk Pietryga: THE EFFECT OF DIAGNOSTIC TESTING OF THE STEERING SYSTEM ON ROAD SAFETY	38
7. Tomasz Kądziołka, Sławomir Kowalski, Tomasz Mońko: PIPE ORGAN DIAGNOSTICS	45
8. Jiří Klapka: "SCHVÁLENÁ / APPROVAL" MAZIVA - SYSTÉMY A PROCESY	52
9. Ján Kosiba, Martin Paumer, Zdenko Tkáč: VYHODNOTENIE TECHNICKÝCH KONTROL ZÁŽIHOVÝCH SPALOVACÍCH MOTOROV	56
10. Lubomír Lazar: SPECIFIKA VYVAŽOVÁNÍ HYDROALTERNÁTORŮ	61
11. Zbigniew Matuszak: WYBRANE METODY OGRANICZANIA EMISJI SZKODLIWYCH SKŁADNIKÓW SPALIN Z SILNIKÓW OKRĘTOWYCH.....	69
12. Stanislav Mišák, Lukáš Prokop: ŘÍZENÍ A SPRÁVA TESTOVACÍHO POLYGONU PRO CÍRKULÁRNÍ EKONOMIKU.....	76
13. Petr Nahodil, Jan Pokorný, Miloš Hammer: DIAGNOSTIKA POHONŮ S FREKVENČNÍM MĚNIČEM V PRAXI.....	78
14. Hana Pačaiová, Ivan Habala, Lukáš Duriš, Tomáš Gazda, Peter Darvaši, Ferdinand Kóča: MANAŽÉRSTVO RIZÍK A BEZPEČNOST STROJOV V KONTEXTE DIGITALIZÁCIE	85
15. Roman Pašek, Vít Horáček, Filip Schmidt, Luboš Smolík: DYNAMICKÉ ZKOUŠKY ZATĚŽOVACÍ ZÁKLADŮ VELKÝCH TURBOSOUSTROJÍ - SOUČASNÁ PRAXE A PERSPEKTIVNÍ METODY	93
16. Bohuslav Peterka, Josef Pošta: PŘEDEPÍNANÉ ŠROUBOVÉ SPOJE A MOŽNOST JEJICH PREDIKTIVNÍ ÚDRŽBY	94

17. Lukáš Prokop, Ondřej Kabot, Jan Fulneček, Stanislav Mišák: STANOVIŠTĚ PRO ANALÝZU ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ V PODMÍNKÁCH SPECIFICKÝCH PRO LETECKÉ SYSTÉMY	102
18. Pavel Růžička, Ladislav Hrabec: PLASTICKÁ MAZIVA PRO LOŽISKA ELEKTROPOHONŮ HYBRIDNÍCH VOZIDEL A ELEKTROMOBILŮ	104
19. Luboš Smolík, Václav Houdek, Zdeněk Kubín: LOKALIZACE RÁZOVÉHO BUZENÍ V TECHNOLOGICKÉM CELKU S VYUŽITÍM VLNKOVÉ TRANSFORMACE	108
20. Václav Straka, Jiří Svoboda, David Kuboš, Pavel Petráň, Pavel Zítek, Mikoláš Choura: LIMITY KVANTITATIVNÍ TERMOGRAFIE ZÁVISLÉ NA VLASTNOSTECH POUŽITÝCH KAMER	119
21. Václav Straka, Jiří Svoboda, David Kuboš, Pavel Petráň, Pavel Zítek, Mikoláš Choura: PROBLEMATIKA MIKROSKOPICKÉ TERMOGRAFIE	130
22. Václav Straka, Pavel Zítek, Antonín Krňoul: DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTOROVÝCH PRŮCHODEK POMOCÍ NAPĚTÍ O SNÍŽENÉ FREKVENCI.....	147
23. Štěpán Svoboda: KVALITNÍ DIAGNOSTIKA JE ÚSPĚŠNÁ CESTA KE SNÍŽENÍ NÁKLADŮ ZA DRAHÉ ENERGIE	159
24. Marek Šeremeta: NORMATIVNÍ ÚPRAVA USTAVOVÁNÍ ROTAČNÍCH STROJŮ NA OBZORU?.....	167
25. Michal Švantner, Milan Honner: TERMOGRAFIE V DIAGNOSTICE A ÚDRŽBĚ ZAŘÍZENÍ V ENERGETICKÉM PRŮMYSLU	172
26. Elias Tomeh: ZDROJE VIBRACÍ PŘEVODOVKY LYŽAŘSKÉHO VLEKU	173
27. Zoltán Záležák, Rastislav Bernát, Norbert Kecskés, Jozef Žarnovský, Roman Gálik: OPOTREBOVANIE FUNKČNÝCH ČASTÍ VSTREKOVACIEHO SYSTÉMU NAFTOVÉHO MOTORA.....	181
28. Daniel Zuth: SHLUKOVÁ ANALÝZA VIBRODIAGNOSTICKÉHO SIGNÁLU	188
29. Jozef Žarnovský, Rastislav Mikuš, Ivan Kováč, Jozef Dobránský, Rastislav Bernát, Zoltán Záležák, Michal Weis: ANALÝZA VENTILÁTOROVEJ TECHNIKY POMOCOUB VIBRODIAGNOSTIKY.....	196

ANALÝZA A ŘEŠENÍ MOMENTOVÉ NEVÝVAHY

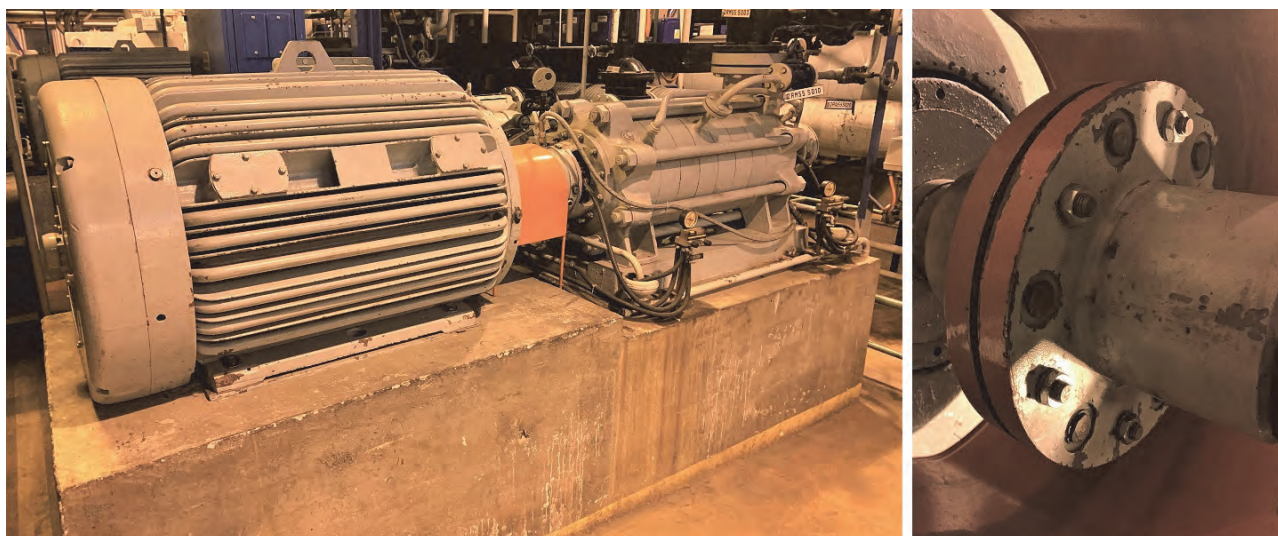
František BENEŠ, ČEZ, a.s., JE Temelín ¹

Anotace:

Příspěvek se věnuje analýze a řešení momentové nevývahy (nesymetrický záběr čepové spojky) s tím, že měření byla prováděna na vibrostandu.

1. Popis typického problému s čepovou spojkou

Typicky se jedná o horizontální odstředivé čerpadlo, které je osazeno čepovou spojkou pro přenos kroutícího momentu.



2. Momentová nevývaha, diagnostika

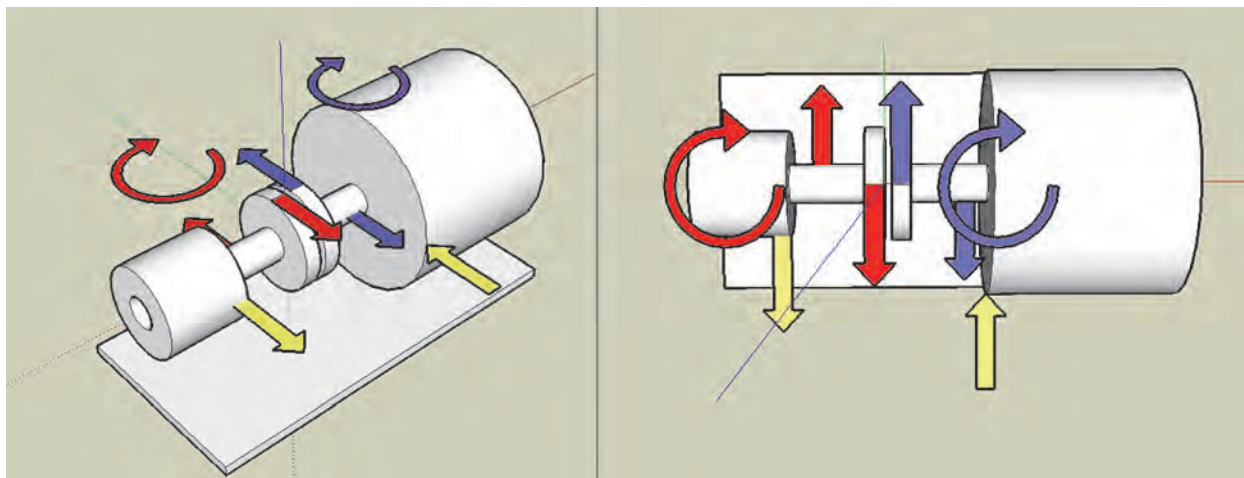
U čepových spojek může dojít k tomu, že jeden z čepů se na přenosu kroutícího momentu podílí dominantně. Osa kroutícího momentu (střed polohy mezi dvojicí sil) pak není shodná s osou hřídele. Dochází ke generování bočních sil, které způsobují vibrace stroje na otáčkové frekvenci.

¹ Ing. František Beneš
ČEZ, a.s.

Jaderná elektrárna Temelín, 373 05 Temelín
tel.: +420 381 102 705, mobil: +420 602 271 753, e-mail: frantisek.benes01@cez.cz

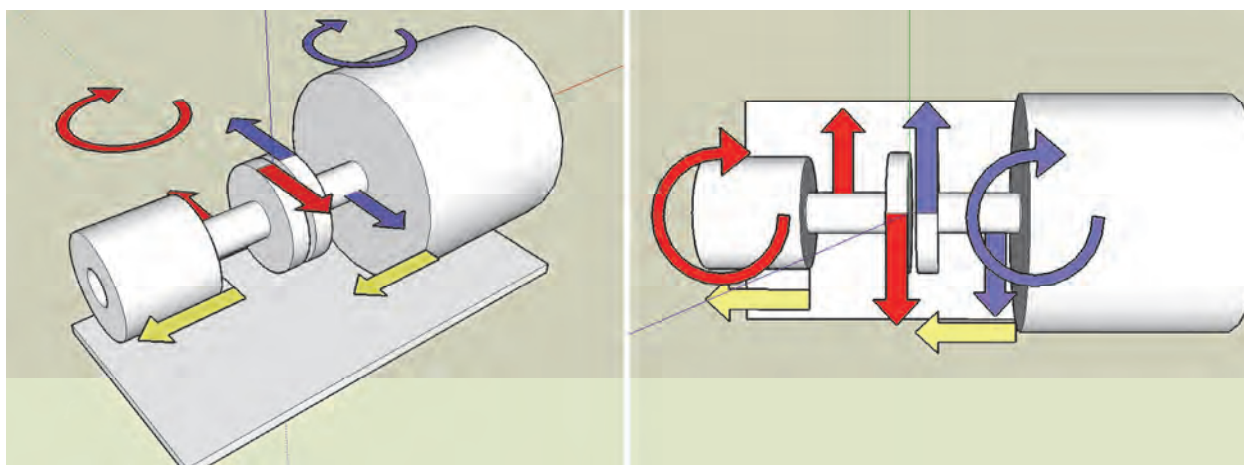
Síly vyvolané momentovou nevyvážeností (čepové) spojky.

V radiálním směru:



Kroutící moment vytváří radiální síly, pohybují motorem a čerpadlem v opačné fázi.

V axiálním směru:

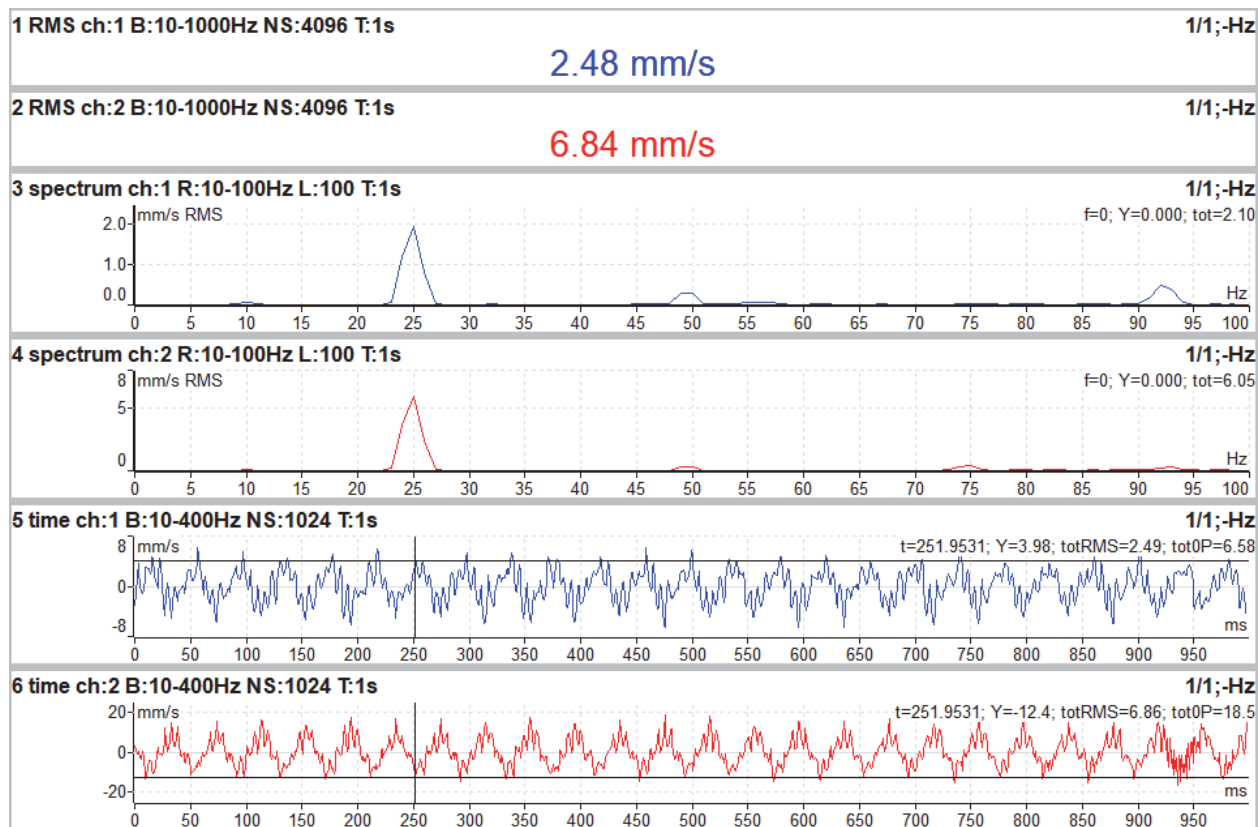


Kroutící moment vytváří axiální síly, pohybují motorem a čerpadlem ve shodné fázi.
Tyto skutečnosti jsou hlavním vodítkem při diagnostice závady:

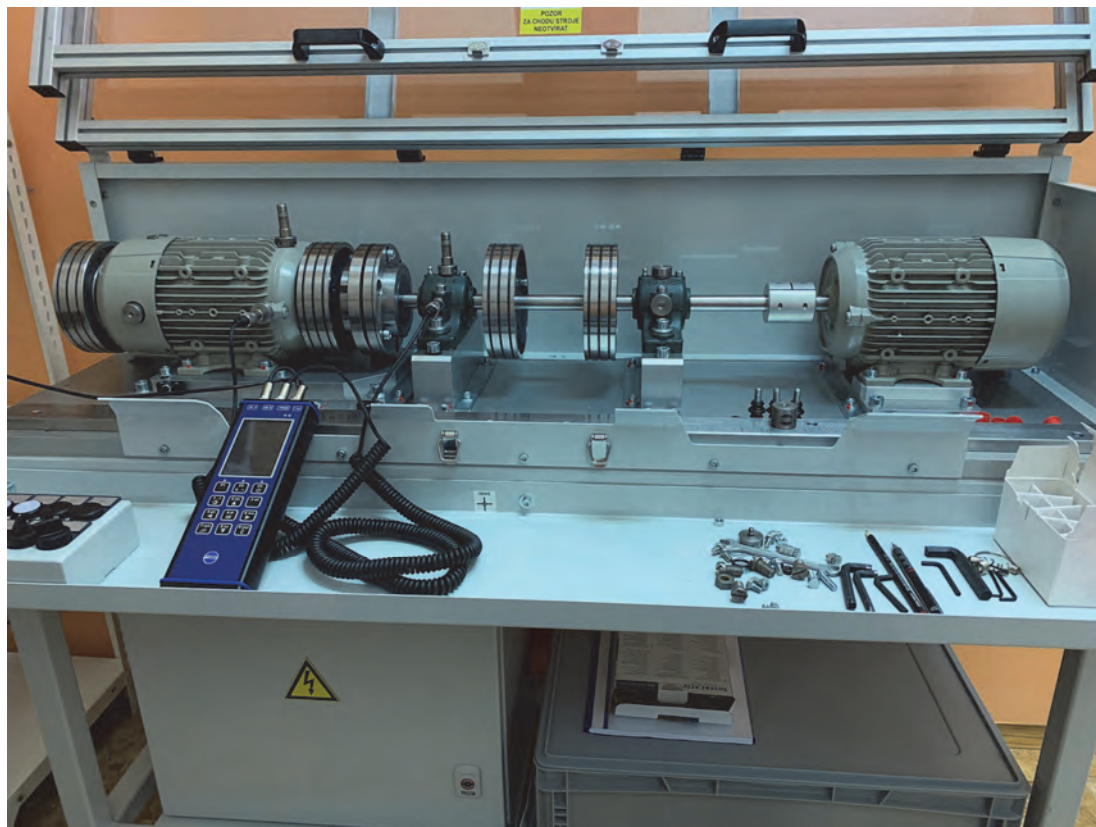
Při **vyhovující souososti stroje** jsou hodnoty rychlosti vibrací vysoké.

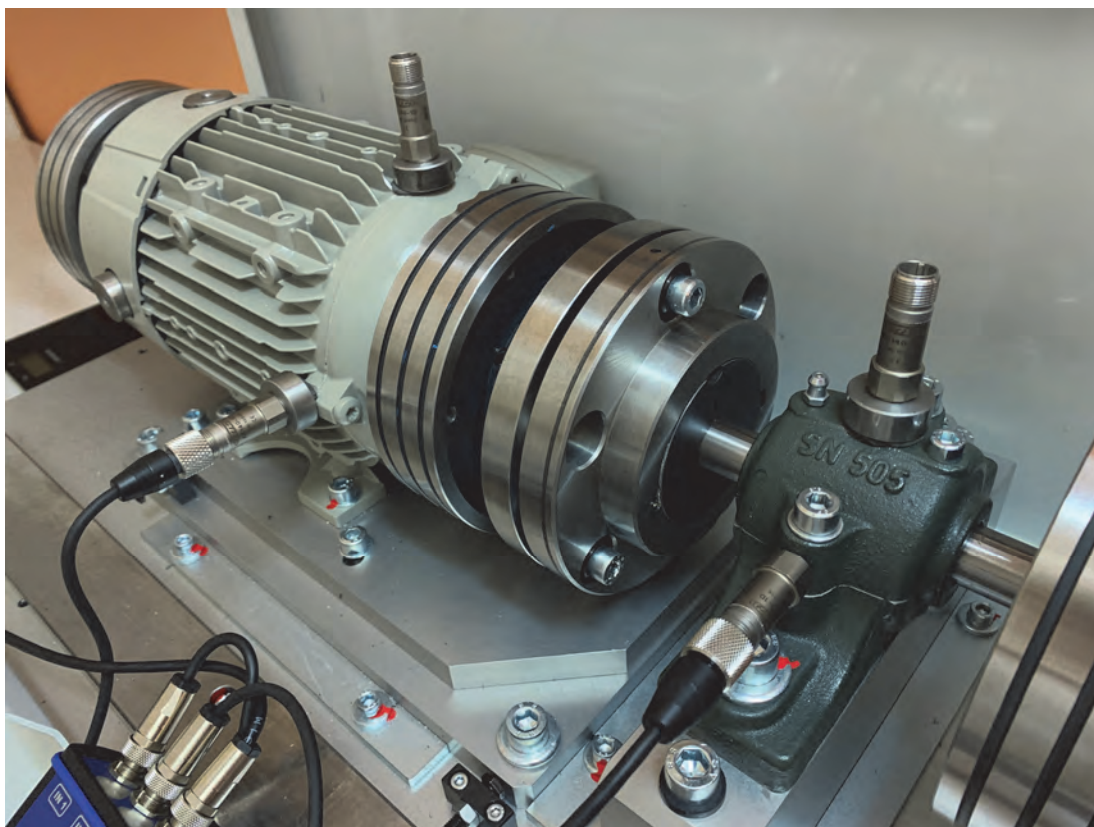
Dominantní frekvence vibrací je na otáčkové frekvenci u motoru i čerpadla.

Vibrace v místě ložisek, které přiléhají ke spojce, mají radiálně v horizontální rovině opačnou fázi, a naopak axiálně shodnou fázi.

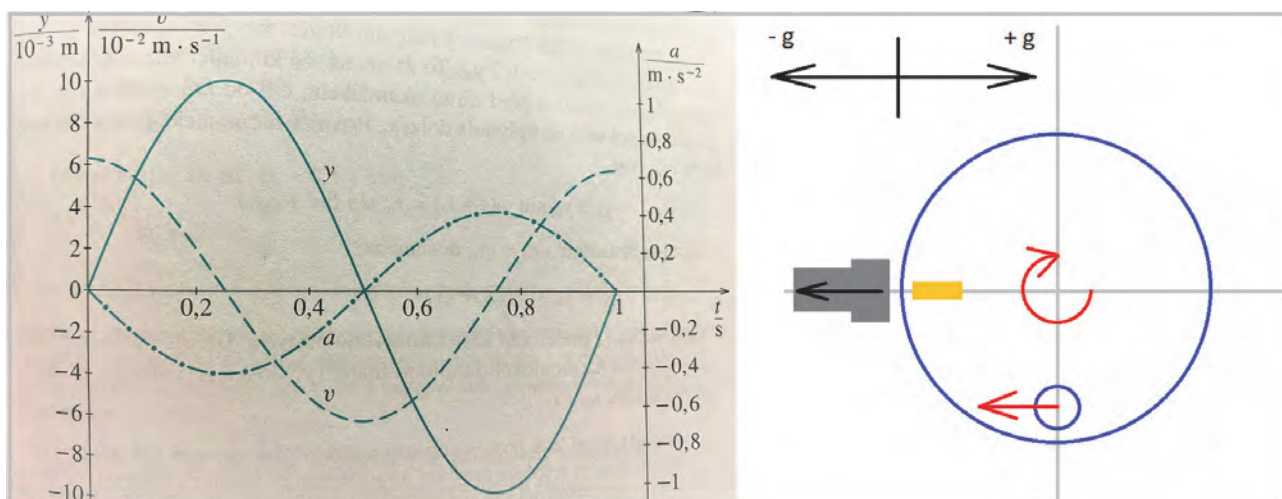


3. Řešení momentové nevývahy na vibrostandu





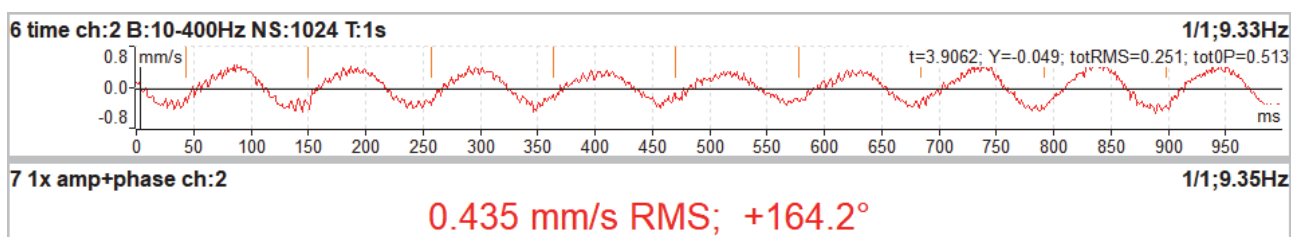
Přímé řešení podle fáze momentové nevývahy:



Výchozí informace a podmínky:

- Znalost orientace signálu snímače.
- Signál otáčkové značky musí přijít v okamžiku, kdy značka mívá snímač.
- Poloha čepu v záběru je posunutá za maximem posouvající síly o -90° .

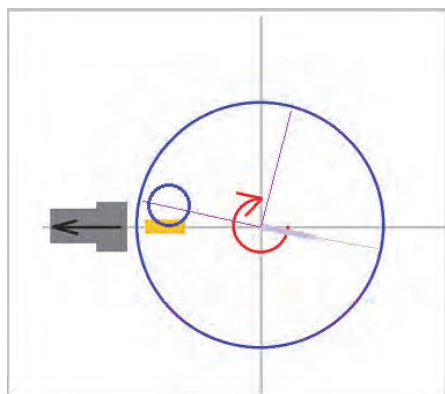
Záznam signálu snímače:



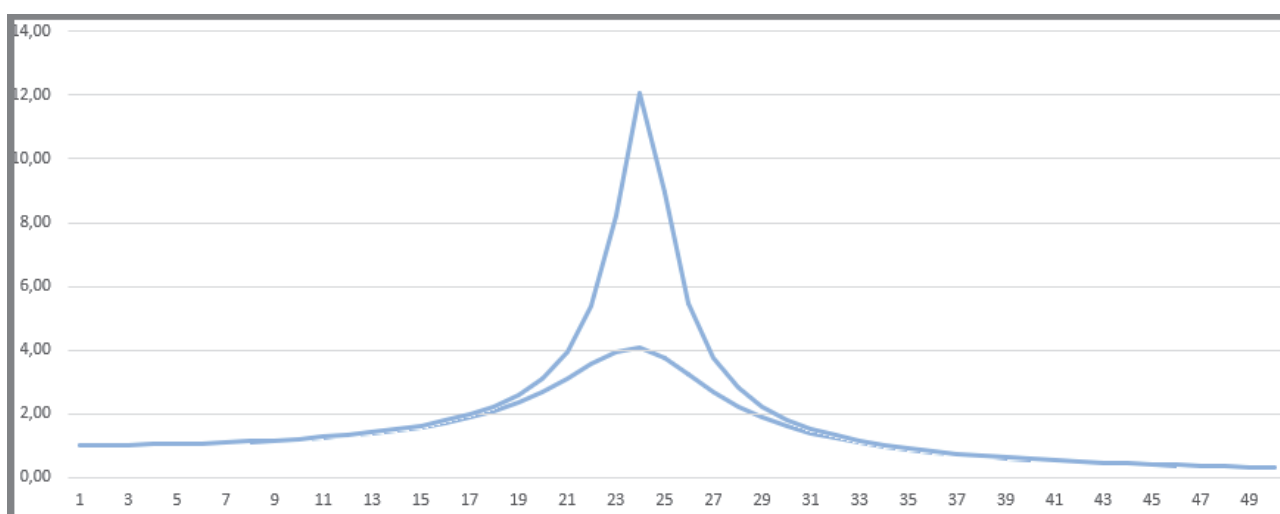
Měření ukazuje, že fázová značka je 164° před maximální hodnotou rychlosti.

Vektor maximální výchylky (= posouvající síly) v záporném směru je 90° před vektorem rychlosti. Tím je dána poloha zabírajícího čepu.

Od skutečné polohy se liší o přibližně 15° , což může být v praxi akceptovatelná odchylka.



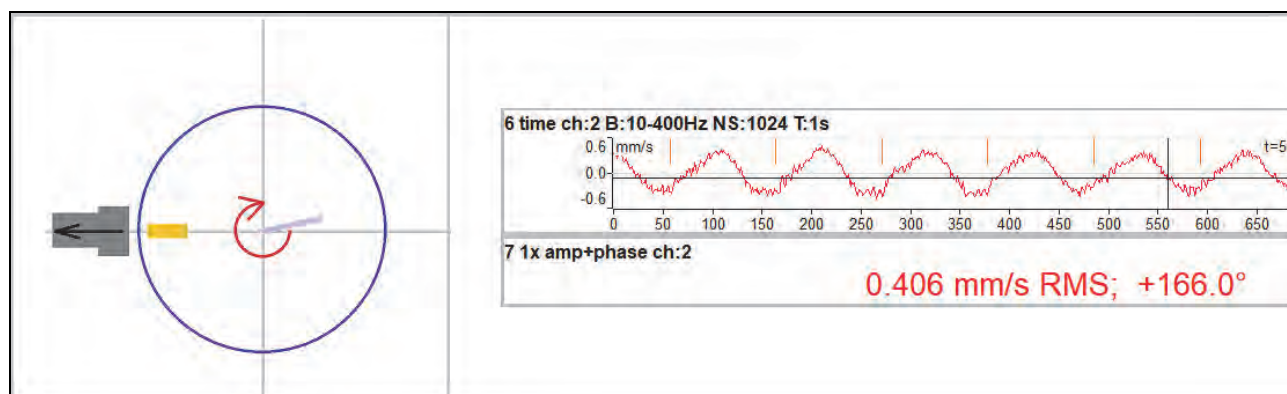
Ve skutečnosti může být tato metoda nepoužitelná, reálné zařízení může mít větší sklon k rezoncím některých částí, nesymetrii v tuhosti apod.



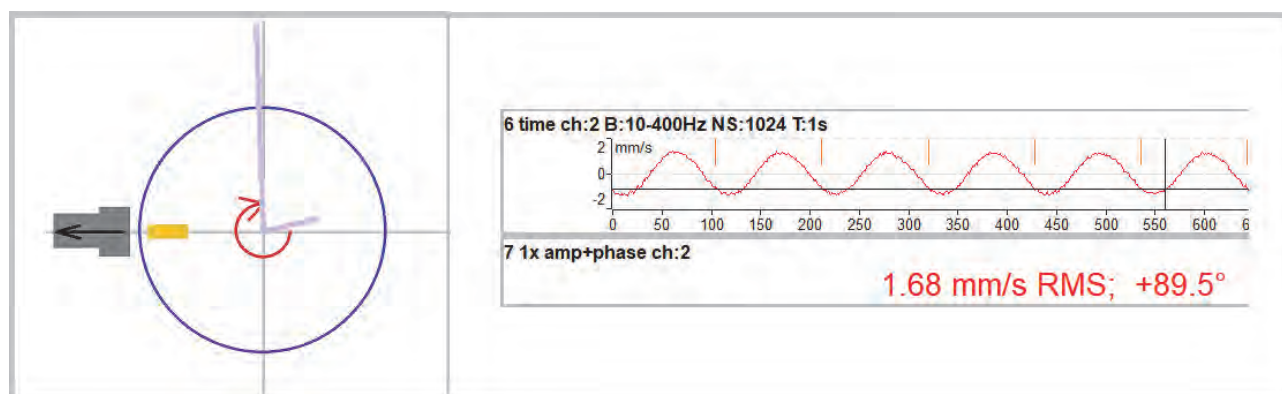
Nepřímé řešení umístěním závaží

Hledání zabírajícího čepu jako řešení vyvažování v jedné rovině.

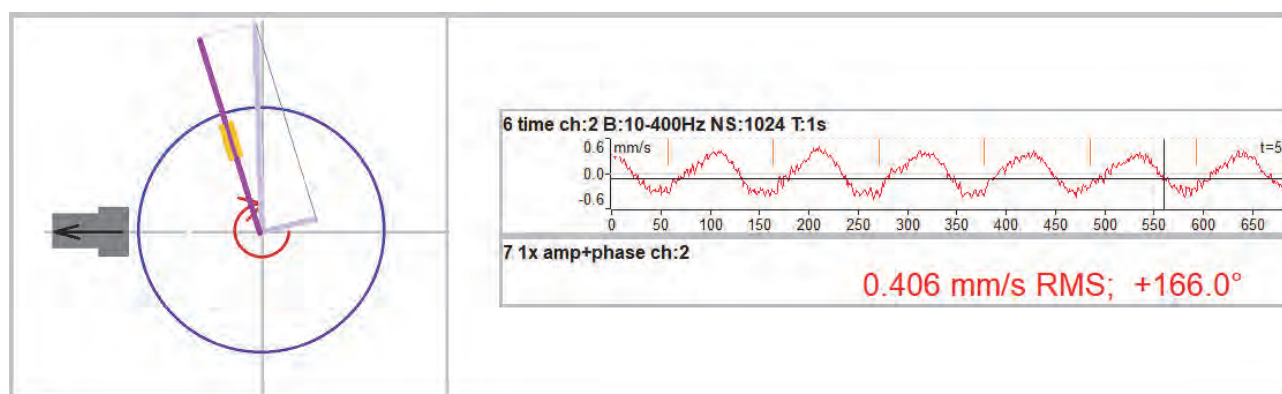
Výchozí běh stroje:



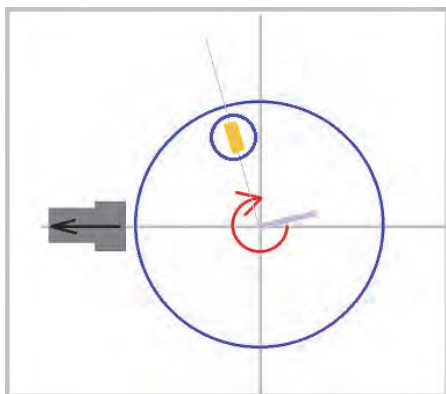
Zkušební závaží:



Zorientování vektorů podle polohy zkušebního závaží (vektoru změny):



Určení polohy zabírajícího čepu:



Tímto postupem je možné přesně určit polohu čepu, který je dominantní v přenosu kroutícího momentu.

Pro vyloučení vlivu rezonančních jevů je možné provést ještě jeden chod se závažím umístěným do jiného místa, nebo se závažím jiné hmotnosti.

Pokud je výsledek stejný, je jisté, že měření je věrohodné.

AUTOMATIZOVANÁ TERMODIAGNOSTIKA S UMĚLOU INTELIGENCÍ V PRŮMYSLVÉ VÝROBĚ

AUTOMATED THERMODIAGNOSTICS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN INDUSTRIAL PRODUCTION

Milan HONNER, Západočeská univerzita v Plzni, NTC ¹

Lukáš MUZIKA, Západočeská univerzita v Plzni, NTC ²

Jiří SKÁLA, Západočeská univerzita v Plzni, NTC ³

Anotace:

Příspěvek uvádí příklad využití termodiagnostiky s umělou inteligencí pro kontrolu bodových svarů v průmyslové výrobě. Metoda je založena na laserovém ohřevu a termografickém měření povrchu svaru. Kvalita svaru je pak posuzována algoritmem vyhodnocení, který využívá umělou inteligenci a diagnostikuje tepelný proces spojený s odvodem tepla svarem. Vyvinuté řešení umožňuje automatizovanou inspekci tvarově komplexních dílů se svary.

Annotation:

The contribution presents an example of the use of thermodiagnosics with artificial intelligence for the inspection of spot welds in industrial production. The method is based on laser heating and thermographic measurement of the weld surface. The quality of the weld is then assessed by an evaluation algorithm that uses artificial intelligence and diagnoses the thermal process associated with heat removal by the weld. The developed solution enables fully automated inspection of shape-complex parts with welds.

¹ prof. Ing. Milan Honner, Ph.D.

Západočeská univerzita v Plzni, Nové technologie - výzkumné centrum
Univerzitní 8, 301 00 Plzeň

tel.: +420 377 634 720, mobil: +420 606 522 406, e-mail: honner@ntc.zcu.cz, <https://irt.zcu.cz/cs/>

² Ing. Lukáš Muzika, Ph.D.

tel.: +420 377 634 822, e-mail: muzika@ntc.zcu.cz

³ Ing. Jiří Skála, Ph.D.

tel.: +420 377 634 804, e-mail: jskala@ntc.zcu.cz

SYMULATOR OPARTY NA ROZSZERZONEJ RZECZYWISTOŚCI W DIAGNOSTYCE TECHNICZNEJ KOMBAJNÓW CHODNIKOWYCH I SZKOLENIU OPERATORÓW

Piotr CHELUSZKA, Politechnika Śląska ¹

Grzegorz GŁUSZEK, Politechnika Śląska ²

Jaroslav MELECKÝ, VŠB - Technická univerzita Ostrava, FS ³

Streszczenie:

Symulatory zaliczają się do systemów informatycznych, szeroko stosowanych do szkolenia operatorów oraz pracowników służb serwisowych w przemyśle, transporcie, wojskowości, astronautyce czy medycynie (trenażery). W referacie przedstawiony zostanie autorski symulator wysięgnikowego kombajnu chodnikowego. Kombajny chodnikowe wykorzystywane są powszechnie do drażenia wyrobisk korytarzowych w kopalniach podziemnych, tuneli komunikacyjnych i innych obiektów architektonicznych wykonywanych technikami bezwypukowymi. Maszyny te do tej pory sterowane są ręcznie, co sprawia że sposób ich pracy oparty jest w dużej mierze na doświadczeniu i intuicji operatorów, na podstawie subiektywnej oceny. W celu zapewnienia wysokiej efektywności procesu drażenia wyrobisk i tuneli istnieje więc potrzeba ciągłego szkolenia operatorów kombajnów, w trakcie symulowanego ich działania w różnych warunkach środowiskowych. Z drugiej strony, rozwój konstrukcji tych maszyn, zwłaszcza w sferze ich automatyzacji i robotyzacji wymaga prowadzenia badań symulacyjnych z wykorzystaniem wirtualnych narzędzi opartych na adekwatnych modelach matematycznych. Wykorzystanie wirtualnej (VR) i rozszerzonej rzeczywistości (AR) w badaniach umożliwia między innymi testowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych, oraz algorytmów automatycznego sterowania, a także wirtualną diagnostykę stanu obciążenia maszyny oraz parametrów jej pracy. Możliwości takie daje prezentowany w referacie symulator kombajnu chodnikowego.

1. Wprowadzenie

Symulatory zaliczają się do systemów informatycznych, szeroko stosowanych do szkolenia operatorów oraz pracowników służb serwisowych w przemyśle, transporcie, wojskowości, astronautyce czy medycynie. Działają one w oparciu o wirtualną rzeczywistość (VR), lub rozszerzoną rzeczywistość (AR), w której rzeczywiste stanowisko operatorskie współpracuje z wirtualną sceną generowaną komputerowo, gdzie odwzorowywane jest działanie symulowanej maszyny lub realizowanego przebiegu procesu. Ćwiczenia w symulatorach są istotnym elementem doskonalenia zawodowego osób zajmujących się obsługą maszyn, pojazdów cywilnych i militarnych, czy robotów

¹ dr hab. inż. Piotr Cheluszka, prof. PŚ

Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej

Katedra Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa

ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska

tel.: +48 32 237 22 56, fax: +48 32 237 15 95, e-mail: piotr.cheluszka@polsl.pl

² Mgr inż. Grzegorz Głuszek

tel.: +48 32 237 14 44, fax: +48 32 237 15 95, e-mail: grzegorz.gluszek@polsl.pl

³ Dr. Ing. Jaroslav Melecký

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní

17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava - Poruba

tel.: +420 597 324 444, e-mail: jaroslav.melecky@vsb.cz

i manipulatorów przeznaczonych do wykonywania precyzyjnych lub niebezpiecznych czynności z udziałem człowieka (teleoperatorów) - rys.1. Maszyny te cechują się zazwyczaj dużym stopniem skomplikowania, wysokim kosztem zakupu, czy też ich użytkowanie wiąże się z zagrożeniem bezpieczeństwa (np. samoloty, statki czy maszyny górnicze pracujące w warunkach występowania zagrożenia wybuchem metanu, czy pyłu węglowego). Symulatory stosowane są od wielu lat w gałęziach przemysłu przodujących w rozwoju, gdzie operatorzy maszyn muszą cechować się najwyższymi kwalifikacjami i dużym doświadczeniem. Symulatory mają jednak również inne zastosowania. Wykorzystywane są one bowiem w badaniach naukowych - jako wsparcie w procesie wnioskowania, oraz diagnostyce - do symulowania różnych stanów pracy maszyn. Są one więc pomocne w analizie np. przyczyn awarii oraz innych zdarzeń z ich udziałem, w tym wypadków.

a)



b)



c)



d)



Rys.1 Przykłady symulatorów treningowych: a) samolotu Embraer EMB-145 LR [13],
b) strzelań dla czołgu PT-91/T-72M1 [14], c) samochodu rajdowego na VŠB-TUO,
d) suwnicy kontenerowej [15]

Symulatory maszyn roboczych, choć w ograniczonym zakresie, stosowane są również w procesie szkolenia załóg kopalń m.in. w zakresie obsługi i sterowania maszyn

górnictwych (trenażery) - rys.2. Wysięgnikowe kombajny chodnikowe szeroko stosowane między innymi do drążenia wyrobisk korytarzowych w górnictwie podziemnym, mimo rozwoju technologicznego do tej pory sterowane są ręcznie. To sprawia, że ich praca oparta jest w dużej mierze na doświadczeniu i intuicji operatorów, na podstawie subiektywnej oceny bieżącej sytuacji panującej w przodku. Dotyczy to zwłaszcza urabiania skał w obrębie czoła przodku - podstawowego procesu roboczego realizowanego przez te maszyny. Dobór technologii i parametrów procesu urabiania skał ma kolosalny wpływ na uzyskiwaną wydajność urabiania (postęp drążenia), obciążenie dynamiczne kombajnu, czy energochłonność [1]. W przypadku sterowania ręcznego trudno jest zatem mówić o optymalizacji tego procesu, jednak dobre wyszkolenie operatorów kombajnów do pracy w różnych warunkach geologiczno-górnictwych może zapewnić osiąganie zadowalających efektów drążenia wyrobisk korytarzowych, lub tuneli techniką kombajnową.

a)



b)



c)



d)



Rys.2 Przykłady symulatorów wykorzystywanych do szkolenia pracowników serwisu i operatorów maszyn górniczych: a) sala SIGMA (symulator VR do szkolenia pracowników serwisu) w siedzibie firmy FAMUR S.A. [16], b) symulator wiertnicy powierzchniowej [17], c) symulator oponowego wozu odstawczego [17]

Pomimo stosunkowo prostej obsługi tych maszyn, wyszkolenie operatora o odpowiednich umiejętnościach nie jest zadaniem łatwym. Wynika to między innymi ze zróżnicowanych i zmiennych warunków geologiczno-górnictwych, w których drążone są wyrobiska korytarzowe i tunele. Proces kształcenia operatorów w warunkach rzeczywistych wymaga dostępu do kosztownych maszyn, oraz udostępnienia przodku wyrobiska w trakcie drążenia (warunki dołowe) lub sztucznego masywu skalnego (warunki

laboratoryjne). Ze względu na ograniczenia możliwości wykorzystania rzeczywistych maszyn w procesie szkolenia operatorów, powinien być on prowadzony przy użyciu symulatorów, podobnie jak to ma miejsce na przykład w przypadku szkolenia pilotów samolotów.

Z drugiej strony, rozwój konstrukcji kombajnów chodnikowych, zwłaszcza w sferze ich automatyzacji i robotyzacji wymaga prowadzenia w szerokim zakresie badań symulacyjnych z wykorzystaniem narzędzi opartych na adekwatnych modelach matematycznych [2], [3]. Wykorzystanie wirtualnej i rozszerzonej rzeczywistości w pracach badawczo-rozwojowych umożliwia między innymi testowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych, oraz algorytmów sterowania. Kombajn chodnikowy ma docelowo stać się autonomicznym, bezzałogowym robotem górniczym, a to wymaga prowadzenia obszernych badań symulacyjnych w tym obszarze [8], [10], [11]. Symulatory są również pomocne w diagnostyce stanu obciążenia maszyn pracujących w zadanych warunkach oraz efektywności realizowanego przebiegu procesu roboczego.

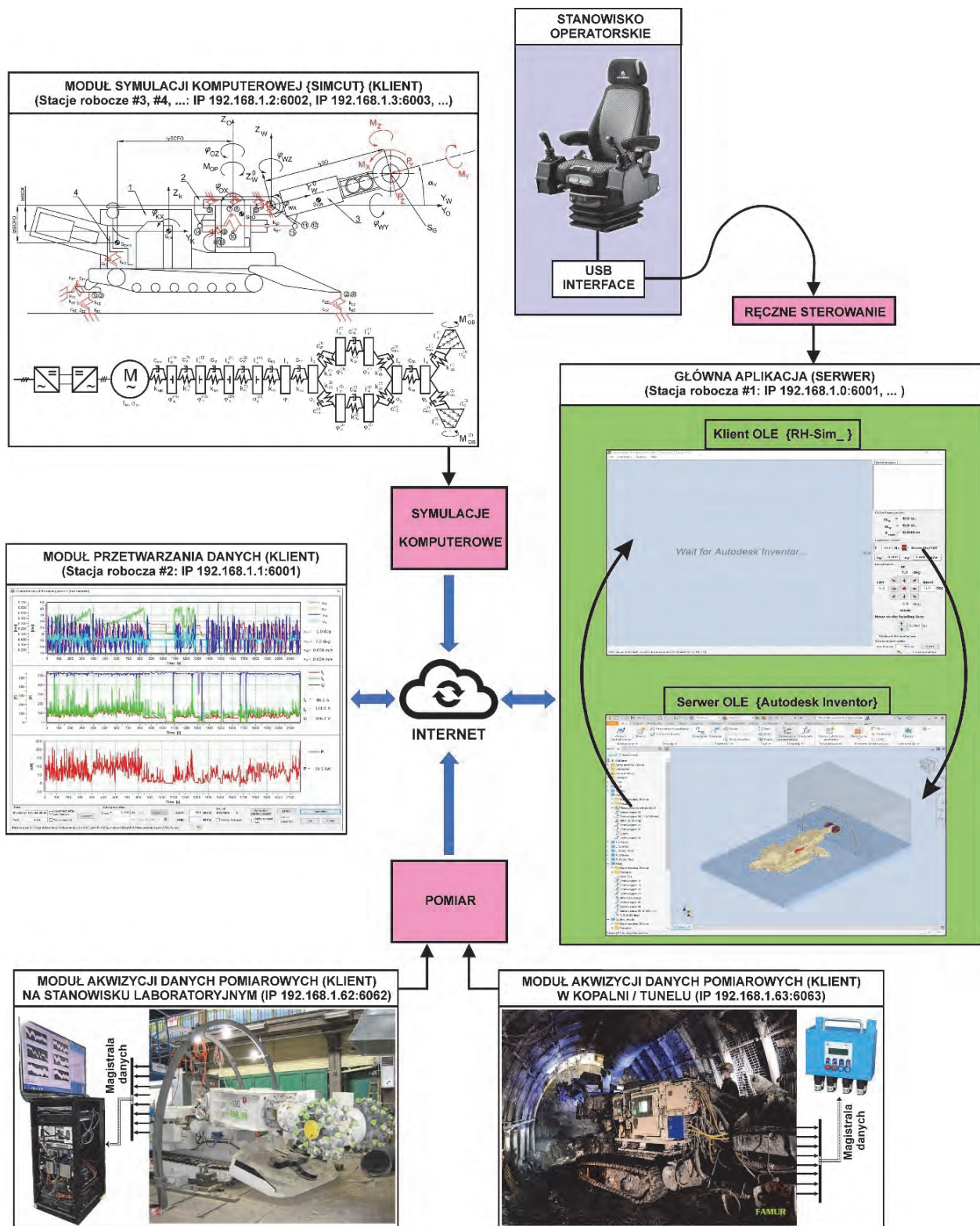
2. Symulator badawczy wysięgnikowego kombajnu chodnikowego {RH-Sim}

Opracowany symulator badawczy kombajnu chodnikowego {RH-Sim} łączy w sobie funkcje trenażera, który może być wykorzystywany w procesie szkolenia operatorów z systemem informacyjnym umożliwiającym gromadzenie, przetwarzanie i prezentację graficzną danych uzyskanych w trakcie ich rejestracji na rzeczywistym obiekcie, bądź będących wynikiem rozwiązywania zaimplementowanych w oprogramowaniu symulatora modeli matematycznych. Do podstawowych cech funkcjonalnych symulatora zaliczyć należy możliwość [4]:

- prezentacji wizualnej przebiegu procesu urabiania powierzchni czoła przodku na wielkoformatowym ekranie projekcyjnym,
- predykcji obciążenia napędów kombajnu, wydajności i energochłonności urabiania podczas urabiania skał o zadanych własnościach przy ręcznym sterowaniu przez operatora ruchem głowic urabiających,
- odtwarzania i analizy przebiegu procesu urabiania na podstawie charakterystyk dynamicznych uzyskanych z symulacji komputerowej z wykorzystaniem adekwatnych modeli obliczeniowych,
- odtwarzania i analizy rzeczywistego procesu urabiania, w tym wyznaczenia przebiegu zmienności wydajności i energochłonności urabiania, na podstawie charakterystyk dynamicznych zarejestrowanych na rzeczywistym obiekcie, lub przesyłanych on-line z systemu monitorowania kombajnu - w warunkach eksploatacyjnych lub laboratoryjnych,
- rejestracji wideo symulowanego procesu urabiania dla potrzeb analizy i oceny jego przebiegu, w celach prezentacyjnych, szkoleniowych i marketingowych.

Struktura symulatora ma postać rozproszonego systemu informatycznego, w którym wyróżnić można [5] - rys.3:

- stację roboczą z zainstalowanym oprogramowaniem Serwera (Program Główny),
- stacje robocze z zainstalowanym oprogramowaniem Klienta przeznaczonym do realizacji zadań związanych z przygotowaniem i wizualizacją danych, gromadzeniem danych z pomiarów oraz wykonywaniem symulacji komputerowych procesu urabiania.



Rys.3 Schemat ideowy badawczego symulatora kombajnu chodnikowego {RH-Sim} [5]

W Programie Głównym generowana jest grafika 3D wirtualnej sceny, na której umieszczony jest między innymi wysięgnikowy kombajn chodnikowy ustawiony tuż przy czole przodku. Dla potrzeb przetwarzania i wizualizacji przebiegu procesu urabiania wykorzystano silnik graficzny Autodesk Inventor Professional 2022. Oprogramowanie Inventor pełni rolę Serwera OLE (serwera automatyzacji) udostępniającego swoje

środowisko graficzne oraz osadzone w nim obiekty wirtualnej części symulatora. Program Główny (Klient OLE) ma w ten sposób dostęp i możliwość manipulowania obiektami wirtualnej sceny symulatora, uruchamiania zarejestrowanych w nim skryptów (makr) oraz ma dostęp do funkcji programu Inventor i jego zmiennych środowiskowych. Pozwala to między innymi na sterowanie wiązaniami determinującymi położenie ruchomych elementów kombajnu chodnikowego oraz dwukierunkową wymianę informacji. Mechanizmy automatyzacji OLE wykorzystane zostały do realizacji ruchu kombajnu chodnikowego na wirtualnej scenie oraz generowanie wyłomu w miarę przemieszczania się głowic urabiających po powierzchni czoła przodku. Symulacja geometrii skrawania skały głowicami urabiającymi kombajnu chodnikowego realizowana jest bezpośrednio w środowisku Autodesk Inventor z wykorzystaniem skryptu napisanego w języku Microsoft Visual Basic for Application (VBA) zaimplementowanego w środowisku Autodesk Inventor i zapisanego w pliku modelu CAD.

W miarę ruchu głowic urabiających po powierzchni czoła przodku realizowanego programowo bądź ręcznie, wyznaczana jest objętość „urobionej” skały, pole przekroju poprzecznego skrawu, niezbędne do obliczenia wydajności procesu urabiania. Wykorzystano w tym celu aparat matematyczny zaimplementowany w środowisku Autodesk Inventor i udostępniany przez Serwer OLE.

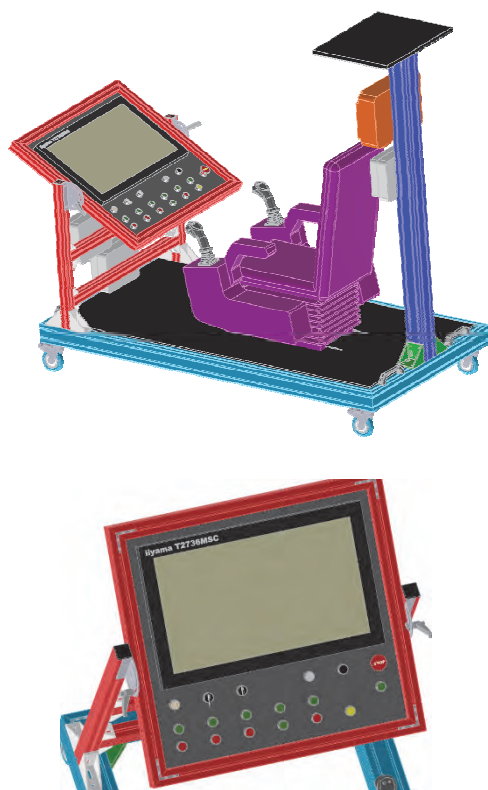
Predykcja zapotrzebowania mocy zużywanej w procesie urabiania skał o określonych własnościach mechanicznych, prądu zasilania silnika w napędzie głowic urabiających, prądu zasilania kombajnu, energochłonności urabiania, czy innych istotnych parametrów pracy kombajnu podczas sterowania ręcznego dokonywana jest na podstawie charakterystyk eksploatacyjnych rozpatrywanego kombajnu chodnikowego, zarejestrowanych w rzeczywistych warunkach jego pracy lub rodziny charakterystyk uzyskanych z symulacji komputerowych. W wielu ośrodkach naukowych tworzone są modele symulacyjne dla potrzeb badania dynamiki wysięgnikowych kombajnów chodnikowych, predykcji mocy, wydajności urabiania i energochłonności. Oparte są one m.in. na wykorzystaniu równań Lagrange’a, metody elementów dyskretnych, czy algorytmów sztucznej inteligencji [6], [7], [9], [12]. W symulatorze {RH-Sim} zaimplementowano autorski model dynamiczny wysięgnikowego kombajnu pozwalający na wyznaczenie wartości wyżej wymienionych parametrów dla zadanych warunków realizacji procesu urabiania.

3. Stanowisko operatorski symulatora {RH-Sim}

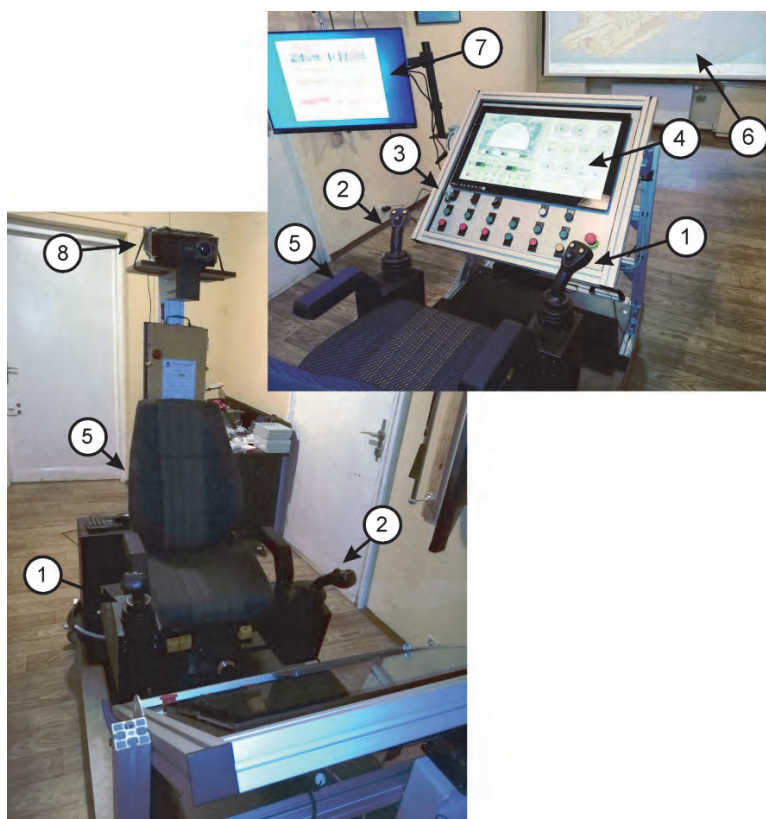
W celu zapewnienia możliwości ręcznego sterowania kombajnem chodnikowym na wirtualnej scenie symulatora {RH-Sim}, np. dla celów szkoleniowych, opracowano projekt (rys.4) oraz zbudowano w pełni funkcjonalne stanowisko operatorskie umożliwiające sterowanie lokalne lub radiowe wirtualnym kombajnem. Połączenie warstwy softwarowej (wirtualnej sceny) z rzeczywistym stanowiskiem pracy operatora kombajnu chodnikowego sprawia, iż symulator stanowi system oparty na rozszerzonej rzeczywistości (AR). W celu zapewnienia realizmu pracy operatora kombajnu, Stanowisko Operatorskie wyposażone zostało w większość elementów sterowniczych kombajnu wysięgnikowego, to znaczy (rys.5):

- joystick dwukierunkowy (1) umożliwiający zintegrowane sterowanie ruchem wysięgnika w płaszczyźnie poziomej i pionowej,
- joystick dwukierunkowy (2) przeznaczony do sterowania mechanizmem jazdy kombajnu (jazda w przód i w tył, skręt w prawo i w lewo), co daje możliwość symulowania zawrębiania głowic urabiających w powierzchni czoła przodku oraz przemieszczania kombajnu w obrębie czoła przodku,

- konsolę sterowniczą (3) umożliwiającą: załączenie zasilania kombajnu, wybór trybu sterowania, włączenie/wyłączenie agregatu hydraulicznego, podajnika, ładowarki, odpylacza, napędu głowic urabiających, sygnalizatora dźwiękowego oraz wyłączenie awaryjne.



Rys.4 Projekt stanowiska operatorskiego symulatora {RH-Sim}



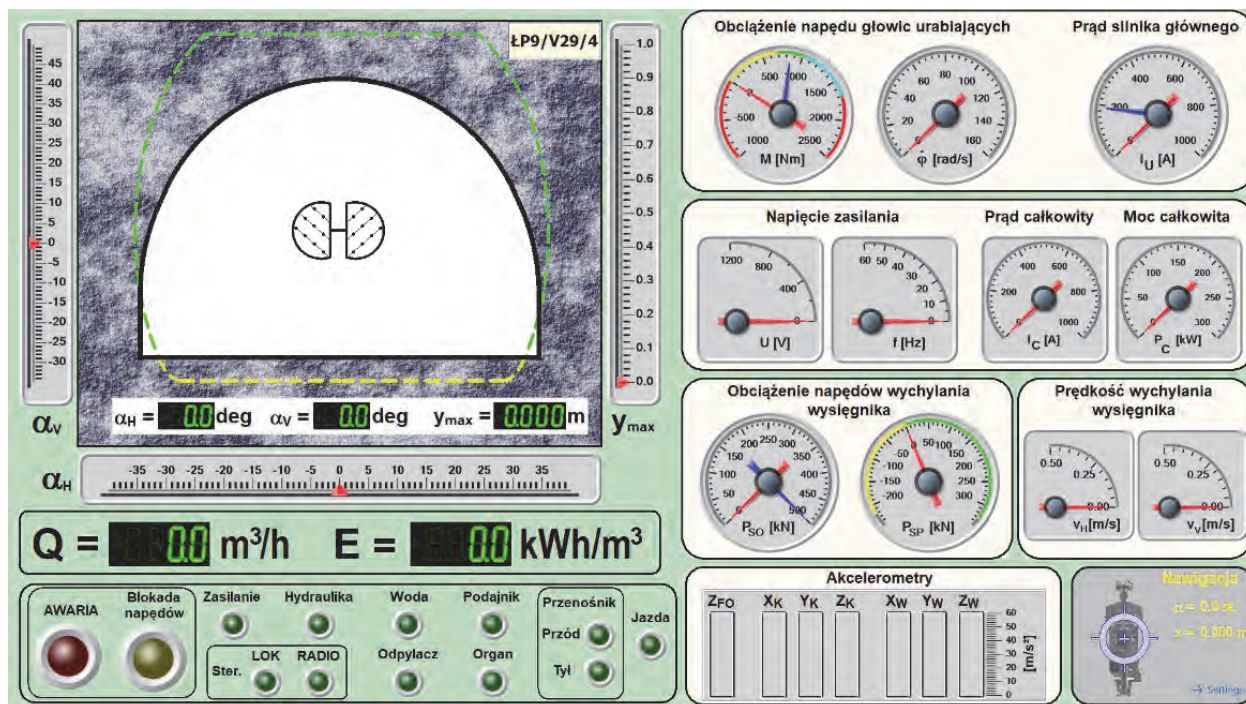
Rys.5 Stanowisko Operatorskie: 1 - joystick sterowania ruchem wysięgnika, 2 - joystick sterowania jazdą kombajnu, 3 - konsola sterownicza, 4 - wyświetlacz do wizualizacji procesu urabiania, 5 - siedzisko operatora, 6 - ekran projekcyjny, 7 - monitor do wizualizacji przebiegów czasowych parametrów pracy kombajnu, 8 - projektor multimedialny

Konsola sterownicza umożliwia sterowanie pracą poszczególnych podzespołów kombajnu na wirtualnej scenie, z zachowaniem logiki i zależności obwodów sterowania rzeczywistego kombajnu chodnikowego. Na konsoli sterowniczej umieszczony jest także wyświetlacz wielkoformatowy (4), na którym dokonywana jest wizualizacja przebiegu procesu urabiania czoła przodku oraz obciążenia kombajnu (wyświetlacze takie stosowane są w wielu nowoczesnych kombajnach chodnikowych na stanowisku operatorskim). Na ekranie tym wyświetlane są następujące elementy i informacje (rys.6):

- diody sygnalizujące stan pracy poszczególnych układów kombajnu (lewa dolna część ekranu),
- bieżącą pozycję głowic urabiających na tle zarysu drążonego wyrobiska wraz z wartościami kątów wychylenia wysięgnika oraz wartością przemieszczenia kombajnu do czoła przodku (lewa górna część ekranu),

- wskaźniki wydajności (Q) i energochłonności urabiania (E),
- wskaźniki umożliwiające odczytanie wartości parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne kombajnu podczas urabiania, moc i parametry zasilania kombajnu, prędkość wychylania wysięgnika, czy pozycja kombajnu względem osi podłużnej wyrobiska (prawa strona ekranu).

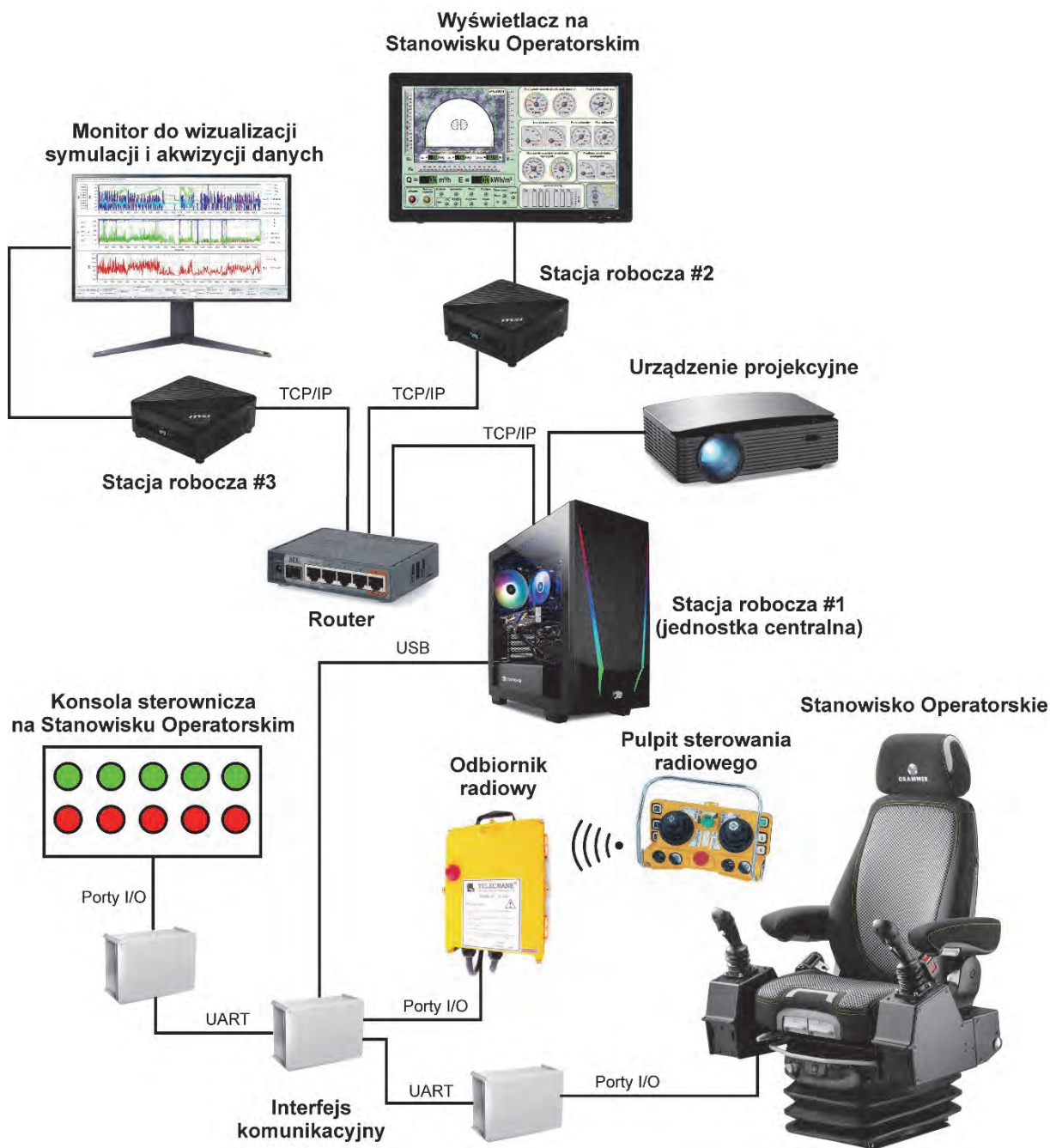
Sterowanie ręczne kombajnem chodnikowym na wirtualnej scenie możliwe jest również z pulpitu sterowania radiowego, stosowanego w wielu produkowanych obecnie kombajnach chodnikowych.



Rys.6 Wizualizacja procesu urabiania na wyświetlaczu zainstalowanym na konsoli sterowniczej Stanowiska Operatorского symulatora kombajnu chodnikowego *RH-Sim*

Komunikacja elementów sterowniczych Stanowiska Operatorского i pulpitu sterowania radiowego ze Stacją roboczą #1 (jednostką centralną) odbywa się z wykorzystaniem uniwersalnej magistrali szeregowej (USB) poprzez interfejs zbudowany na bazie trzech komputerów jednopłytkowych. Komputery te komunikują się z elementami sterowniczymi za pośrednictwem portów I/O, a między sobą - z wykorzystaniem protokołu UART (rys.7).

Wymiana danych Serwera z aplikacjami klienckimi (Modułem Przetwarzania Danych, Modułem Symulacji Komputerowej, Modułem Akwizycji Danych Pomiarowych oraz systemem wizualizacji parametrów pracy kombajnu) odbywa się z wykorzystaniem sieci Internet za pośrednictwem routera (rys. 7). Każdy moduł (Klient) komunikuje się z Programem Głównym (Serwerem) z wykorzystaniem protokołu transmisji danych TCP/IP, za pośrednictwem którego realizowana jest dwukierunkowa wymiana informacji pomiędzy składnikami (stacjami roboczymi) rozproszonego systemu symulatora badawczego.



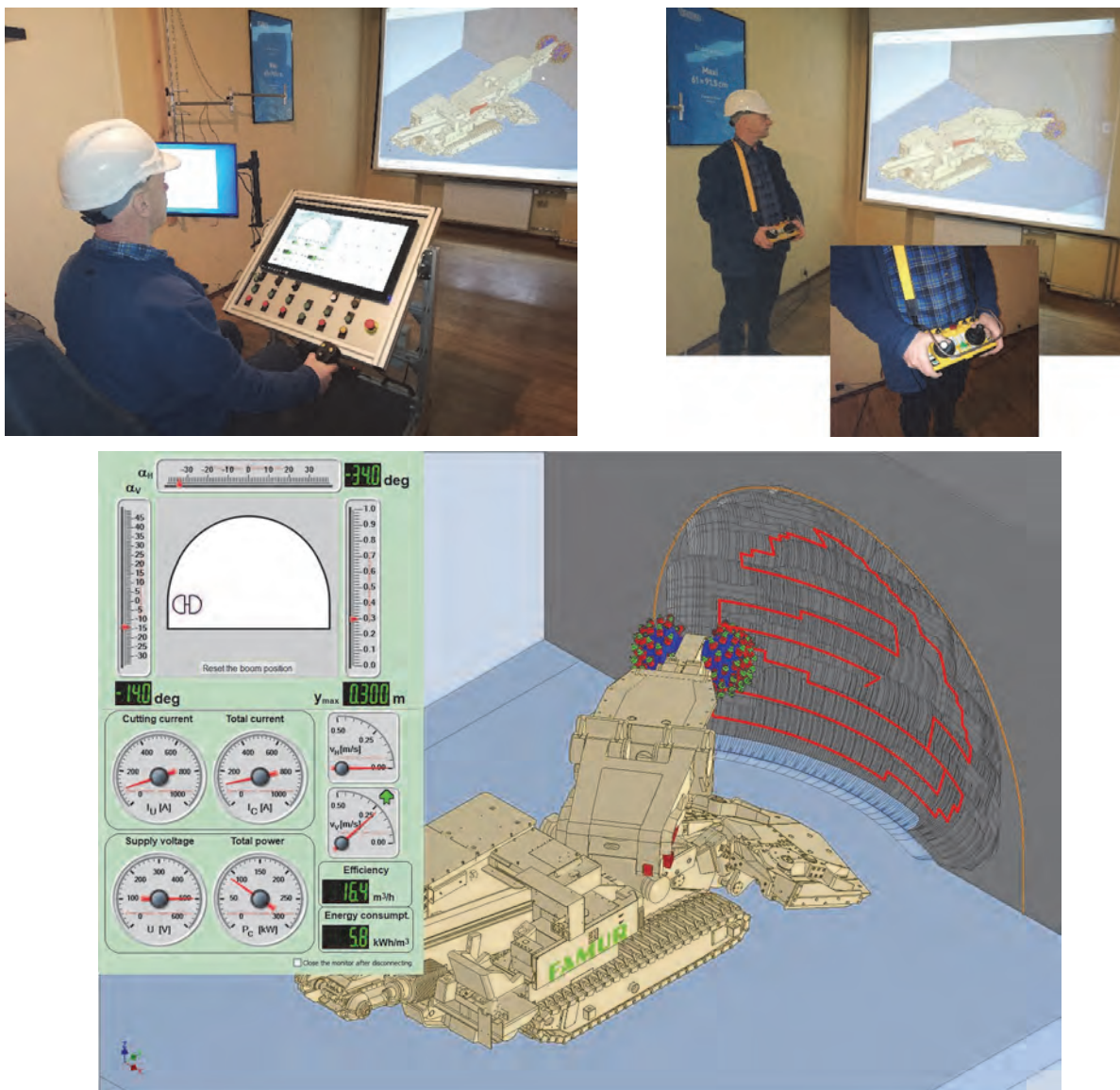
Rys.7 Schemat ideowy interfejsu komunikacyjnego Stanowiska Operatorskiego z jednostką centralną oraz Stacji roboczych w architekturze Klient-Serwer symulatora badawczego {RH-Sim}

4. Przykład wykorzystania symulatora {RH-Sim} - symulowane urabianie

Jako przykład wykorzystania symulatora {RH-Sim}, np. w procesie szkolenia operatorów, pokazano przebieg symulowanego urabiania podczas sterowania ręcznego przez operatora kombajnem chodnikowym na wirtualnej scenie ze Stanowiska Operatorskiego (rys.8a), lub z pulpitu sterowania radiowego (rys.8b), podobnie jak to ma miejsce w warunkach rzeczywistych. Operator posługując się joystickami steruje ruchem kombajnu (dojazd do czoła przodku) oraz wychyla wysięgnik w kierunku poziomym i pionowym. Sygnały elektryczne wysyłane ze Stanowiska Operatorskiego do Stacji roboczej #1 sterują w Programie Głównym symulatora wiązaniami modelu kombajnu powodując jego ruch. Aby możliwe było sterowanie wirtualnym kombajnem oraz realizacja procesu urabiania konieczne jest aktywowanie określonych funkcji kombajnu, zgodnie z jego instrukcją obsługi (naciśnięcie odpowiednich przycisków na konsoli sterowniczej symuluje załączanie kolejnych układów kombajnu). W wyniku realizacji, w czasie przemieszczania głowic urabiających po powierzchni czoła przodku (wychylania wysięgnika), operacji odejmowania brył powstaje wyłom w „urabianej” caliznie. Kształt toru ruchu głowic, a tym samym wielkość powstającego wyłomu w czole przodku zależy od sposobu sterowania ruchem wysięgnika przez operatora, zaś wielkość zawrębenia głowic wynika zadanego przez niego przemieszczenia kombajnu do czoła przodku. W trakcie symulowanego urabiania wyświetlana jest trajektoria ruchu głowic urabiających (czerwona linia) - rys.8c. Na wyświetlaczu konsoli sterowniczej wyświetlane jest przy tym bieżące położenie głowic urabiających na tle zarysu wyrobiska. Wskaźniki linijkowe oraz cyfrowe podają bieżące odczyty wartości kątów wychylenia wysięgnika (α_H i α_V), przemieszczenia kombajnu do czoła przodku (y_{max}) oraz prędkości przemieszczania głowic urabiających w kierunku poziomym i pionowym (v_H i v_V). Umieszczone na wyświetlaczu wskaźniki zegarowe oraz cyfrowe pokazują wartości: mocy zużywanej do urabiania (P_C), prądu zasilania silnika w napędzie głowic urabiających (I_U), prądu i napięcia zasilania kombajnu (I_C , U), wydajności (Q) i energochłonności urabiania (E) w miarę przemieszczania się głowic urabiających. W ten sposób operator może obserwować zmienność obciążenia kombajnu oraz efektywność procesu urabiania podczas realizacji różnych technologii urabiania, przy różnych wartościach parametrów tego procesu, w skałach o różnych własnościach mechanicznych. Zarejestrowane cykle urabiania (rys.8d) mogą być wykorzystane do analizy i oceny stosowanych przez operatorów schematów urabiania w aspekcie możliwości ograniczenia zużycia energii, oraz zapewnienia dużych wydajności urabiania powierzchni czoła przodku podczas ręcznego sterowania kombajnem, przekładających się na duże postępy drążenia wyrobisk korytarzowych w kopalniach, tuneli lub innych obiektów podziemnych.

5. Podsumowanie

Przedstawiony w niniejszym referacie symulator kombajnu chodnikowego pozwala na badanie zachowania się kombajnu wysięgnikowego w trakcie realizacji procesu urabiania powierzchni czoła przodku w wirtualnym środowisku drążonego wyrobiska korytarzowego lub tunelu. Umożliwia on predykcję jego obciążenia dynamicznego, zapotrzebowania mocy, wydajności i energochłonności urabiania dla potrzeb diagnostycznych, oraz badanie wpływu technologii oraz wartości parametrów procesu urabiania na dynamikę kombajnu.



Rys.8 Symulator badawczy {RH-Sim} w trybie ręcznego sterowania: a) Stanowisko Operatorskie, b) pulpit sterowania radiowego, c) widok okna Programu Głównego, d) przebieg wydajności, mocy i energochłonności urabiania

Symulator {RH-Sim} jest złożonym systemem przeznaczonym do symulacji pracy wysięgnikowego kombajnu chodnikowego połączonej z wizualizacją przebiegu procesu urabiania powierzchni czoła przodku w zadanych warunkach na wirtualnej scenie. Umożliwia on więc odwzorowanie zachowania się kombajnu chodnikowego podczas jego pracy w warunkach rzeczywistych. Niezbędnym etapem prac badawczo-rozwojowych dla

potrzeb doskonalenia konstrukcji wysięgnikowych kombajnów chodnikowych, oraz automatyzacji i robotyzacji tego rodzaju maszyn (opracowania autonomicznego kombajnu-roboty) jest między innymi testowanie różnych strategii automatycznego sterowania ruchem głowic urabiających. Realizowane to może być z powodzeniem na wirtualnym kombajnie w środowisku prezentowanego symulatora badawczego. Symulator ten stanowi wreszcie wygodne i bezpieczne narzędzie, które wykorzystane może być w procesie doskonalenia zawodowego operatorów kombajnów chodnikowych w zakresie sterowania ręcznego tymi maszynami, a zwłaszcza sterowania procesem urabiania w różnych warunkach geologiczno-górnictwowych.

W opracowanym symulatorze kombajnu chodnikowego wykorzystano możliwości, jakie dają rozwiązania rozszerzonej rzeczywistości. Stanowi on bowiem połączenie wirtualnego środowiska pracy maszyny górniczej z jej rzeczywistym, pełnowymiarowym stanowiskiem operatorskim umożliwiającym sterowanie wirtualnym kombajnem za pomocą rzeczywistych elementów sterowniczych. Dodaje to realizmu pracy operatora bez konieczności ponoszenia dużych kosztów związanych z wykorzystaniem prawdziwego kombajnu, czy to dla celów badawczych, czy szkoleniowych. Symulator ten jest projektem otwartym, możliwym do adaptacji w zależności od potrzeb użytkowników.

Literatura:

- [1] Cheluszka P.: Optimization of the cutting process parameters to ensure high efficiency of drilling tunnels and use the technical potential of the boom-type roadheader. *Energies* 13(24), 6597, 2020, pp. 23, DOI: <https://doi.org/10.3390/en13246597>.
- [2] Cheluszka P., Gawlik J.: Validation of the dynamic model of the roadheader's body. In: Kurek M., Łagoda T. (eds.): *Design and operation of working machines*. Opole University of Technology, Opole 2019, p. 7-16.
- [3] Cheluszka P., Kaula R., Heyduk A., Gawlik J.: Modelling the dynamics of a drive of boom-type roadheader cutting heads at adjustable angular speed. *Archives of Mining Sciences* 63(2018), 1, p. 183-204, DOI 10.24425/118894
- [4] Cheluszka P., Remiorz E., Rostami J.: The Use of a Roadheader Simulator in Research of Dynamics and Energy-Consumption of Excavating Underground Roadways and Tunnels. *Energies* 2022, 15(18), 6673. <https://doi.org/10.3390/en15186673>
- [5] Cheluszka P., Remiorz E., Adamecki D., Grzegorzec W., Głuszek G.: Symulator badawczy kombajnu chodnikowego. XII Międzynarodowa Konferencja TECHNIKI URABIANIA „TUR 2022”. Krynica Źródł, 20 - 23 września 2022 r.
- [6] Ebrahimabadi A., Azimipourb M., Bahreini A.: Prediction of roadheaders' performance using artificial neural network approaches (MLP and KOSFM). *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* Vol. 7, Iss. 5, 2015, p. 573-583, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.06.008>.
- [7] Fattahi H.: Estimation of roadheader performance using relevance vector regression approach-a case study. *Int. J. Optim. Civil Eng.* 11(1), 2021, p. 101-112.
- [8] Fu S.C., Li Y.M., Yang J.J.: Research on autonomous positioning and orientation method of roadheader based on Ultra Wide-Band technology. *Journal of China Coal Society* Vol. 40, 2015, p. 2603-2610. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.7064.
- [9] Li, X. Huang, B., Li C.C., Jiang S. (2012). Dynamics Analysis on Roadheader Cutting Head Based on LS-DYNA. *Journal of Convergence Information Technology* Vol. 7, 2012, p. 333-340, DOI: 10.4156/JCIT.VOL7.ISSUE23.39.
- [10] Peinsitt T.: Recent developments towards Autonomous Tunneling and Mining Machinery. The 2021 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM21) GECE, Seoul, Korea, August 23-26, 2021, pp. 12.
- [11] Suyu Wang, Miao Wu: Cutting trajectory planning of sections with complex composition for roadheader. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 233, Iss. 4, 2018, p. 1441-1452, DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406218768840>.

- [12] Zhang, Z.; Chen, S.; Liu, Y.; Wang, H.; Cao, C.: Cutting Mechanism Rotor System Dynamic Characteristics of Cantilever Roadheader under Random Hard Rock Load. *Actuators* 11, 83, 2022, pp.16. DOI: <https://doi.org/10.3390/act11030083>.
- [13] <https://www.afgsim.com/pl/symulatory-lotu-full-flight/embraer/145-faa-621> (Data dostępu: 31.12.2022)
- [14] <https://obrum.pl/oferta/kompleksowy-symulator-strzelan-dla-czolgu-pt-91-t-72m1/> (Data dostępu: 31.12.2022)
- [15] <https://www.cm-labs.com/de/startseite/hafenausstattung-simulator/vortex-advantage/> (Data dostępu: 31.12.2022)
- [16] https://mobile.twitter.com/im_mining/status/1496424259928924164 (Data dostępu: 31.12.2022)
- [17] <https://www.thoroughtec.com/> (Data dostępu: 31.12.2022)

DOPADY A KONSEKVENCE PŘECHODU ZE SPALOVACÍCH MOTORŮ NA ELEKTROMOBILITU Z POHLEDU MAZIV A JEJICH VÝROBY, APLIKACE, IDENTIFIKOVANÁ RIZIKA

IMPACTS AND CONSEQUENCES OF THE TRANSITION PROCESS FROM ICES ON EVS, FOCUSED ON LUBRICANTS FORMULATION AND LUBES MANUFACTURING

Petr CHYTKA, Transa, s.r.o., Jihlava ¹

Anotace:

Na základě politických rozhodnutí EU jsou motory s vnitřním spalováním přísně omezovány. Hlavní důvod: „sloučeniny CO a NO ve výfukových plynech“. Příchod elektrických vozidel bude mít za následek pokles spotřeby automobilových maziv. Plně elektrická vozidla nemají klikovou skříň a jejich potřeba chladicích a mazacích kapalin je mnohem nižší. Na druhou stranu pro průmysl maziv přichází nová výzva. Přesto je potřeba změnit pohled. Každý výrobce aditiv spolu s výrobcem maziv nyní investuje obrovské peníze do vývoje nových aditiv a následně také nových receptur mazacích a chladicích kapalin pro EV.

Příspěvek uvádí, jaké nové pohledy na maziva a servisování elektrických vozidel se řeší, a to včetně případných rizik.

Annotation:

On base of political decisions Internal Combustion Engines (ICE) are being strictly limited. The main reason: „CO and NO compounds in exhaust gases“. Arrival of electric vehicles will result a downturn vehicles lubricants volumes. Fully electric vehicles have not crankcase. Their need for cooling and lubrication liquids is much lower. On the other hand, for lubricant industry comes new challenge. Nevertheless, is necessary to change the view. Each additive maker together with lubricant makers now invest huge money to the development of new additivation, and consequently, new formulations of lubricating and cooling liquids to EVs.

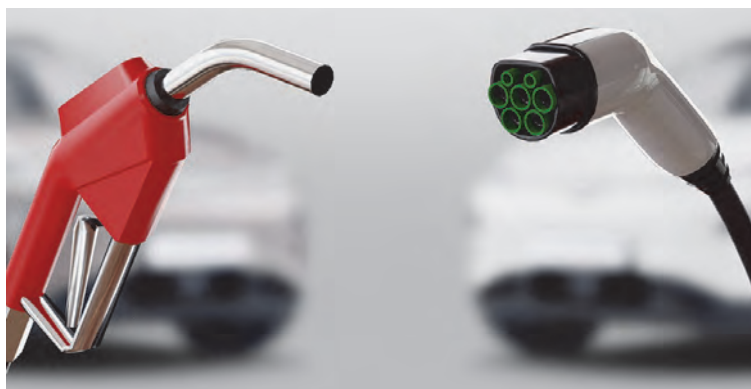
This presentation briefly describes some problems, differences and new accesses in reaction on new powertrain systems both for hybrids and for EVs.

¹ Ing. Petr Chytka, CSc.

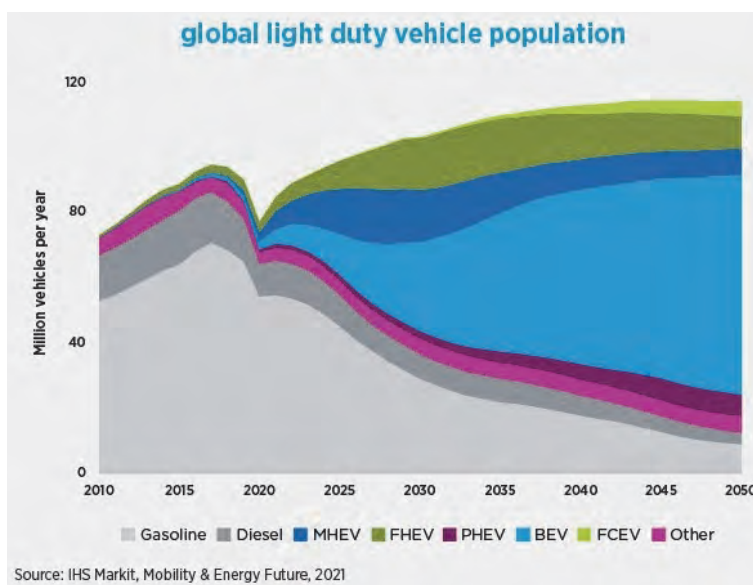
Transa, s.r.o.

Strojírenská 7, 586 01 Jihlava

tel.: +420 567 310 128, fax: +420 567 310 128, e-mail: chytka@sunoco.cz



1. Úvod: Prognóza prodeje vozidel



Obr.1 Prognóza

2. Změna portfolia maziv užívaných při výrobě automobilů

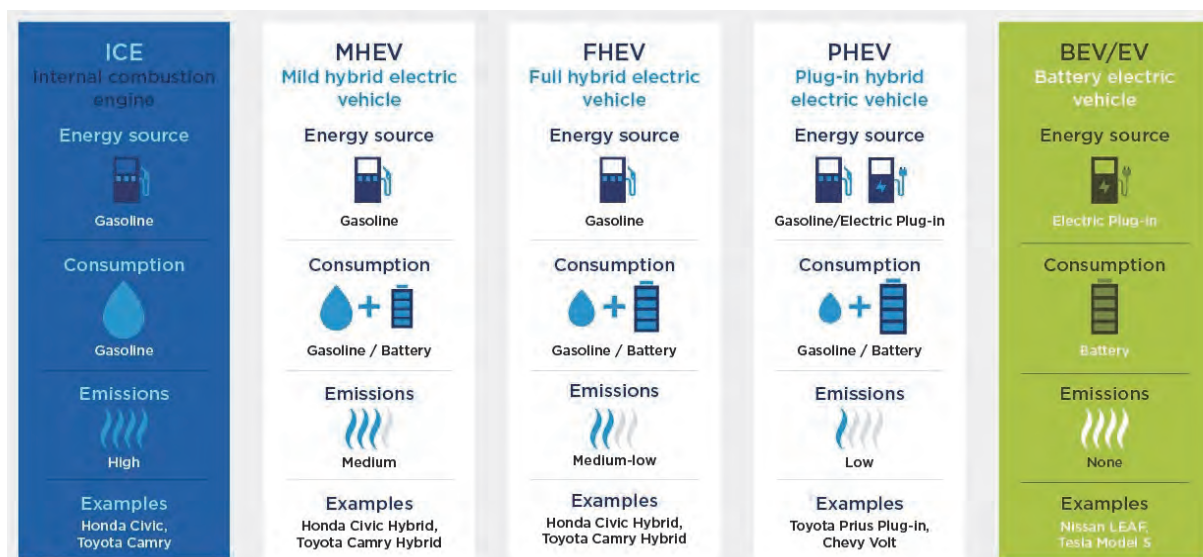
Sektor výroby osobního automobilu spotřebuje 28% obráběcích kapalin používaných v Severní Americe, což představuje přibližně 51 milionů galonů. Z toho je 40% řezná kapalina (řezná a chladicí kapalina vč. emulzní), 30% tvářecí kapalina, 5% kapaliny ochranné a protikoroziční a 5% kapaliny pro údržbu strojů.

Výroba automobilu se spalovacím motorem však vyžaduje také použití mazacího oleje pro systémy obráběcích strojů-na obrábění dílců motoru (vačkové hřídele, bloky motorů, aj.).

Bateriové elektrické vozidlo má zhruba poloviční počet dílů než vozidlo se spalovacím motorem nebo hybridní vozidlo. Tyto díly jsou také méně komplikované, což znamená sníženou potřebu výše uvedených kapalin. Když zaměníme jeden BEV v parku vozidel se spalovacím motorem, odstraníme potřebu 100% motorového oleje jednoho vozidla. Tak pronikání BEV na trh má obrovský dopad ve snížení poptávky po mazacích olejích do spalovacích motorů.

Předpokládá se, že spotřeba všech typů obráběcích kapalin na vyrobené vozidlo klesne o 3% u hybridů a o 33% u BEV. Nejvíce kráceny budou řezné kapaliny; v případě BEV by poptávka mohla klesnout o polovinu.

3. Porovnání efektivity pohonu



Obr.2 Porovnání efektivity pohonu

4. Požadavky na spalovací motory pro hybridy

Různé konstrukce elektrických vozidel se od sebe výrazně liší, stále se vyvíjejí, takže potřeby na jejich mazání se také vyvíjejí a mění. Kromě toho se požadavky na výkon maziv ve všech elektrických vozidlech, mild a plně hybridních vozidlech, stejně jako BEV, liší od požadavků na klasické spalovací motory - buď kvůli elektrickým aspektům jejich provozu, nebo kvůli změnám ve způsobu použití spalovacího motoru.

Obecně platí:

- hybridy stále potřebují kapaliny v klikové skříní a vytvářejí však pro ně nové a náročnější požadavky,
- výrazně odlišné jsou také požadavky na kapaliny používané v různých konfiguracích hnacího ústrojí,
- nové jsou požadavky na plastická maziva.

Sečteno a podtrženo, elektrifikace znamená, že automobily budou používat menší objemy maziv, ale s větší různorodostí maziv. Mild hybridy - hlavním problémem maziva je, že spalovací motor pracuje mnohem kratší dobu při špičkovém výkonu než v režimu klasickém, to je pouze se spalovacím motorem. Jízdní cyklus proto vypadá spíše jako série stop-start nebo krátkých cest. S tím je spojena dřívější degradace maziva.

Vzhledem k tomu, že výrobci vozidel mají velký zájem o to, co označují jako platformy - modulární design, a výrobu několika odlišných modelů se sdílenými vnitřními a / nebo vnějšími vlastnostmi - mild hybridy budou mít v příštích několika letech pravděpodobně stejný spalovací motor jako jiné vozidlo ve stejné značkové řadě. Dokonce také v kategorii PHEV je např. Volvo XC90 T8 vybaveno stejným 2-litrovým motorem jako výkonnější (ze dvou) vozidel se spalovacím motorem v řadě T. Konceptně, mild hybrid popisuje extrémní scénář stop-start jízdy pro spalovací motor a je nepravděpodobné, že by pro taková vozidla byla potřeba speciální kapalina z klikové skříně.

Plné a plug-in hybridy s Ems (elektromotory) odvádějí více práce. Plně hybridní vůz může pracovat ve třech režimech: pouze na baterie, sériově a paralelně. Některá vozidla mohou přepínat mezi dvěma nebo třemi z těchto režimů. Když je vozidlo používáno v režimu pouze na baterii, spalovací motor a některé části převodovky se neotáčí. To znamená, že jsou vystaveny vibracím, aniž by byly mazány. To by mohlo být významným problémem u modelů PHEV, které mají delší dojezd pouze na baterie.

5. Požadavky na kvalitu motorového oleje

Requirements to address	Increasing severity of the engine oil			
	ICE	MHEV	FHEV	PHEV
Cooler ICE temperature	+	+	+	+
Water and fuel dilution	+	+	+	+
Corrosion	+	+	+	+
Rust	+	+	+	+
Wear	+	+	+	+

High temp Low temp

Obr.3 Požadavky na kvalitu motorového oleje

6. Čtyři hlavní požadavky na maziva pro elektromobily

- Elektrická vodivost kapalin (bezpečnostní aspekt - vyšší napětí, experimentuje se také s vysokonapěťovými systémy). Zde je hlavním problémem najít rovnováhu: Je-li vodivost příliš vysoká, je nebezpečí proudových úniků via kapalina. Je-li příliš nízká, je nebezpečí kumulace elektrického náboje s možností přeskočení oblouku v oleji, což vede k rychlé degradaci oleje.
- Ochrana proti korozi. Bludné proudy a prostředí pod napětím produkují korozi, která se jinak nevyskytuje. Dalším typem dříve se vyskytujícím velmi omezeně je koroze vibrační.
- Tepelná vodivost. Nebývale vysoké otáčky, mění se třecí podmínky, teploty podléhají výkyvům se špičkami nad možnosti stávajících olejů. Bateriové články se chladí ponořené v chladicí kapalině.
- Materiálová kompatibilita - používají se materiály, s nimiž dosud automobilní průmysl nemá zkušenosti, nebývalý rozsah elektroniky, podstatně větší použití sloučenin mědi (20 kg versus 80 kg EV), izolačních materiálů.

K tomu všemu přistupuje také požadavek, aby část kapalin byla ve vozidle po celou dobu životnosti vozidla (fill-in-life).

Mimo uvedených nadstavbových požadavků zůstávají samozřejmě v platnosti původní požadavky:

- bránění oxidaci maziva,
- bránění tvorbě úsad.

Dosažení shody všech požadovaných vlastností na uspokojivé úrovni je neobyčejně komplikované!

Mimo jiné je nezbytné používat více dražšího - PAO základového oleje. A také proto ceny maziv porostou.

7. Prvky Inovativní formulace

Antioxidanty (Antioxidant - klíčové aditivum u tepelně zatěžovaných aplikací maziv; brání degradaci maziva).

- **Primární antioxidant** - reaguje s volnými radikály, to je s reaktivními molekulami s jedním nebo více nepárovými elektrony, které reagují ostatními uhlovodíkovými molekulami, což je nežádoucí primární efekt u oxidace oleje.

Druhy: ADPA - alkylované difenylaminy, fenolické antioxidanty

- **Sekundární antioxidant** - rozkládá alkalické hydroperoxydy, což jsou další produkty činnosti volných radikálů.

Druhy: ZDDP (dialkyldithiofosfát zinku), HPE (ester) a obecně sloučeniny na bázi síry a/nebo fosforu. Tato složení však kolidují se systémy čištění spalin. Jsou vysoce efektivní. Jejich snižování musí být nahrazeno aplikací nových druhů antioxidantů.

-
- **SHP** (sulfurizací blokovaný fenol) - použit jako booster do stávající aditivace, v koncentraci cca 0,1%. Funguje jak v primární, tak v sekundární oblasti.

Umožňuje synergii mezi ZDDP, zvyšování tepelné odolnosti a celkové výkonnosti motorového oleje, za současného snižování obsahu ZDDP.

0,1 procentní přítomnost SHP ve směsi vykazuje snížení elektrické vodivosti oproti aktuálně běžným formulacím!

8. Prvky inovativní formulace

Modifikátor tření, Esterový základový olej

ZADÁNÍ: Pomocí inovací vytvářet produkty, které jsou bezpečné pro provoz vozidla, ale také akceptovatelné z hlediska udržitelnosti. Při výrobě maziv přejít na méně energeticky náročné procesy, snižovat naši závislost na fosilních palivech.

Příklady inovací:

- 1) Nový modifikátor tření

Polymerní modifikátory tření se používají po celá desetiletí a jsou dnes velmi důležité - ke snížení tření a zlepšení spotřeby paliva. Stále je lze aplikovat pro současné i budoucí receptury maziv pro spalovací motory. Polymerní modifikátory tření jsou speciálně navrženy tak, aby snižovaly tření a opotřebení, což vede k úsporám energie. Nižší třecí ztráty motoru vedou k lepší spotřebě paliva. Se stejným množstvím paliva může auto cestovat déle. Spotřeba paliva u osobních automobilů dále přímo souvisí také se snížením produkce CO₂. Na každou tunu polymerních modifikátorů tření lze snížit přibližně 1 500 tun emisí ekvivalentních oxidu uhličitému. K tomu dnes přistupuje inovace - modifikátory tření na bázi biomateriálů. Zde se ukazuje, že umožní úspory paliva větší než u modifikátorů na bázi petrochemických produktů.

2) Přídavek esterového základového oleje

Nastal obrovský tlak na elektrifikaci vozidel, kdy výrobci přicházejí s novými systémy, které mají nové a komplexní požadavky na mazání. V současné době se používají v převodovkách EV vozidel kapaliny na bázi základových olejů skupiny API III. Zahrnutí 20% esteru do základových olejů skupiny III může pomoci výrazně snížit úroveň mechanických ztrát, tedy vůz může dosáhnout lepší účinnosti.

Na testech FZG pro přenos vysokého zatížení se ukázalo, že formulační kapalina skupiny III s přidanými 20% esterového oleje v testu absolvovala 140 minut, zatímco formulace pouze s olejem skupiny III bez esterů selhala za 78 minut.

9. Prvky Inovativní formulace

Zlepšovač viskozitního indexu - VI Improver a PPD-Pour point depressant

- Polymerový produkt. V zásadě se jedná o cívku polymeru, která se s teplotou rozvíjí. Dlouhé řetězce polymeru se však vlivem vyššího tepelného a elektromagnetického zatížení při pohybu porušují (stříh), a tak VI Improver ztrácí záhy účinnost a olej se zahušťuje.
- Pro výrobu VI Improveru se používají polyalkyl metakryláty (PAMA) a olefin kopolymer olefinu (OCP).
- Klíčovým požadovaným parametrem je stříhová stabilita polymeru.
- OCP: Aktuálně je komerčně využíváno pět variant kopolymeru olefinu (liší se molekulovou hmotností). Žádný však dosud není schopen plně uspokojit zvýšené požadavky na životnost. Řešením se ukazuje být inovovaný VI Improver, modifikovaný kopolymer olefinu typu X firmy Innov Oil. Jeho řetězce mají vyšší odolnost proti poškození a tak posouvá vysokoteplotní odolnost oleje.

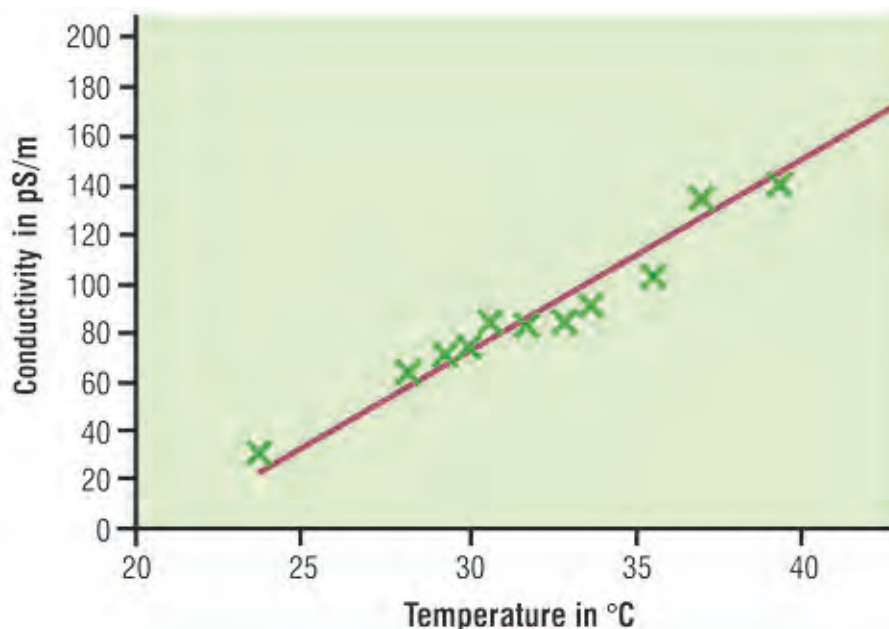
10. Elektrické vlastnosti kapalin pro elektromobil

Ropné oleje primárně vykazují minimální elektrickou vodivost; vykazují dissipativní (rozptylující, ztrátový) efekt. To lze ovlivnit aditivací. Zvýšení vodivosti však současně přináší zhoršení oxidační odolnosti.

(Pozn.:Jednotka vodivosti: pS/m = pikoSiemens/metr)

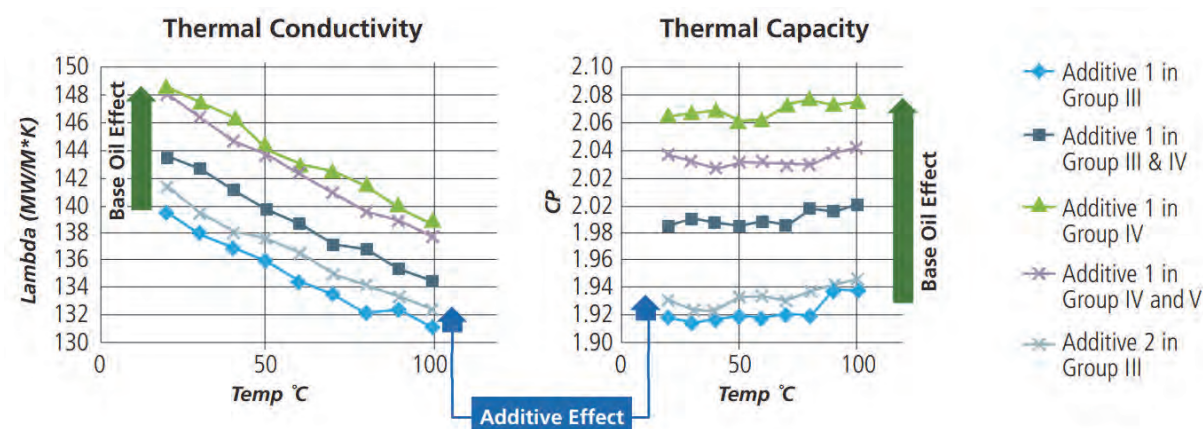
LUBE OIL AND CIRCULATING OIL	PS/M	HYDRAULIC OIL	PS/M
Gear oil	>2,000	Mobile hydraulics (Bio)	800
Steam turbine oil	13	Industry hydraulics (ZnDTP)	250-2,000
Gas turbine oil (PAO)	1,200	Industry hydraulics (ester)	>2,000
Gas turbine oil (ester)	1,500	Phosphoric acid ester (airplane)	>2,000
SAE 10W-40	>2,000	Airplane hydraulics synthetic	29
Manual transmission gear oil	>2,000	Synthetic	9
Paper machine oil (Zn-P)	350	Aircraft PAO	70
Paper machine oil (S-P)	10		
Silicate ester (refrigeration)	1,500	Insulating fluids	12

Obr.4 Porovnání vodivostí různých maziv, při 23 °C



Obr.5 Vztah mezi el. vodivostí a teplotou mazacího oleje

11. Teplotní vlastnosti převodových kapalin pro elektromobil

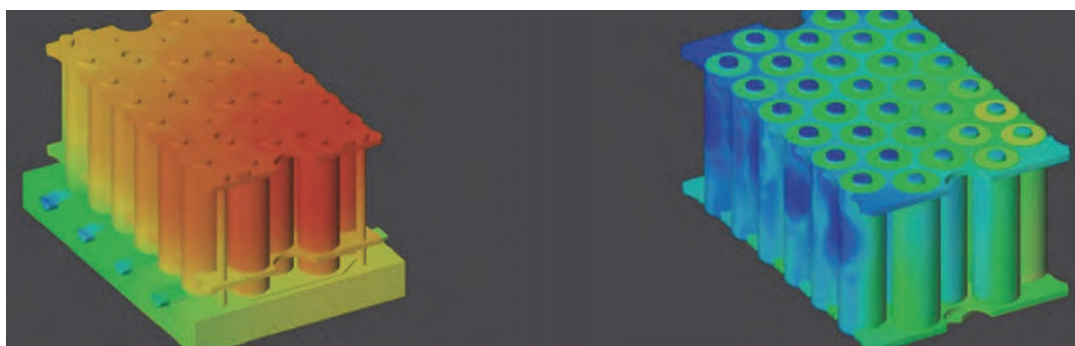


Obr.6 Grafy teplotních vlastností základových olejů s různou aditivací

12. Chlazení bateriových článků

- 1) chlazenou deskou - na obr.7 vlevo,
- 2) ponoření v chladicí lázni - na obr.7 vpravo.

Teploty znázorněny barevně - od modré = chladná, po oranžovou = teplá.



Obr.7 Modelování teplotní situace bateriových článků dle typu chlazení

13. Specifika převodovek pro HEV a EV

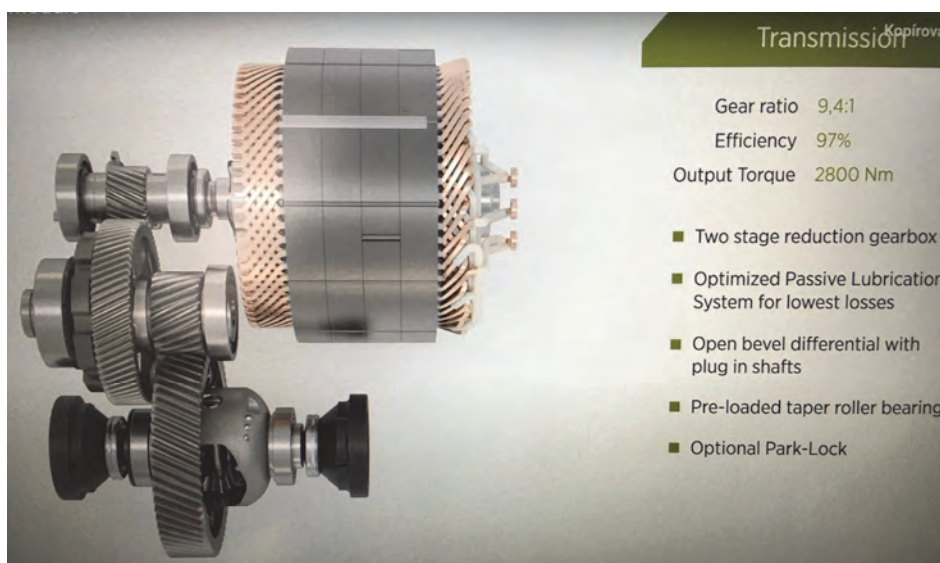
- Dvojspojky:
 - HEV - klasická dvojspojka,
 - EV - eDCT, kdy eDCT používá pro bezrázové řazení dva motory místo původní dvojité spojky.
- Měničové automaty ATF - zřejmě dojde k ústupu - cena a komplikovanost.
- V obou případech je primárně řešeným problémem kompatibilita s mědí, izolačními a ostatními materiály v konstrukci.
- Je snaha oddělovat mazací systém od chladicího.

- Převodovky pro elektrická vozidla mohou být obvykle jedno či dvoustupňové, sestupné (tzv. redukční či e-axle); vzhledem k tomu, že pohonný elektromotor točí $3\,000 \div 15\,000 \text{ min}^{-1}$.
- Problémem je vysoký točivý moment, kdy např. první vozidla Tesla musela dostat dodatečně montovaný omezovač (60% převodovek vykazalo do 100 tis. km zničení!). Ten výrobci aktuálně limitují mechanicky.

Příklad řešení oddělení mazání a chlazení: IDM- P4 Hybrid Architecture
Integrated Drive Module (iDM) pro Hybridní a Elektrická vozidla.



Obr.8 Chlazení iDM



Obr.9 Konstrukce převodů iDM

Pohonná jednotka umožňuje redukovat vysoké otáčky elektromotoru a dodávat točivý moment dalším agregátům vozidla.

14. Příklad komplikovanosti

Konfigurace a označování celků pohonu HEV (část i MHEV)

P0 (starter-generátor - přenos řemenem)

P1 (s integrovaným starter-generátorem)

P2 (s odděleným nebo integrovaným EM)

P3 a P4 (umožňují plně elektrický provoz, P4 také pro čtyřkolky)

Poznámka:

P0 a P1 architektura neumožňuje mechanické odpojení elektromotoru od systému.

P2, P3 a P4 konfigurace odpojuje elektromotor přes spojku.

15. Závěr

- Na základě politických rozhodnutí dochází k prudkým změnám v automobilní výrobě. Zelenou dostaly elektromobily.
- Výroba elektromobilů místo vozidel se spalovacím motorem si vyžaduje fundamentální změnu v náhledu na výrobu a použití maziv a provozních kapalin v automobilu.
- Tak, jako každá fundamentální změna, také tato výzva přináší možnost získat či propadnout.
- Výrobci maziv výzvu přijali a usilovně pracují na výzkumu a vývoji nových mazacích a chladících médií.

Literatura

- [1] SUN Oil.Inc. Interní výzkumná zpráva. Filadelfie, 2022
- [2] Gauntlett Trevor. The EV charging races. Glasgow, CPO 26 konference
- [3] Pain Jorge. Requirements for Crankcase lubricants. Infineum, 2022
- [4] Lubesngreades,X/22, Innov expands Improver capacity. Firemní článek
- [5] Beverina Will. An Antioxidant for Next Generation Engine Oils. LnG, 2022
- [6] Chytka Petr. Aditivační alternativy s ohledem na EVs. Výzkumná zpráva, Sunoco Transa s.r.o, 2022
- [7] Shell. Green deal solutions. Interní dokumentace, 2022
- [8] Lubricants additive alternatives for HEV. Oronite. Firemní literatura, 2021
- [9] Johns Simon. The impact of EV. The firm article. Ford Motor Co. Dearborn, USA, 2022

NOVÉ TRENDY: STROJOVÉ UČENÍ A BEZROZVÁDĚČOVÁ ONLINE VIBRODIAGNOSTIKA

Ondřej JANÍK, ifm electronic, spol. s r.o., Praha ¹

Jan ZATLOUKAL, ifm electronic, spol. s r.o., Praha ²

Anotace:

Algoritmy strojového učení a umělá inteligence mohou diagnostikům pomoci v rutinní práci tak, aby se mohli soustředit především na složitější případy, na které je zatím umělá inteligence krátká. Ne vždy je nutné plýtvat časem diagnostických specialistů, aby identifikovali například nevývahu. Online vibrodiagnostické systémy, které mohou být umístěny přímo na zařízeních nebo tzv. „v poli“ (nevyžadují rozvaděče), šetří pořizovací náklady a zrychlují implementaci systémů podporující metody tzv. condition based maintenance. Tyto dva trendy se pro budoucí rozvoj jeví jako nadějně.

¹ Ing. Ondřej Janík

ifm electronic, spol. s r. o.

Jihlavská 1558/21, 140 00 Praha 4 - Michle

tel.: +420 530 512 591, mobil: +420 737 242 458, e-mail: ondrej.janik@ifm.com, <https://www.ifm.com/cz/>

² Ing. Jan Zatloukal, Ph.D.

e-mail: jan.zatloukal@ifm.com

THE EFFECT OF DIAGNOSTIC TESTING OF THE STEERING SYSTEM ON ROAD SAFETY

WPŁYW BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH UKŁADU KIEROWNICZEGO NA BEZPIECZEŃSTWO W RUCHU DROGOWYM

Tomasz KĄDZIOŁKA, State University of Applied Sciences Nowy Sącz ¹

Józef JANCZURA, Diagnostyka Łącko Company S.C. ²

Patryk PIETRYGA, Graduate PWSZ Nowy Sącz ³

Annotation:

The steering system, together with wheels, suspension and braking system, are decisive for road safety and are subject to periodic checks during the periodic vehicle inspection at a vehicle testing station. The steering wheel, steering column, steering gear, steering linkage and power steering mechanisms are assessed for proper operation of the steering system. These components are assessed organoleptically in terms of attachment to the vehicle structure, completeness, wear and tear, the severity of corrosion of metal components, condition of rubber covers and leakage of operating fluids used in these structures.

Streszczenie:

Układ kierowniczy razem z układem nośno-jezdnym i hamulcowym mają decydujące znaczenie na bezpieczeństwo w ruchu drogowym, podlegają one okresowemu sprawdzeniu w trakcie badania okresowego pojazdu na stacji kontroli pojazdów. Ocenie prawidłowości działania układu kierowniczego poddaje się koło kierownicy, kolumnę kierowniczą, przekładnię kierowniczą, mechanizm zwrotniczy oraz mechanizmy wspomagania. Elementy te są oceniane metodą organoleptyczną w zakresie: mocowania do konstrukcji pojazdu, kompletności, zużycia eksploatacyjnego, stopnia zawansowania korozji elementów metalowych, stanu osłon gumowych oraz wycieku płynów eksploatacyjnych stosowanych w tych konstrukcjach.

1. Introduction

In addition to the engine, the steering system is a key element of a motor vehicle. Owing to the engine, the vehicle gains the drive and the driver has control of speed, and owing to the steering system the driver decides about the direction in which the vehicle is going.

¹ dr inż. Tomasz Kądziołka
State University of Applied Sciences Nowy Sącz, Institute of Engineering
Zamenhofa 1A, 33-300 Nowy Sącz, Poland
e-mail: tkadziolka@ans-ns.edu.pl

² Mgr inż. Józef Janczura
Diagnostyka Łącko Company S.C.
ul. Zawodzie 2 33-380 Krynica - Zdrój, Poland

³ inż. Patryk Pietryga
Graduate PWSZ Nowy Sącz, Poland

The steering system is one of the sub-assemblies which are the most vulnerable to damage, that is why taking care of that system is very important to road traffic safety. Even though the strength of modern steering systems is increasing, this does not mean that they are indestructible. An average car use may, however, have problems with the identification of the causes of steering system unserviceability, as completely different causes of failure may be accompanied by similar symptoms.

During the proper daily use of the vehicle, the components of the steering system become worn out to some extent. Particularly in the present times, the steering system is heavily exposed to the activity of external factors, therefore the regular checks of that system are very important to road traffic safety. At present, there are many ways of diagnosing the damage to the steering system. We have relevant knowledge to conduct the required diagnostic tests, as well as necessary tools and equipment enabling the proper care of steering systems, which directly translates into road traffic safety.

2. The influence of the steering system on road traffic safety

May vehicle components have direct influence on our safety and that of other road users. The appropriate condition of the steering system is crucial for our full control of the vehicle. Many road accidents happen due to the bad technical condition of the vehicle, particularly of the steering system [3].

As mentioned previously, the task of the steering system is to provide the driver with the option to control the vehicle path as intended by the driver. This is achieved owing to an appropriate position of the steering wheel in relation to the conventional reference plane connected with the vehicle [2].

An appropriately adjusted steering system satisfies the following conditions:

- the wheels turned during the ride should automatically return to the position corresponding to the straight-ahead driving direction and ensure that this direction is maintained, despite the operation of lateral forces, which cannot be controlled by the driver;
- impact caused by road surface irregularities should not be felt on the steering wheel;
- vertical movements of the steered wheels caused by minor road unevenness should not cause a change in travel direction;
- steering should be easy and effective, with the use of small forces on the steering wheel.

Disturbing symptoms in the steering system, knocking, the vehicle veering to a side, steering play greater than expected, or uneven tyre wear, all indicate that the steering system diagnostics should be performed. Amateur attempts at repairs, dismantling or assembly are very risky and can end with a tragedy on the road. After diagnosing the system, a specialised repair workshop will take the necessary steps to restore the proper operation of the system. This may include replacing steering rod ends and rubber steering gear covers, adjusting the tension of the power steering pump belt, topping up the fluid in the power steering reservoir and venting the servo steering system. When the works related to the disassembly of the suspension and steering system are complete, wheel alignment should be measured. The works on the steering gear as well as the repairs and sealing of the servo system require special equipment. The steering and other systems in the vehicle must be inspected regularly [1].

3. Preparation of the vehicle for an inspection and wheel alignment

Before the test, the device with alignment measuring programme should be switched on. When the system is actuated, the Beissbarth alignment measurement programme is automatically launched. To start the toe-in measurement, information about the vehicle should be entered into the programme. For that purpose, the blanks highlighted by the programme should be completed, otherwise the test cannot continue. When information about the customer has been entered, the selection of the vehicle takes place. In the vehicle selection window, we complete the required blanks with information about the vehicle being diagnosed. When information about the vehicle is entered correctly, we will be given access to wheel camber and toe-in settings recommended by the manufacturer. Tests were conducted at a pit bench in a car workshop. Following the installation of measuring heads (fig.1) and connecting them to the computer, the compensation of the vehicle wheel rim run-out was conducted. As shown in fig.2, the wheel rim run-out compensation was required, or else the measurement would be vitiated by an error.

Following the preliminary measurement and the simulation of the straight-forward movement as well as that of the wheels turning right and left, the steered wheel alignment was measured on the vehicle being tested. The result was used for adjustment works (fig.3).



Fig.1 The vehicle on the test bench with the connected measuring head

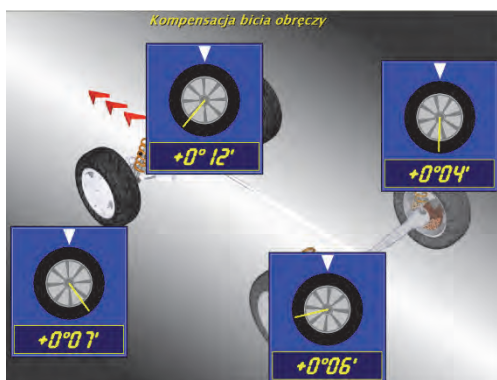


Fig.2 The compensation of the vehicle wheel rim run-out



Fig.3 Results of the vehicle wheel alignment measurement

When analysing fig.3, it may be stated that the wheel camber and caster are correct and that only the toe-in requires adjustment.

While watching the screen, the steering side rod should be adjusted as appropriate so that the white indicator will be located as close as possible to the value given by the manufacturer. During adjustment works, the results of our activities will be visible all the time as shown in fig.4. When the wheel has been adjusted, the thread lock should be tightened again while checking that the correct value is not changed. We perform the same action on the remaining wheels.



Fig.4 Toe-in adjustment and results for the wheels of the test vehicle

4. Analysis of test results

To compare and display the results, tests were conducted on vehicles of 2 different makes (Volvo v60 and Peugeot v12.00).

4.1. Volvo v60

Vehicle:		VOLVO v09.01 Volvo * S60 * Standard suspension * Manufacture: 2000-2009		
Rear axle		Input measurement	Measurement data	Output measurement
Camber	Left	-1°37'	-1°00' [+0°00'] +1°00'	-1°40'
	Right	-1°39'		-1°42'
Camber – maximum difference		+0°02'	[1°00']	+0°01'
Unilateral toe-in	Left	+0°16'	-0°06' [+0°06'] +0°06'	+0°16'
	Right	+0°07'		+0°08'
Total toe-in		+0°24'	-0°12' [+0°12'] +0°12'	+0°24'
Wheel off-set		+0°30'		+0°30'
Geometrical travel axis		+0°04'	-0°15' [+0°00'] +0°15'	+0°04'
Front axle		Input measurement	Measurement data	Output measurement
10° caster	Left	+3°58'	-1°00' [+4°00'] +1°00'	+2°57'
	Right	+3°59'		+4°28'
10° swivel pin inclination	Left	+13°19'		+21°13'
	Right	+15°34'		+21°25'
Camber	Left	-0°21'	-0°54' [-0°18'] +0°54'	-0°18'
	Right	-0°18'		-0°20'
Camber – maximum difference		-0°03'	[1°00']	+0°02'
Unilateral toe-in	Left	+0°15'	-0°03' [+0°03'] +0°03'	+0°04'
	Right	+0°12'		+0°04'
Total toe-in		+0°26'	-0°06' [+0°06'] +0°06'	+0°08'
10° total angle	Left	+12°59'		+20°55'
	Right	+15°14'		+21°05'

Fig.5 Results of wheel alignment measurements for the VOLVO v60

As can be read in fig.5, the unilateral toe-in of the front axle wheels deviated from the correct values. Whereas this toe-in should be set at +0°03' for both wheels, the unilateral left toe-in was +0°15' and the right was +0°12'. This is at considerable variance with information from the manufacturer and as such may make driving the vehicle more difficult, accelerate tyre wear and, in adverse weather conditions, also cause the loss of vehicle stability, which is undoubtedly a road traffic hazard. The remaining test parameters were within the error limits and needed no adjustment.

4.2. Peugeot v12.00

Vehicle:		PEUGEOT v12.00 PEUGEOT (EU) * 5008 * 5 seats * CRD * Manufactured: 2009-		
Rear axle		Input measurement	Measurement data	Output measurement
Camber	Left	-1°51'	-0°30' [-1°44'] +0°30'	-1°51'
	Right	-1°33'		-1°33'
Camber – maximum difference		+0°17'	[0°20']	+0°18'
Unilateral toe-in	Left	+0°17'	-0°04' [+0°21'] +0°05'	+0°17'
	Right	+0°10'		+0°10'
Total toe-in		+0°28'	-0°09' [+0°42'] +0°09'	+0°27'
Wheel off-set		+0°07'		+0°07'
Geometrical travel axis		-0°03'	-0°10' [+0°00'] +0°10'	-0°04'
Front axle		Input measurement	Measurement data	Output measurement
10° caster	Left	+4°08'	-0°30' [+4°42'] +0°30'	+4°02'
	Right	+4°17'		+4°15'
10° swivel pin inclination	Left	+12°19'	-0°36' [+12°42'] +0°24'	+11°36'
	Right	+7°44'		+7°32'
Camber	Left	-0°21'	-0°36' [-0°12'] +0°24'	-0°21'
	Right	-0°05'		-0°07'
Camber – maximum difference		-0°15'	[0°20']	-0°14'
Unilateral toe-in	Left	-0°03'	-0°04' [-0°10'] +0°05'	-0°09'
	Right	-0°01'		-0°10'
Total toe-in		-0°04'	-0°09' [-0°21'] +0°09'	-0°19'
10° total angle	Left	+12°01'		+11°16'
	Right	+7°37'		+7°26'

Fig.6 Results of wheel alignment measurements for the Peugeot v12.00

As can be read in fig.6, the unilateral toe-in was not within the acceptable limits as the unilateral left toe-in was -0°03' and the right was -0°01'. This is a considerable

difference compared to information from the vehicle manufacturer. The correct result should be within the limits of measurement data, which is $-0^{\circ}10'$. Such a difference in the test result poses a road traffic hazard as that difference may cause the vehicle to veer to a side, and lead to unexpected and unstable vehicle behaviour in road traffic, for example to skidding. Following adjustment work, the difference in the toe-in was remedied and restored to the measurement data from the vehicle manufacturer. As shown in fig.6, also front axle swivel pin inclination and the toe-in of the rear axle wheels do not coincide with the measurement data, but the difference is so small that it may be ignored at the moment. Wheel alignment should, however, be re-checked soon to assess whether the alignment error has grown bigger or remained the same. If the error value has grown, the deficiency should be rectified and appropriate adjustment performed.

5. The influence of diagnostic tests on road traffic safety

To depict the influence of diagnostic tests on road traffic safety more clearly, the number of road accidents in Łącko and Krynica Zdrój in 2019-2021 was compared with the number of technical inspections failed due to the technical condition of the steering system. In fig. 7, the relationship between road accidents and failed technical inspections in 2019-2021 is shown.

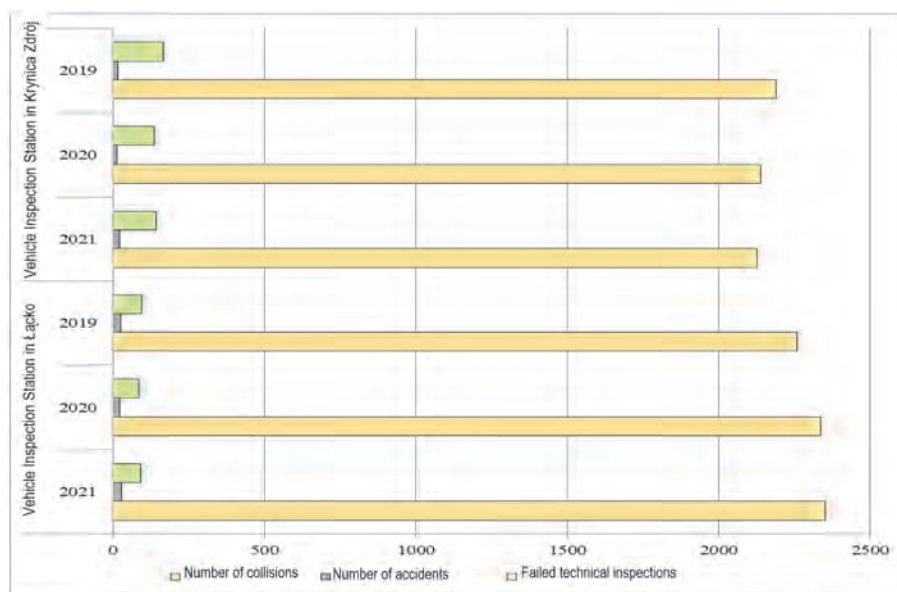


Fig.7 Relationship between road accidents, collisions and failed technical inspections in 2019-2021

The number of road accidents in Łącko keeps growing year by year. The number of collisions was 93 in 2019, and it was smaller by 4 in 2021, however. Although the number of failed technical inspections at the Vehicle Inspection Station in Łącko is falling, we note a decrease in the number of collisions, but an increase in the number of road accidents. The number of road accidents in Krynica Zdrój grows, too, but the number of collisions decreased in 2021 against 2019. In this case, the number of failed technical inspections also decreased over the three years. Based on the example of the town of Krynica Zdrój, we may notice a considerable influence of technical inspections on road traffic safety.

6. Conclusion

An unserviceable steering system poses a hazard not only to the driver of the given vehicle, but also to other road traffic participants. Following the analysis of the results of wheel alignment tests and damage to the steering system, it was noted that the drivers' awareness of the condition of their steering system is the most critical factor. Wheel alignment tests conducted during this research demonstrate that the weakest element is a person, who may often make a mistake. The steering system has powerful influence on road traffic safety, therefore attention should be paid to any symptoms of steering system malfunctioning, and the diagnostics of the system and wheel alignment measurements should be conducted regularly.

In Poland, owing to a compulsory system of periodic vehicle technical inspections, the steering system is checked during inspection activities. A preliminary inspection of the track wheel alignment is also conducted, owing to which the deficiencies arisen during vehicle operation can be found. Most vehicles users do not have sufficient knowledge which would enable them to interpret appropriately the symptoms appearing during vehicle operation and confirming the malfunctioning of the steering and wheel systems. That is why vehicle diagnostics during the periodic technical inspection is so important as, if any irregularities are found, the diagnostician will refer the vehicle for repair.

Such actions greatly contribute to better road traffic safety and, consequently, to better human health and sometimes life, which is the highest value. Indirectly, such actions will also prevent environmental contamination and pollution occurring as a result of road incidents or disasters in land traffic.

References

- [1] Dąbrowski M., Kowalczyk S., Trawiński G.; Diagnostyka pojazdów samochodowych; WSiP 2013
- [2] Myszkowski S.; Geometria kół i osi pojazdu cz. 1 i 2; WIADOMOŚCI Inter Cars S.A.; 2009
- [3] Gębiś P. Niezbędnik Diagnosty. Tarnów: AutoMex Centrum Motoryzacji 2020

PIPE ORGAN DIAGNOSTICS

DIAGNOSTYKA ORGANÓW PISZCZAŁKOWYCH

Tomasz KĄDZIOŁKA, State University of Applied Sciences Nowy Sącz ¹

Sławomir KOWALSKI, State University of Applied Sciences Nowy Sącz ²

Tomasz MOŃKO, University of Humanities and Economics in Lodz ³

Annotation:

As a musical instrument existing since ancient times, the organ has undergone many changes and its construction has been improved many times, developing from the most primitive structure consisting of few pipes to large, complicated instruments with several dozen thousand pipes. The instrument's action has also been improved from mechanical to currently used mechatronic action. This work presents the typical kinds of damage to the organ, organ diagnostics as well as the ways of rectifying the irregularities following from the use of the instrument in various temperatures and changeable humidity conditions.

Streszczenie:

Organy, jako instrument muzyczny istniejący już od starożytności, przechodziły wiele zmian i udoskonań w budowie od najbardziej prymitywnych, złożonych z kilku piszczałek, do skomplikowanych, wielkich instrumentów o dziesiątkach tysięcy piszczałek. Udoskonalana była także traktura instrumentu, od mechanicznej do stosowanej obecnie mechatronicznej. W pracy pokazano typowe uszkodzenia organów oraz ich diagnostykę i sposoby usuwania nieprawidłowości wynikających z eksploatacji instrumentu w różnych warunkach temperaturowych i zmiennej wilgotności powietrza.

1. Introduction

The pipe organ is the largest and most complicated musical instrument. Depending on its overall dimensions, the organ comprises from several thousand to between ten and twenty million components, which must be assembled together in a precise way [2]. The diagnostics of such a large number of components often becomes very difficult, or even impossible.

In this work, the diagnostics of the air preparation system and of the three types of organ action, namely mechanical, pneumatic and electromagnetic, is presented. The typical kinds of damage, the diagnostics and repair options, as well as the possible

¹ dr inż. Tomasz Kądziołka
Automotive School Complex in Nowy Sącz
18 Rejtana Street, 33-300 Nowy Sącz, Poland

² dr hab. inż. Sławomir Kowalski, prof. ANS
State University of Applied Sciences Nowy Sącz, Institute of Engineering
Zamenhofa 1A, 33-300 Nowy Sącz, Poland
e-mail: skowalski@ans-ns.edu.pl

³ dr, Tomasz Mońko
University of Humanities and Economics in Lodz
26 Sterlinga street, 90-212 Łódź, Poland

consequences of the lack of the proper diagnostics of the instrument have also been shown.

2. Air preparation

One of the areas of pipe organ diagnostics is air supply to the instrument, and suitable air preparation. Both too low and too high air pressure in the instrument results in the instrument being out of tune. The suitable volume of air in the organ is not insignificant, either. A small capacity blower will not satisfy the demand during, for example, playing Tutti [3].

Bellows (pumps) powered by human muscles would be used for air generation in the first organ models. That solution was improved, and this resulted in the invention of the blower. As mentioned previously, the pipe organ is an instrument which requires air supply at an appropriate constant pressure to function properly. The electric power demand of the largest organ blowers ranges from several to as much as approximately 450 kW (the organ in the Convention Hall in Atlantic City (NJ, the USA) features seven blowers of the total capacity of approximately 600 hpm, which is ca. 447.5 kW). The full blower capacity is not, however, necessary all the time. For this capacity to be required, elaborate cords would have to be played all the time on all stops (the so-called Tutti). Blower capacity is not utilised for most of the blower operation time, and the blower continuously draws a large amount of electricity and converts it to pressurised air which is, unfortunately, wasted (during the full inflation of the main blower, which is used as the air store), when the damper closes, and all excess air escapes through the pressure relief valve (fig.1). Full opening of the damper (the so-called shutter) occurs very rarely, therefore full blower capacity is not needed. To reduce blower electricity consumption and thus the instrument operation costs, an engine is used in the organ. The engine permits the continuous control of the revolution speed by means of the so-called inverter which, in accordance with the requirements, controls electric current phase frequency and thus bellows inflation. This significantly influences the reduction of electricity consumption to the quantity needed to maintain blower revolutions needed at a given time. The inverter itself is controlled owing to the air pressure sensor in the bellows, or by a mechanical bellows movement sensor. The application of such a solution in the organ permits the blower revolution speed, which is needed to maintain blower rate of delivery, to be adjusted as appropriate [4]. In the event of throttle valve malfunctioning (hang-up) or wrong indications of the air pressure sensor, the blower will supply an incorrect volume of air, which may result in tearing the bellows.

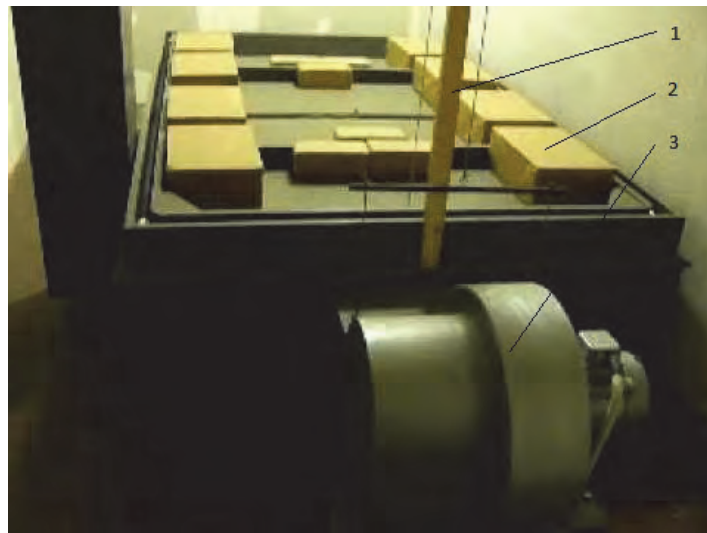


Fig.1 Organ bellows with an electric blower [3]
1 - mechanical shutter control system, 2 - bellow weights, 3 - electric blower

3. Organ action

The organ action is an assembly of devices through which the organ player controls wind chests i.e. their internal components (valves, dampers etc.) which distribute air to the various pipes fitted on the wind chests [1, 2, 5]. Action is an intermediate link passing on the player's intentions at the distance and, in certain action types, also performing the work related to, for example, the start-up of actuators in the wind chests for the player. In contemporary pipe organs, the following play action types can be found: mechanical, pneumatic and electromagnetic.

3.1. Mechanical action

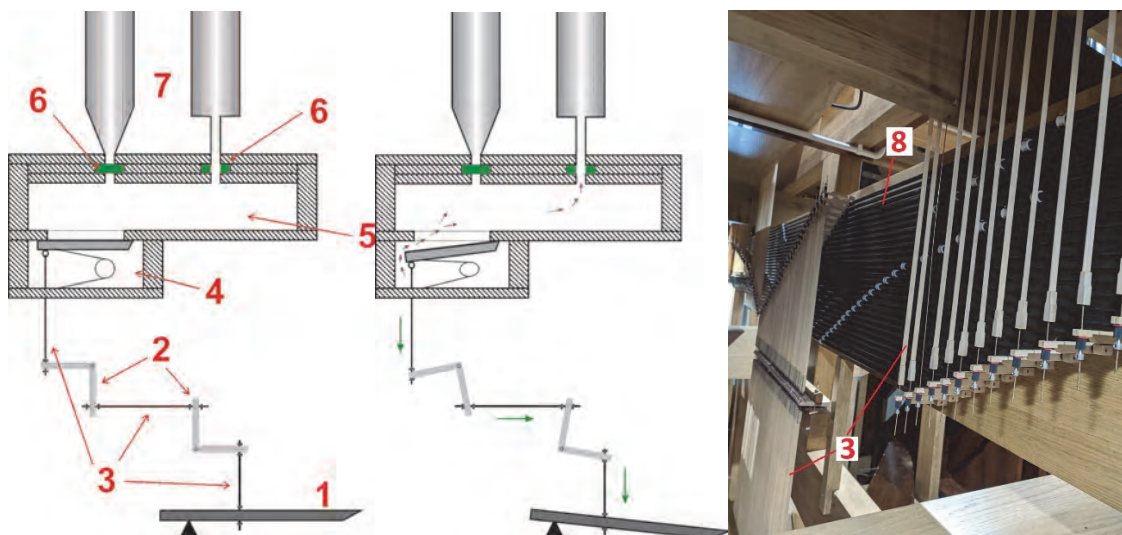


Fig.2 Mechanical play action
1 - key, 2 - angle sections, 3 - pilot wires, 4 - compressed air chamber,
5 - tone barrier, 6 - stop dampers, 7 - pipes, 8 - action rollers

In mechanical action, damage to the joints between the pilot wires and angle sections as well as flap valves in chamber 4 (fig.2) and between the pilot wires and the key occurs very frequently [2]. Even a small change in the position of a tuning nut causes the reduction of valve opening, and this may result in insufficient quantity of air in chamber 4, which leads to pipe being out of tune. If the flap valve is open too much, the valve may hang up and, even if the organist releases the force off the key, the valve will remain open and this will result in the pipes producing a sound continuously. It is therefore important for the organist to watch key performance. Key falling down or sticking out should be a signal for the organist to adjust the pilot wires.

3.2. Pneumatic action

Numerous attempts to improve the organ to obtain the lightness of play and simplify the organ construction process led to the invention of pneumatic action, in which there was no direct mechanical connection between the keys and valves in wind chests [1]. In that action, mechanical connections (pilot wires and angle sections) were replaced with compressed air, distributed through metal or flexible tubes. Thus, the key resistance issue was fully resolved; in addition, the option was obtained to locate the organ console at any place, although still close to the instrument, in view of air compressibility and the delay in the activity of the mechanism following from that air property.

Pneumatic play action (fig.3) has, therefore, many advantages, which make playing much easier compared to purely mechanical instruments, however, the construction of new instruments with that type of action has been almost completely abandoned in the present times. This would not have certainly happened if it were not for the main disadvantage of pneumatic solutions: the above-mentioned compressibility of air, which is used here not only to supply the pipes, but also to transfer the signal between the keys and air valves in wind chests.



Fig.3 Pneumatic action in the organ at St. Roch's in Nowy Sącz [3]
a - play action, b - stop action

1 - compressed air supply pipe, 2 - bellows and control pusher, 3 - bellows and control pusher actuating the valve supplying air to the row of bellows actuating air valves under pipes, 4 - adjusting bolt, 5 - bellows, 6 - a row of bellows actuating air valves under pipes, 7 - bellows and control pusher actuating the stop chamber air valve

As mentioned previously, the problem with pneumatic action consists in the delays following from air compressibility and thus in the lack of precision in sound production. By depressing a key on the instrument, the organist causes the opening of the valve which, through tube 1 (fig. 3) transports air to bellows 2. While acting on the pusher, bellows 2 opens the valve through which air flows into bellows 3, which opens the air control valve for air flowing to the strip with bellows 6 under the pipes. The reason for this solution is that there are pressure losses in the control system and bellows 2 would not be able to open the valve supplying air to the strip with bellows 6, which are situated under the pipes.

Action can be adjusted by means of bolt 4 (fig. 3), which enables a faster pressure drop after the valve controlled by the key has been closed. Bolt position cannot, however, be changed arbitrarily. If the bolt is screwed in too much, the pressure drop time in bellows 2 increases and causes the sound to be emitted even after the valve connected with the key has been closed. Quite to the contrary, if the bolt is screwed in too little, this may cause the lack of sound production after the key has been depressed with fingers.

When diagnosing pneumatic action, it is important to note that such action is susceptible to ambient conditions. Any movable components of that action (bellows and membranes) are made of leather which, in a low temperature, becomes less flexible, therefore a higher pressure is needed to cause the motion of a bellows made of such a material. That is why the operation of action should be checked before the winter season and any corrections made by means of adjusting bolt 4 (fig.3). Otherwise, a situation may occur where several to between ten and twenty keys will not play. In spring, when outdoor temperature increases and bellows leather becomes more flexible, adjustment by means of adjusting bolt 4 should be performed (fig.3), so that the so-called sound overlapping does not occur during play.

3.3. Electromagnetic action

Organ building has always used technology from other sciences almost on an ongoing basis. Owing to that, in the second half of the 19th century, along with the development of mechanical and electrical engineering, organs started to be equipped with one of the simplest automation elements, that being electromagnets [5]. This led to the dissemination of the new type of play action, namely electromagnetic. This action turned out to be an extremely simple solution in comparison to complicated combinations of pilot wires, angle sections and multiple gears in the mechanical organ (fig.2), or inaccurate, more complicated and quite unreliable relays and pneumatic valves (fig.3). This time, instead of wooden pull rods or air, electric cables were used to transfer the signal between the keys and wind chest valves. This provided organ builders with tremendous opportunities in the design of the general structure of the instrument. The play table may be located at any place as it has no direct mechanical connection with the remaining part of the organ. There is no need, either, to design and make complicated gears - a huge instrument may be built with the use of a small quantity of materials comprised by the action.

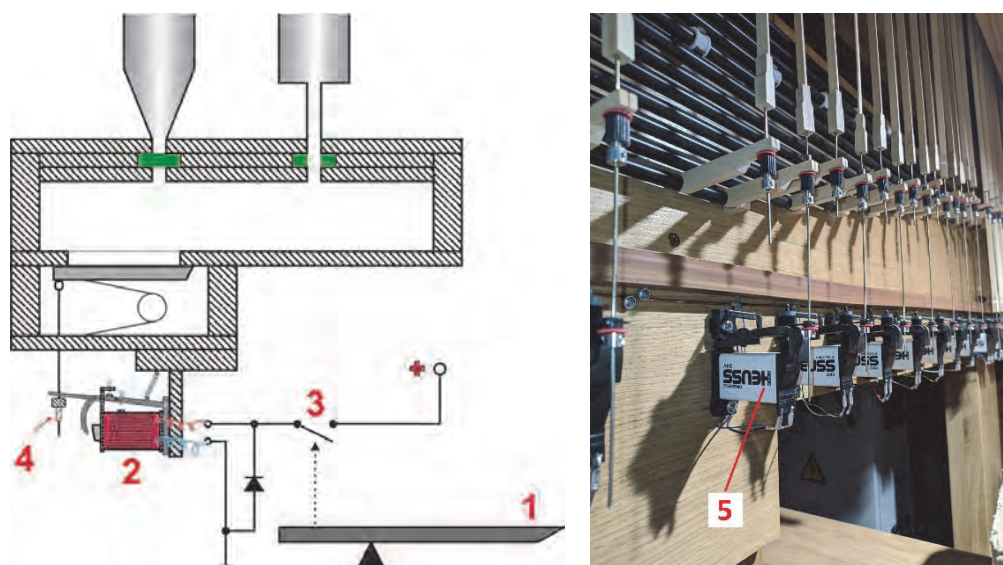


Fig.4 Electromagnetic play action

1 - key, 2 - electromagnet, 3 - key-actuated electromagnet switch, 4 - flap valve pull rod with adjusting elements, 5 - electromagnetic servo mechanism for mechanical action

The principle of operation of electromagnetic action is simpler than in the case of pneumatic action. In fact, this principle comes down only to the construction of any type of a wind chest, be it a flap or conical one, and placing, directly near the chest, a strip of electromagnets moving valve pull rods (fig.4). As signals from the keys are transferred via a cable bundle, the construction and instrumentation of the play table is of minor significance here. The precision of playing an electromagnetic instrument is very high. The keyboard works with a very light touch, and it is easy to make quick sound realisations without worrying as much as with pneumatic action that the valves will not have enough time to deliver sufficient air to the pipes. Therefore, an instrument built on the basis of electromagnetic mechanisms combines the advantages of mechanical (precision) and pneumatic (the ease of playing) action, and does not have their main disadvantages, that is keyboard resistance or delayed operation, either. Playing such an organ does not pose many problems in performing the works from any period.

Whilst electromagnetic play action is imperfect, it is often used in new instruments, mainly due to the ease of construction and rather high reliability. Placing electromagnets right next to wind chest valves enables the pull rod length to be minimised, which in turn makes the need for adjustment much less frequent and less troublesome. The elements of electromagnetic action can also be found in many new mechanical organs as play aiding elements 5 which help to overcome high key resistance (fig.4).

4. Conclusions

Analysing the development of the organ in history, one can state that many improvements have been introduced in this musical instrument. With the advent of electricity, organ builders started to introduce new solutions into organ building, and eventually replaced the whole mechanical action with electromagnets [3]. For a certain period of time, only organs with electromagnetic action would be built. It is only when the problem of the so-called “dead” sound became apparent that there was a return to mechanical action and possibly its aiding by electromagnets (fig.4).

The more sophisticated an instrument, the more difficult it is to diagnose. The organ is not a modern motor vehicle and is not equipped with a digital controller which registers and stores the faults in its memory, and the diagnostician equipped with an appropriate device can read and analyse them and make a repair on the basis of those faults.

The diagnostics of the mechanical faults of the organ is based on the knowledge, intuition and experience of the organ builder and his ear for music. While hearing a sound coming out of the instrument, a skilful specialist is able to find out the cause of the sound and determine the way in which the instrument should be repaired.

Literatura

- [1] Chwałek J.; Budowa organów; KUL; Lublin 1973.
- [2] Erdman J.; Organy; Wydawnictwo Archidiecezji Warszawskiej; Warszawa 1989.
- [3] Kądziołka T., Kowalski S., Mońko T.; Pipe organ evolution. From mechanical to mechatronical subsystems; Journal of Engineering, Energy and Informatics 1/2021
Wydawnictwo ANS Nowy Sącz 2021.
- [4] Stankiewicz M.; Barokowe organy w Kamieniu Pomorskim; VIOLIN; Kamień Pomorski 2014.
- [5] Zacharski K.; Amatorski leksykon Organowy; Wadowice 2009.

"SCHVÁLENÁ / APPROVAL" MAZIVA - SYSTÉMY A PROCESY

Jiří KLAPKA, KLAPKA TECHNIK, Jablonec nad Nisou ¹

Anotace:

Spolehlivost a plná funkčnost náhradních dílů je důležitým faktorem životnosti strojů. Výrobci strojů se už dlouhou dobu snaží používání kvalitních náhradních dílů dostat pod kontrolu. V praxi často použitím ověřených náhradních dílů podmiňují uplatnění garance. Také mazací oleje a plastická maziva jsou považována za standardní náhradní díly. Výrobci zařízení předepisují vlastnosti a normativy, které musí maziva splňovat, aby je bylo možné v garanční době používat. Jedním z možných řešení je také tzv. „schválení“ maziva. Vysoce propracovaným systémem procházejí zejména maziva určená pro automobily. Než může výrobce maziva prohlásit, že je uvolněno/schváleno mazivo k používání v garanční době, je potřeba splnit široké spektrum podmínek výrobce zařízení. Tyto „schvalovací“ systémy jsou typickou ukázkou, kudy se zřejmě v budoucnu bude ubírat schvalování maziv ve všech odvětvích.

1. Schvalovací systémy - charakteristika

Systémy na schválení maziv nabízejí globální pravidla pro partnerství. Co všechno se může v takovém partnerství požadovat nebo naopak doporučovat, je popsáno na následujících řádcích. Může to být skutečně „globální“ pohled. V dokumentacích můžeme najít třeba také toto:

- pravidla společných obchodních aktivit,
- pravidla Společného kodexu chování na trhu a vzájemného respektu,
- požadavek společného pohledu na životní prostředí,
- požadavky na ekologii, používání povolených materiálů a postupů, dodržování environmentálních zákonů,
- požadavky na zavedení environmentálního managementu (ISO 14001),
- požadavky na dodržování pravidel vztahujících se k odpadovému hospodářství a recyklaci,
- požadavky na dodržování lidskoprávních zásad - žádná otročká práce, žádné zaměstnávání dětí,
- dodržování pracovně právních vztahů - pracovní smlouvy, pracovní doba, mzdy, dovolené apod.,
- nulová tolerance diskriminace na pracovišti - etnický původ, barva kůže, pohlaví, náboženství, národnost, sexuální orientace, sociální původ, věk, fyzická nebo psychická omezení, rodinný stav, těhotenství, členství v odborových organizacích nebo politická příslušnost,
- nulová tolerance obtěžování a šikany na pracovišti,

¹ Jiří Klapka
certifikovaný Tribodiagnostik
KLAPKA TECHNIK
Na úbočí 4333/23, 466 05 Jablonec nad Nisou - Rýnovice
mobil: +420 739 550 935, e-mail: klapka.technik@gmail.com

- dodržování pravidel bezpečnosti práce - identifikace, školení, ochranné pomůcky, protipožární ochrana, havarijní plány, vše v souladu s GHS, zajištění první pomoci a ošetření,
- dodržování pravidel svobody sdružování - odborové organizace,
- dodržování transparentních obchodních vztahů bez korupčního jednání, dodržování pravidel volné soutěže, nezneužívání informací, ochrana důvěrných informací, nulová tolerance právní špinavých peněz,
- dodržování pravidel ochrany a nakládání s osobními údaji,
- transparentnost původu používaných materiálů,
- doporučení k tvorbě pravidel vnitřního chování na pracovišti (kodex chování) - tvorba sociálních, etických a ekologických standardů,
- tvorba a pravidla vedení dokumentace,
- tvorba systému vzájemné informovanosti a napravování chyb, atd.

2. Požadavky na výrobce maziva (formulace)

Samotný „schvalovací“ systém lze rozdělit do dvou rovin. Co musí předložit žadatel (výrobce oleje, výrobce aditiv) a co za to „dostane“ od výrobce zařízení. Nejdříve se podíváme na požadavky pro výrobce maziv.

a) Oficiální dopis

Tento dopis není vždy součástí požadavkové dokumentace. Pokud jím ale je, obsahuje přesnou adresu a další identifikační údaje o žadateli. Informace, co má být „schváleno“, pro jakou specifikaci, normu, pod jakým obchodním názvem (v případě výrobce aditiv, kód formulace).

b) Dokumentace

Tato část je požadována téměř vždy. Zpravidla obsahuje:

- kompletní složení oleje (včetně typů základových olejů); v případě „reblendu“ číslo formulace, v případě „rebrandu“ obchodní název původního oleje,
- obchodní název oleje, identifikace výrobce oleje,
- parametry oleje - viskozita, TBN, bod vzplanutí apod., prvková analýza charakterizující konkrétní formulaci,
- charakteristiku výrobce a výrobního zařízení - např. adresu a typ výrobního zařízení, certifikace systému, identifikace výrobních šarží ...

Jak může taková dokumentace vypadat a jaké údaje mohou být její součástí, je zobrazeno na následujícím obrázku.

Dokumentace ke schválení

Základní informace

Company	xxxx	Normy	
Trade Name	xxxx	xx	☐
Oil Code	IME xxx	xx	☐
SAE-Class	SW-20	xx	☐
Date	xx.xx.xxxx	xx	☐

Typ „schválení“

First Approval of a new Formulation (Original Approval)	☐
Prolongation Approval	☐
Reblend Approval	☒

Informace o složení

Oil Code	IME xxx		
SAE-Class	SW-20		
Additive-Package	xx	10.2 (+/-0,1)	Mass %
VI-Improver	xx	6.4 (+/-0,1)	Mass %
Pour Point Depressant	xx	0.03 (+/-0,0025)	Mass %
Additional Additives, Boosters	xx 1	0.2 (+/-0,03)	
	xx 2	2.0 (+/-0,05)	
Base Oils			
Base Oil a: Trade Name/Type (Gp)/Visc. Class/Manufacturer	xx 1	60.75	Mass %
Base Oil b: Trade Name/Type (Gp)/Visc. Class/Manufacturer	xx 2	20.0	Mass %
Base Oil c: Trade Name/Type (Gp)/Visc. Class/Manufacturer	xx 3		Mass %
IR-Spectra, (Transmission spektra processed with a layer of 100 ± 1 µm)	požadavek		Přiloha

Chemické složení

Sulfated Ash	0.5	+/-5% *	Mass %
Zinc Content	0.07	+/-5% *	Mass%
Phosphorus Content	0.07	+/-5% *	Mass%
Sulfur Content	0.10	+/-5% *	Mass%
Calcium Content	0.10	+/-5% *	Mass%
Magnesium Content	0.06	+/-5% *	Mass%
Molybdenum Content	0.1	+/-5% *	Mass%
Silicon Content	0.0006	+/-5% *	Mass%
Nitrogen Content	0.13	+/-5% *	Mass%
Chlorine Content	0.002	+/-5% *	Mass%
Bromine Content	0.0	+/-5% *	Mass%
Barium Content	0.0		not allowed
Titan Content	0.0	+/-5% *	Mass%
Total Base Number	6.4	+/-5% *	mg KOH/g
Total Acid number	2.6	+/-5%	mg KOH/g
Density, 15°C	0.842	+/-5% *	g/cm³
CCS at -35°C	5800	+/-5% *	mPa.s
Kin. Viscosity at +40°C	45.4	+/-5% *	mm²/s
Kin. Viscosity at +100°C	8.5	+/-5% *	mm²/s
HTHS at +150°C und 10⁶s⁻¹	2.7	2,6 – 2,85*	mPa.s
Viscosity Index	158	+/-5% *	
Evaporation Loss	10.0		Mass%
Flash Point	235		°C
Pour Point	-40		°C

c) Vzorky

U některých specifikací a norem je vyžadováno zaslání vzorku oleje. Objemy jsou různé od stovek ml po několik litrů. Slouží vždy k identifikaci konkrétního oleje.

d) FT-IR spektrum

Někteří výrobci požadují i dodání originálního FT-IR spektra. Znovu pro identifikaci konkrétního oleje.

3. Materiály a benefity poskytnuté výrobcem zařízení

V případě splnění podmínek schválení, poskytne výrobce zařízení některé benefity a dokumentaci, která opravňuje výrobce oleje nabízet konkrétní olej pro používání v době garancí. Ty mohou obsahovat následující akce a materiály.

- Oficiální dopis „schválení/approval maziva. Zpravidla obsahuje Obchodní název výrobku, výrobce, některé technické informace (např. kód formulace), klasifikaci, normu, pro kterou je olej „schválen“, případně je také součástí informace, jak dlouho toto „schválení“ platí.
- Dalším bonusem je uvedení do dokumentace výrobce zařízení. Akceptované oleje bývají zveřejněny na www stránkách, v manuálech a technické dokumentaci ke stroji nebo vozidlu, někteří výrobci vydávají i speciální materiály týkající se všech provozních kapalin.

V jakém rozsahu jsou požadovány informace a jak probíhá komunikace a zveřejňování „schválených“ maziv si pro některé výrobce motorů můžeme prohlédnout v následující tabulce.

Specifikace	Výrobce oleje				Výrobce automobilu/motoru			Poplatky					
	Oficiální dopis	Formulace	Vzorek oleje	FT-IR spektrum	Oficiální dopis	Doba platnosti	Záznam ve firmní dokumentaci	Original	Reblend	Rebrand	Změna formulace	Obnovovací poplatky	Malé změny dokumentace
BMW	Ano	Ano	Ano	Ne	Ano	2 roky	Ano	5000 €	3000 €	2000 €	4000 €	500 €	Ne
CUMMINS	Ne	Ne	Ne	Ne	Ano	1 rok	Interní	-	15000 \$	15000 \$	-	Ano	-
Detroit Diesel	Ano	Ano	Ano	Ne	Ano	1 rok	Ano - www	1050 \$	1050 \$	1050 \$	-	Ano 500 \$	100-200 \$
Mack EO-M Plus	Ne	Ano	Ano	Ne	Ano	5 formulací	Ano - www	1080 \$	1080 \$	1080 \$	-	Ne	100-200 \$
Volvo VDS-4 / Mack EO-O Premium Plus	Ne	Ano	Ano	Ne	Ano	2 roky	Ano - www	1080 \$	1080 \$	1080 \$	-	Ne	100-200 \$
Volvo VDS-4.5 / Mack EOS-4.5	Ne	Ano	Ano	Ne	Ano	2 roky	Ano - www	0	0	9	-	-	-
MAN	Ano	Ano	Ano	Ne	Ano	2 roky	Ano	5000 €	2500 €	2500 €	5000 €	-	-
MERCEDES-BENZ	Ano	Ano	Ano	Ne	Ano	6 let	Ano	2500 €	2500 €	2500 €	1250 €	-	-
MTU	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	-	Ano	1250-1750 €	1000-1250 €	1000-1250 €	625 €	-	-
Dexos	Ne	Ano	Ano	Ne	Ne	-	Ano	1000 €	3150 €	3150 €	1000 €	Ano	-
PORSCHE	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	3 roky	Ano	3250 €	3250 €	3250 €	3250 €	Ne	Ne
PSA	Ano	Ano	Ne	Ano	Ano	1 rok	Ano	20000 €	20000 €	20000 €	20000 €	Ne	Ne
RENAULT (passenger cars)	Ano	Ano	Ano	Ne	Ano	4 roky	Ano	5800 €	5800 €	5800 €	5800 €	Ne	Ano
VW	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	3-5 let	Ano	-	2000 €	1340 €	-	Ne	Ne

*/ Informace v tabulce, včetně cen jsou orientační a odpovídají údajům v době zhotovení tabulky

4. Závěr

Z poslední tabulky může být tato certifikace mazacích olejů pro výrobce olejů také velmi finančně náročná. Většina olejů má předpoklady splnit požadavky více specifikací a norem. Pro méně kapitálově silné výrobce to může být i velký problém. Přesto jsou tato „schválení“ vyžadována stále větším počtem výrobců zařízení. Co základního výrobcům olejů a uživatelům přinášejí:

- Výrobcům oleje přinášejí kompletně otevřený trh s náhradními díly, možnost se účastnit výběrových řízení pro „první plnění“ u výrobce a výběrových řízení u servisních organizací a uživatelů provozujících vozidla nebo stroje v záruce. V neposledním řadě lze označit „schválení“ oleje za marketingovou výhodu. Také umožňují se částečně podílet na případných úspěších výrobce zařízení.
- Z pohledu uživatele lze říci, že jsou „schválená“ maziva jistotou a zjednodušením při výběru mazacího oleje.

VYHODNOTENIE TECHNICKÝCH KONTROL ZÁŽIHOVÝCH SPAĽOVACÍCH MOTOROV

Ján KOSIBA, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF ¹

Martin PAUMER, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF ²

Zdenko TKÁČ, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF ³

Anotácia:

Predložený príspevok je zameraný na štatistické vyhodnotenie kontrolovaných vozidiel vybavených zážihovým motorom na vybranom pracovisku stanice technickej a emisnej kontroly. Hlavnou úlohou príspevku je zistiť, ktoré chyby sa vyskytujú najčastejšie pri výkone technických a emisných kontrol a počet vozidiel, ktoré sú spôsobilé, dočasne spôsobilé a nespôsobilé. Z celkového počtu 204 kontrolovaných vozidiel s emisným systémom BKAT bolo spôsobilých 93%, dočasne spôsobilých 3% a nespôsobilých 4%. Ďalej celkového počtu 965 kontrolovaných vozidiel s emisným systémom RKAT bolo 94% spôsobilých vozidiel, 1% dočasne spôsobilých a 5% nespôsobilých vozidiel. A z celkového počtu 491 kontrolovaných vozidiel s emisným systémom RKAT - OBD bolo spôsobilých 95%, dočasne spôsobilých 2% a nespôsobilých vozidiel 3%. Z výsledných štatistík je možné vyhodnotiť, načo je potrebné upriamiť pozornosť pri príprave vozidla na technickú a emisnú kontrolu.

1. Úvod

Každá technická kontrola sa vykonáva na schválenom pracovisku, ktoré musí spĺňať zákonom stanovené požiadavky. Vykonáva sa podľa stanovených postupov v zmysle metodických pokynov vydaných ministerstvom dopravy a výstavby SR. Každý jeden metodický pokyn tvorí kontrolnú skupinu, jednotlivú časť vozidla na ktorej môže byť vyznačená chyba, ktorá ma pridelený svoj jedinečný kód. Po skončení technickej kontroly dostane prevádzkovateľ vozidla okrem osvedčenia o technickej kontrole a preferovanej nálepke s vyznačenou platnosťou kontroly aj protokol o technickej kontrole vozidla, v ktorom sa jednotlivé chyby zaznamenali s vysvetlivkami čo konkrétna chyba znamená. Jednotlivé chyby zaraďujeme do troch tzv. veľkých skupín chýb, ktorými sú: ľahké chyby „A“, vážne chyby „B“ a nebezpečné chyby „C“. Vozidlo sa následne nato hodnotí troma spôsobmi: spôsobilé, dočasne spôsobilé (na 60 dní) a nespôsobilé na prevádzku na pozemných komunikáciách.

Technickú kontrolu definuje zákon č 106/2018 Z.z. ako prehliadku a posúdenie technického stavu vozidla, komponentov alebo samotných technických jednotiek. Technická kontrola sa zameriava predovšetkým na bezpečnosť používania vozidla. Jej cieľom je odhaliť vozidlá, ktorých technický stav nie je dostatočne dobrý na to, aby mohli

¹ doc. Ing. Ján Kosiba, PhD.

Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Technická fakulta
Ústav poľnohospodárskej techniky, dopravy a bioenergetiky
Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra, Slovenská republika
tel.: +421 37 641 5776, e-mail: jan.kosiba@uniag.sk

² Ing. Martin Paumer
e-mail: xpaumer@uniag.sk

³ prof. Ing. Zdenko Tkáč, PhD.
tel.: +421 37 641 4530, +421 37 641 4115, e-mail: zdenko.tkac@uniag.sk

byť používané na cestách. Ekologický aspekt je v technickej kontrole tiež obsiahnutý, i keď v menšej miere.

K ohrozeniu bezpečnosti premávky prichádza poruchou, zlyhaním alebo neželaným pôsobením niektorej zo vzájomne sa ovplyvňujúcich častí systému.

Technická kontrola znižuje pravdepodobnosť technickej poruchy vozidla, ktorá by mohla ohroziť bezpečnosť premávky buď priamo alebo nepriamo, pôsobením na ostatné časti systému.

2. Popis výkonu technickej kontroly

Technické kontroly sa vykonávajú na základe metodických pokynov kontrolných skupín č. 0-9 vydaných Ministerstvom dopravy a výstavby SR (MD a V SR) v zmysle zákona č. 106/2018 Z.z.. Na vykonávanie technických kontrol sa smú používať len meradlá, prístroje a monitorovacie záznamové zariadenia, ktorých vhodnosť bola schválená Ministerstvom dopravy a výstavby SR.

Začiatok technickej kontroly je už na základe predložených dokladov od prevádzkovateľa vozidla alebo vodiča vozidla, ktorými sú Osvedčenie o evidencii, prípadne COC certifikát.

Na základe hore uvedených dokladov technik nahrá do celoštátneho informačného systému pre TK identifikátory vozidla z osvedčenia, vytlačí si čiarový kód, pod ktorým danú kontrolu zaeviduje v systéme, čo je 1. krok začatia technickej kontroly. Následne sa prechádza k samotnej kontrole vozidla na kontrolnej linke.

2.1 Meranie emisií na zážihovom motore

Pri emisnej kontrole s emisným systémom BKAT meriame na analyzátore výfukových plynov BOSCH 250-EU. Teplotu motora meriame prostredníctvom sondy BOSCH BEA 250, ktorá by mala dosahovať min 60 °C, ďalej meriame aj uhol vzopnutia kontaktov prerušovača pri voľnobežných otáčkach. Predstih zážihu tzv. predzápal pri voľnobežných a zvýšených otáčkach predpísaných výrobcom vozidla prostredníctvom motortesteru TECNOTEST 138. Vyhodnocujú sa emisné hodnoty CO, HC, CO_{cor}, CO₂, O₂, lambda a otáčky. Namerané údaje manuálne zapíšeme do celoštátneho informačného systému do internetovej aplikácie AISEK. Pri emisnom systéme R-KAT, s katalyzátorom meriame na analyzátore výfukových plynov BOSCH BEA 750, kde skontrolujeme pri zvýšených otáčkach indikované hodnoty CO a lambda. Pri voľnobežných otáčkach indikované hodnoty CO a HC s doplnkovými hodnotami: CO₂, O₂ a lambda. Otáčky motora snímame pomocou snímača otáčok NUSBAUM REVOLUTION alebo snímaním zvlnenia napätia v sieti vozidla, alebo prostredníctvom rozhrania OBD, ak je ním vozidlo vybavené. Pri emisnom systéme RKAT - OBD otáčky motora snímame výlučne z elektronickej riadiacej jednotky prostredníctvom komunikačného zariadenia OBD. Namerané údaje automaticky odosielame do celoštátneho informačného systému do internetovej aplikácie AISEK.

Pri emisnej kontrole zážihového motora s emisným systémom NKAT, s neriadeným katalyzátorom, meriame na analyzátore výfukových plynov BOSCH 250-EU, kde sa postupuje presne ako pri emisnom systéme BKAT.

Údaje potrebné na vpracovanie štatistiky získame zo stanice technickej a emisnej kontroly FREUS s.r.o., ktorá sa nachádza v bývalom areály ACHP vo Veľkom Krťiši. Každé vozidlo ktoré sa podrobí technickej a emisnej kontrole sa zaznamená do celoštátneho informačného systému technických a emisných kontrol. Z tohto informačného

systému si vyfiltrujeme podľa jednotlivých mesiacov vozidlá so zážihovým motorom, vybavené konkrétnym emisným systémom so stupňom jednotlivých chýb označené ako spôsobilé, dočasne spôsobilé, nespôsobilé na premávku na pozemných komunikáciách.

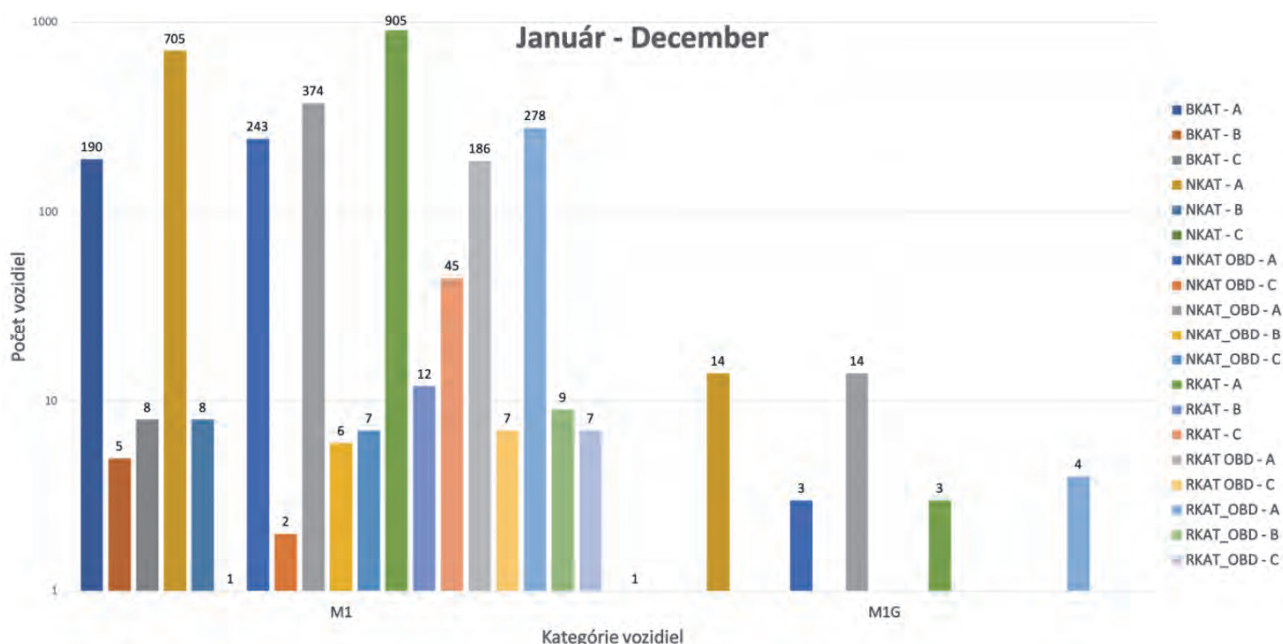


Obr.1 Analyzátory výfukových plynov BOSCH 250 a BOSCH 750

2.1 Výsledky práce

Z obrázku 2 vyplýva, že najviac kontrovaných vozidiel bolo s palivovým systémom RKAT, až 905 vozidiel s ľahkou chybou, kde sa najčastejšie vyskytuje nečitateľný identifikátor typu motora alebo signalizácia minimálneho množstva paliva.

Prevádzkovateľom vozidiel odporúčame jednoznačne klásť najväčší dôraz kontrolnej skupine 1 - brzdové zariadenie, ktoré má najväčší vplyv na bezpečnosť. Pozornosť by som upriamil najmä na slabý účinok prevádzkovej brzdy a parkovacej brzdy, ktorá má mať najmenej 16% u všetkých kategóriách vozidiel. Ďalej nesúmernosť brzdenia kolies náprav prevádzkovej brzdy, ktorá nesmie presiahnuť 30% a má za následok vybočenie zo smeru jazdy pri brzdení. Nesmieme zabudnúť aj na kolísanie brzdnej sily. Ako druhú skupinu ktorej treba upriamiť pozornosť, je skupina 2 - riadenie vozidla, pri ktorej bolo najviac chýb zistených ako netesnosť mechanizmu riadenia. V prevodke riadenia, v kĺboch a pákach alebo tyčí riadenia boli nadmerné vôle. Pri svetlách to je činnosť brzdových svetiel, buď nesvieti vôbec alebo nevyžaruje schválenú červenú farbu. Funkčnosť osvetlenia na vozidle, obrysové svetla a osvetlenie evidenčného čísla.



Obr.2 Štatistika chýb v sledovanom období

Veľmi často vozidlá nemajú správne nastavený sklon lúčov stretávacích svetlometov. Pri technickej kontrole základného nastavenia svetlometu uvedeného na štítku dokážeme tento problém ľahko odstrániť. V prevádzke to však oslňuje protiidúce vozidlá, berme preto ohľad nad všeobecným ohrozením ostatných vodičov.

Veľmi jednoducho rozpoznáme aj netesnosť motora a prevodovky a to, či nám neunikajú nejaké prevádzkové náplne pri vozidle v pokoji. Ďalej je veľmi často vozidlo vyhodnotené ako dočasne spôsobilé len kvôli tomu, že nemá v osvedčení o evidencii uvedený správne zápis o spájacom zariadení, ktoré si vie pred blížiacou sa technickou kontrolou včas zapísať na príslušnom okresnom úrade, z pohľadu technickej kontroly sa žiaľ jedná o vážnu chybu. To isté platí aj pre nárazníky a systémy čelnej ochrany, navijaky, výstražné svetlá, že nespĺňajú prepísané podmienky ako aj nečitateľné identifikátory VIN, výrobný štítok pre ktoré sa stáva vozidlo dočasne spôsobilé.

Pred emisnou kontrolou si treba skontrolovať stav paliva a či máme zátku veka palivovej nádrže. Ďalej či nemáme nadmieru opotrebované palivové potrubie a hadice paliva, oleja, kvapaliny a či sú určené pre ropné produkty. Pri elektrickej kabeláži treba upriamiť pozornosť obnaženým častiam káblov, ich trás často krát vedúcich okolo horúcich, ostrých a rotujúcich častí motora kde je vysoká pravdepodobnosť skratu a následnému vzniku požiaru na vozidle. Pred samotnou emisnou kontrolou je dobre motor zahriať - nakondicionovať na prevádzkovú teplotu, najmä v zimnom období.

3. Záver

Z celkového počtu 204 kontrolovaných vozidiel s emisným systémom BKAT bolo spôsobilých 93%, dočasne spôsobilých 3% a nespôsobilých 4%. Ďalej celkového počtu 965 kontrolovaných vozidiel s emisným systémom RKAT bolo 94% spôsobilých vozidiel, 1% dočasne spôsobilých a 5% nespôsobilých vozidiel. A ďalej z celkového počtu 491 kontrolovaných vozidiel s emisným systémom RKAT - OBD bolo spôsobilých 95%, dočasne spôsobilých 2% a nespôsobilých vozidiel 3%.

V praxi to znamená, že najviac kontrolovaných vozidiel sme mali s emisným systémom s riadeným katalyzátorom - RKAT, bolo ich až 965, čo činí až 58% z celkového počtu prijatých vozidiel vybavených zážihovým motorom. Táto práca môže prevádzkovateľom vozidiel alebo autoservisom priblížiť jednotlivé kontrolné skupiny technickej kontroly a načo zamerať pozornosť v príprave vozidla na TK a EK.

PodĎakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Dopytovo-orientovaný výskum pre udržateľné a inovatívne potraviny, Drive4SiFood 313011V336, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatura

- [1] Metodický pokyn MDaV SR č. 32/2018, na vykonávanie emisnej kontroly pravidelnej motorových vozidiel so zážihovým motorom s nezdokonaleným emisným systémom, so zážihovým motorom so zdokonaleným emisným systémom a so vznietovým motorom
- [2] Paumer, M. Štatistika výsledkov STK a EK kontrolovaných vozidiel vybavených zážihovým motorom na vybranom pracovisku, Diplomová práca, Nitra 2019
- [3] Vyhláška č. 138/2018 Z. z. Vyhláška Ministerstva dopravy a výstavby Slovenskej republiky, ktorou sa ustanovujú podrobnosti v oblasti emisnej kontroly
- [4] Zákon č. 106/2018 Z.z. o prevádzke vozidiel v cestnej premávke a o zmene a doplnení niektorých zákonov

SPECIFIKA VYVAŽOVÁNÍ HYDROALTERNÁTORŮ

SPECIFICS OF HYDROGENERATORS BALANCING

Lubomír LAZAR, VIBROCONTROL CZ, Brno ¹

Anotace:

Velké hydroalternátory patří ke strojům, které jsou s ohledem na svoji hmotnost a rozměry kompletovány až na díle. Při uvádění do provozu je pak nezbytné jejich rotory vyvážit. Tento proces se vyznačuje řadou specifík, o kterých pojednává následující příspěvek.

Annotation:

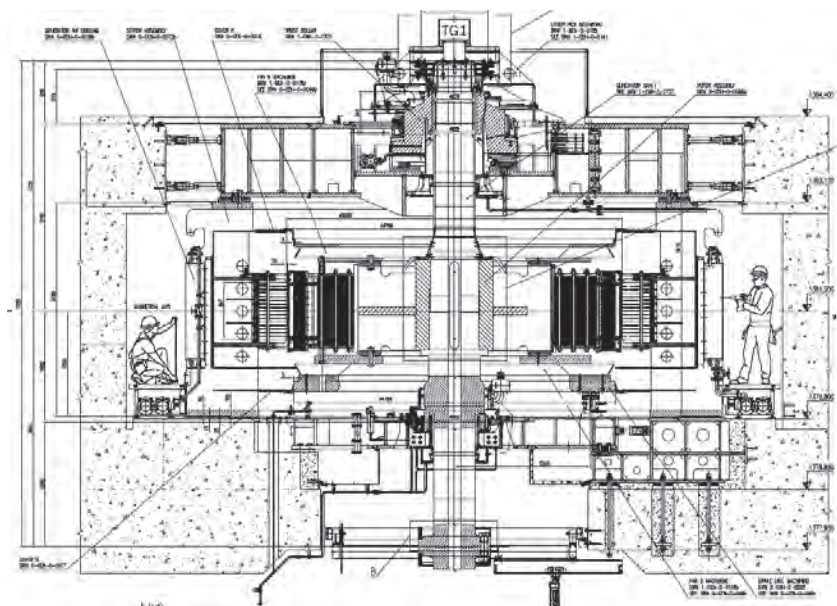
Large hydrogenerators belong to machines, which with respect to their weight and dimensions are assembled up in site. It is then necessary to balance their rotors during commissioning. This process is characterised by a number of specificities, which are discussed in the following paper.

1. Úvod

Jednou z hlavních příčin mechanického kmitání jsou dynamické síly vzniklé nevyvážeností rotujících částí strojů a statistiky také vykazují nevyváženost jako jednu z nejčastějších příčin poškození strojů.

To platí i pro velké hydroalternátory ve vertikálním uspořádání, které s ohledem na svoji hmotnost a rozměry jsou kompletovány až na díle. Jejich vibrace jsou jedním ze základních parametrů sledovaných při uvádění do provozu a případné vysoké hodnoty na frekvenci otáček jsou vždy prvně řešeny provozním vyvažováním.

¹ Ing. Lubomír Lazar
VIBROCONTROL CZ
Kotlanova 6, 628 00 Brno
mobil: +420 734 616 686, e-mail: lubomir.lazar.email@gmail.com



Obr.1 Řez hydroalternátorem s vertikálním uspořádáním

2. Vyvažování tuhých rotorů

Z hlediska vyvažovací techniky patří rotory velkých hydroalternátorů do kategorie tuhých. Norma ČSN ISO 21940-11 „Vibrace-Vyvažování rotorů“ definuje rotor jako tuhý, když lze jeho průhyb způsobený rozložením nevyváženosti zanedbat se zohledněním dohodnuté tolerance nevyváženosti při jakýchkoliv otáčkách až do maximálních provozních otáček. Jinými slovy za tuhý považujeme takový rotor, který se za rotace působením odstředivých nevyvážených sil nedeformuje (jeho osa zůstává přímá) - nemění svůj tvar ani se změnou otáček, ani se změnou uložení. Rotory, které nesplňují výše uvedené podmínky, jsou považovány za rotory pružné.

Jako kritérium pro rozdělení rotorů na tuhé a pružné platí podmínka:

$$n \leq \frac{1}{2} n_k$$

kde n jsou provozní otáčky a n_k první kritické otáčky rotoru na absolutně tuhých ložiskových podporách.

Vázat kritérium pro dělení rotorů na tuhé a pružné na kritické otáčky je správné proto, že pak odpadá závislost na naladění celé mechanické soustavy. Se změnou tuhosti ložiskových podpor se totiž mění výkmitová čára systému tak, že se zmenšuje ohybová deformace hřídele a zvětšují se výchylky v místech ložiskových podpor. Při velké poddajnosti podpor se hřídel prakticky nedeformuje ani při rezonančních otáčkách soustavy a chová se jako tuhé těleso.

Pro vyvažování tuhých rotorů platí [1]:

- tuhý rotor se může vyvažovat při libovolných otáčkách. Jedinou podmínkou je, aby byly nižší než jsou mezní otáčky, při nichž rotor přestává být tuhý,

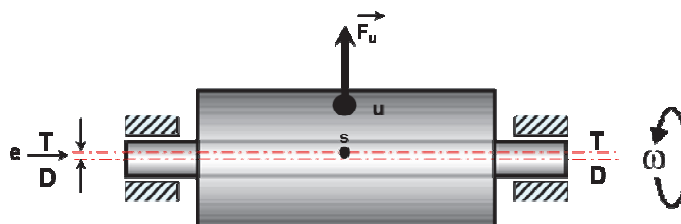
- tuhý rotor lze vyvažovat ve dvou, libovolně na rotoru umístěných vyvažovacích rovinách.

3. Druhy nevyváženosti

Podle rozdělení nevyvážku po délce rotoru se u tuhého rotoru rozlišují dva druhy nevyváženosti:

- Statická nevyváženost (chyba v těžišti)

Tato chyba vyvolává paralelní posunutí hlavní osy setrvačnosti vůči ose rotace, přičemž jejich vzdálenost současně odpovídá posunutí těžiště rotoru



Obr.2 Statická nevyváženost

kde e posun těžiště

s těžiště

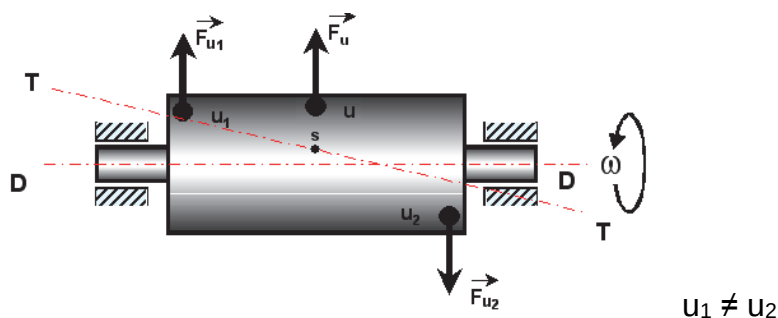
u hmotnost nevyvážku (těžký bod)

$D-D$ osa rotace (čepů)

$T-T$ hlavní osa setrvačnosti

- Dynamická nevyváženost (kývání)

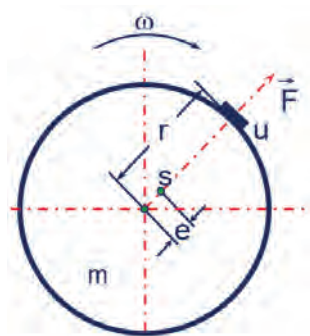
Hlavní osa setrvačnosti svírá s osou rotace určitý úhel, hmotnost nevyvážků je různá



Obr.3 Dynamická nevyváženost

Působení nevyvážku si objasníme na rotujícím kotouči s hmotností „ m “.

Přebytek hmotnosti „ u “ na poloměru „ r “ vyvolá vychýlení těžiště z osy rotace o „ e “ a odstředivou sílu $F = u \cdot r \cdot \omega^2$, přičemž platí rovnováha sil $e \cdot m = u \cdot r$



Obr.4 Rotující kotouč s hmotou nevývažku u

Součin $u \cdot r$ označujeme jako nevývažek „U“ [g.mm] a „e“ jako specifický nevývažek vztahovaný na hmotu [g.mm.kg⁻¹] nebo jako posun těžiště [μm].

4. Provozní vyvažování, volba snímačů

Moderní vyvažovací přístroje a programy pro provozní vyvažování provádějí veškeré kalkulace a postupy automaticky. Všechna měřicí zařízení vyhodnocují pouze odezvu systému na nevývahu a udávají ji jako amplitudu a fázi vibrací. Poměr je dán základním vztahem mezi vektorem 1. harmonické složky vibrací a vektorem nevývažku rotoru

$$\vec{v} = k \cdot \vec{U}$$

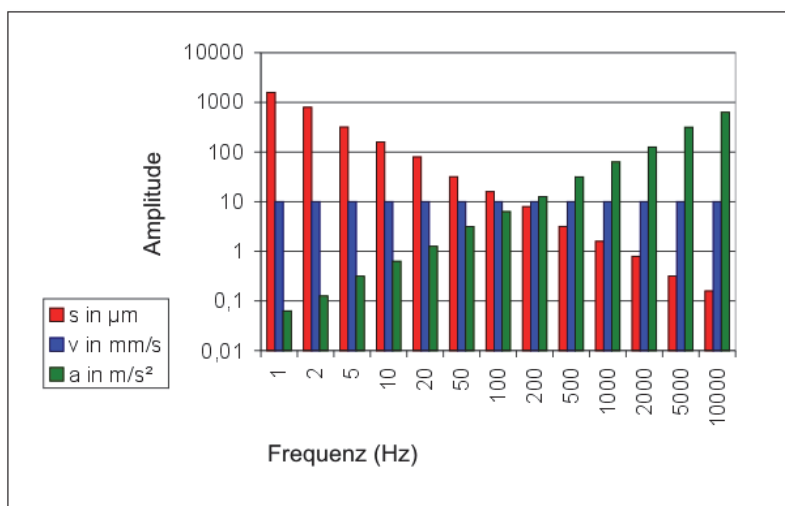
kde „k“ zohledňuje dynamické chování systému. Dynamické poměry nejsou obvykle známy a musí být zjištěny v tzv. testovacím běhu, kdy se zjišťuje reakce systému na definovanou nevývahu (v podobě změny relativní amplitudy a fáze).

Chvění stroje lze posuzovat z dráhy „s“, rychlosti „v“ či zrychlení „a“ vibrací, kde pro jednotlivé harmonické složky platí:

$$s = S \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_0)$$

$$v = S \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_0 + 90^\circ)$$

$$a = S \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_0 + 180^\circ)$$



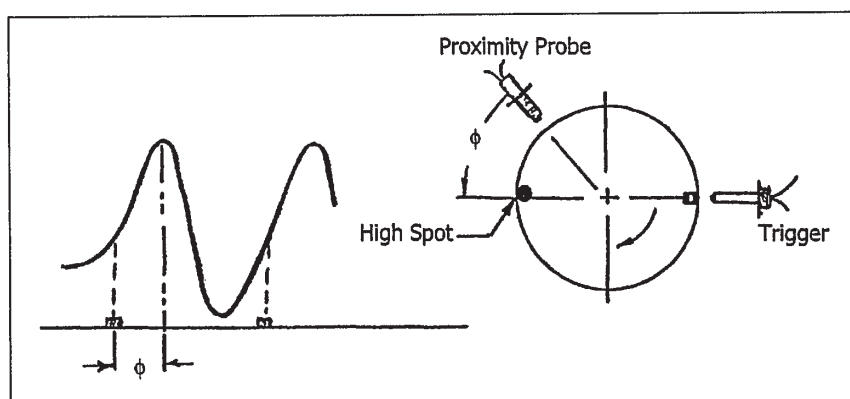
Obr.5 Grafické vyjádření vztahu s , v , a pro $\omega = 1000 \text{ s}^{-1}$ ($f=159,2 \text{ Hz}$)

Velké hydroalternátory pracují s velmi nízkými provozními otáčkami v rozmezí desítek až stovek RPM (jednotek Hz), pro jejich vyvažování je tedy nejvhodnější veličinou dráha vibrací, konkrétně její rozkmit, kdy na nízkých otáčkách získáváme nejprůkaznější hodnoty.

Užít lze absolutní vibrace ložisek, ale s ohledem na:

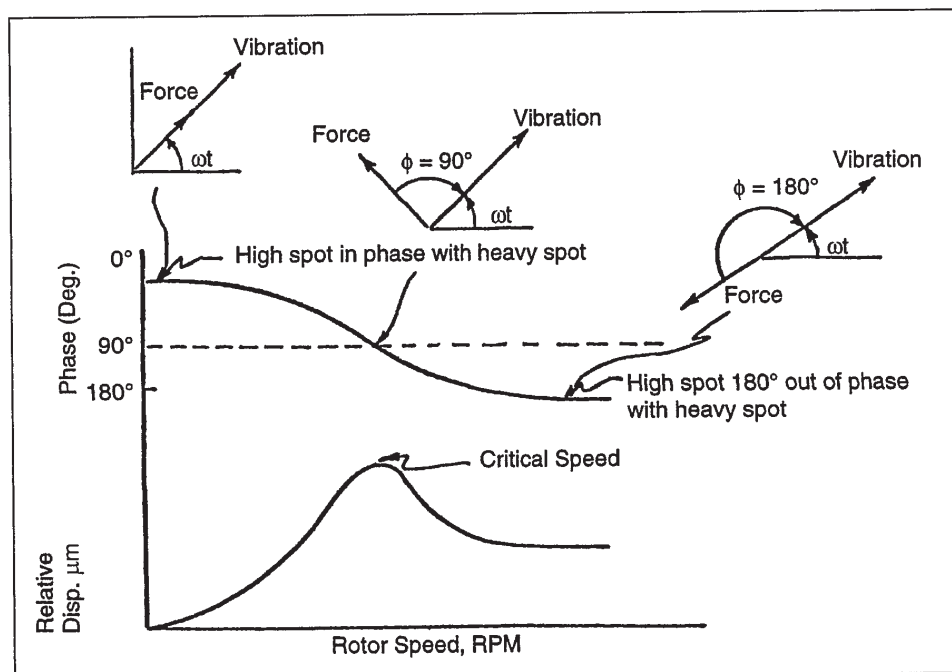
- velkou hmotnost rotorů,
- výhradně kluzná ložiska,
- vysokou tuhost uložení ložisek, kotvených často do konstrukce betonové šachty generátoru,

dává lepší výsledky měření relativních vibrací hřídele bezdotykovými snímači. Nutnou podmínkou je však kvalitní stopa, prostá run-outu.

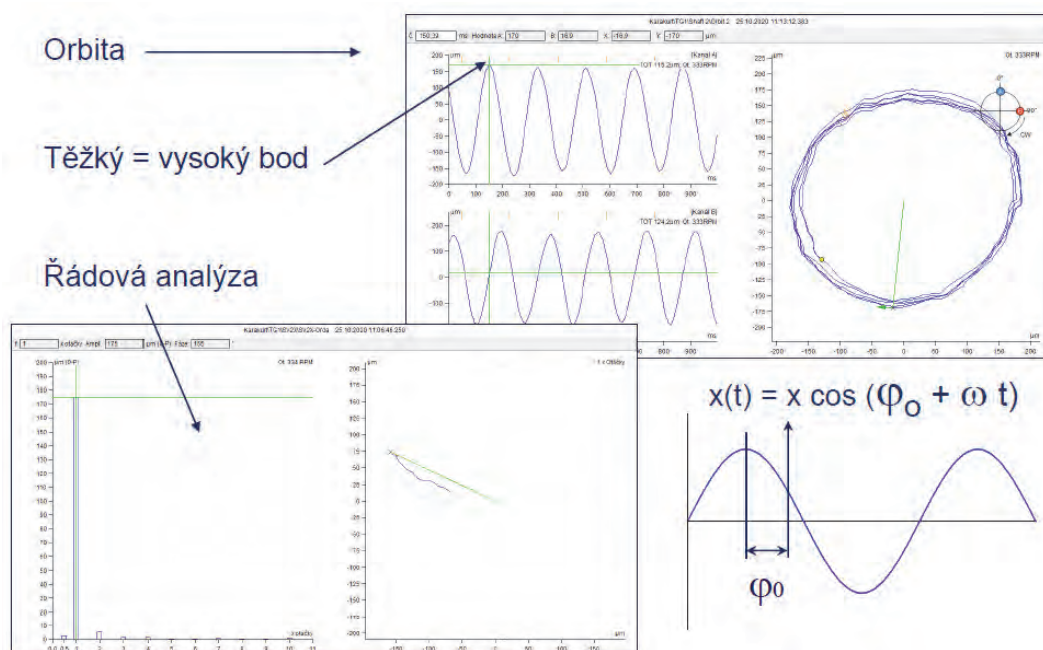


Obr.6 Snímání hřídelových vibrací (High Spot = vysoký bod, amplituda)

Pokud souběžně s vyvažováním sledujeme i výsledky harmonické analýzy vibrací, je v případě tuhých rotorů na podkritických otáčkách výhodou souhlasný údaj fáze obou metod. Harmonická analýza ukazuje tzv. vysoký bod (maximální amplitudu), vyvažovací programy pracují s těžkým bodem.

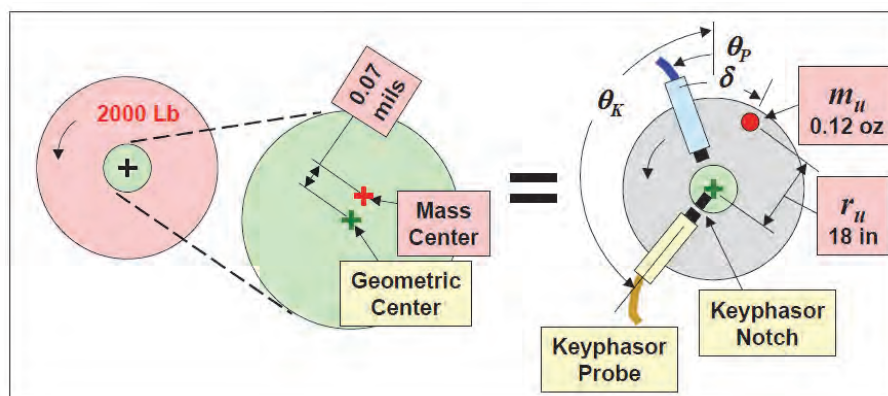


Obr.7 Souhlas fáze vysokého bodu (high spot) a těžkého bodu (heavy spot) u podkritických hřídelí



Obr.8 Zobrazení těžkého bodu v řádové a orbitální analýze

Snímače vibrací hřídele a fáze lze na stroji umístit pod libovolnými úhly, jak dále ukazuje obr.9.



Obr.9 Umístění snímače vibrací a fáze na stroji

Nevyváženost je na obr.9 vyjádřena jako ekvivalentní malá hmota na poloměru r (těžký bod).

Ten je fyzicky na rotoru umístěn pod úhlem $\theta_K - \theta_P + \delta$ od značky keyphasoru (měřeno proti směru rotace). Pokud se polohy snímačů vibrací a fáze kryjí, je úhel těžkého bodu roven δ .

Opakem těžkého bodu je lehký bod, fázově otočený o 180° . Do tohoto bodu se často umísťuje testovací závaží. Musí být dostatečně hmotné, aby vyvolalo významnou změnu amplitudy a fáze vibrací, ale nepoškodilo stroj.

Pro stanovení hmotnosti testovacího závaží se u hydrogenerátorů užívá empirický vzorec dle [3]:

$$WT = 18,45 \cdot 10^6 m / (n^2 \cdot r) [g]$$

kde: m - hmotnost rotoru [kg], n - otáčky [RPM], r - poloměr umístění závaží [mm]

Příklad: $W_T = 18,45 \cdot 10^6 \cdot 188000 / (333^2 \cdot 1250) = 25\,024\text{ g}$

5. Kvalita vyvážení rotorů hydroalternátorů

Obecně platí, že čím je větší hmotnost „ m “ rotoru, tím větší může být jeho přípustná nevyváženost „ U_p “ či přípustný specifický nevyvážek „ e_p “. Ten je rovný výstřednosti „ e “ [μm] těžiště rotoru od osy rotace, platí tedy:

$$e_p = U_p / m$$

Dalším rozhodujícím činitelem při určování přípustných nevyvážek jsou provozní otáčky rotoru. Pro rotory téhož typu platí:

$$G = e_p \cdot \omega [\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$$

kde G udává tzv. stupeň přípustné nevyváženosti - kvalitu vyvážení.

Norma ČSN ISO 21940-11 určuje stupeň kvality vyvážení pro generátory s výškou hřídele alespoň 80 mm a s maximálními jmenovitými otáčkami do 950 RPM na hodnotu $G = 6,3$.

Současně však připouští pro extrémně velké hmotnosti rotorů (více jak 90% celkové hmotnosti stroje) snížení přípustného zbytkového nevyvážení na třetinu, tedy $G=2,5$. Požadovaný stupeň kvality vyvážení hydroalternátoru je tak věcí dohody výrobce a uživatele.

6. Závěr

Vyvažování velkých hydroalternátorů představuje poměrně jednoduchý proces, neboť se jedná o práci s rotory v tuhém stavu a moderní vyvažovací SW, který je součástí mnoha analyzátorů vibrací, nevyžaduje hlubší teoretické znalosti.

Nutno však připomenout, že samotné vyvažování nevede mnohdy k žádanému snížení vibrací stroje. Zvýšené hodnoty vektorů první harmonické složky vibrací mohou být totiž důsledkem řady jiných závad stroje, než je jen nerovnoměrné rozložení hmotnosti rotoru. Jedná se především o nesouosost, elektromagnetickou nevyváženost, ohnutý hřídel, excentrický rotor, problém v kluzném ložisku či mechanické uvolnění ložiskových podpor. Proto je třeba, aby samotnému vyvažování předcházela důkladná analýza vibrací celého soustrojí a zabránilo se tak zbytečným nemalým zásahům do generátoru (montáž velmi hmotných testovacích a korekčních závaží).

Literatura

- [1] Borůvka V., Teorie vyvažování tuhých rotorů. Sborník přednášek „Vyvažování rotačních částí elektrických strojů rotačních“, Vsetín 1989
- [2] Hatch Charles T., Malfunction Diagnostic: Unbalance and 1X Vibration. Bently Nevada Corporation, Training Development Group
- [3] Eshleman Ronald. L., Machinery Vibration Analysis. Vibration Institute, May 2008

WYBRANE METODY OGRANICZANIA EMISJI SZKODLIWYCH SKŁADNIKÓW SPALIN Z SILNIKÓW OKRĘTOWYCH

SELECTED METHODS TO REDUCE EMISSIONS OF HARMFUL EXHAUST COMPONENTS FROM MARINE ENGINES

Zbigniew MATUSZAK, Politechnika Morska w Szczecinie ¹

Streszczenie:

Spaliny silników okrętowych zawierają w sobie szereg szkodliwych dla zdrowia oraz środowiska substancji chemicznych takich jak tlenki azotu, tlenki siarki, węglowodory, tlenki węgla oraz cząstki stałe. Aby ograniczyć emisję tych substancji do środowiska, Międzynarodowa Organizacja Morska wprowadziła szereg regulacji, które doprowadziły do powstania rozmaitych rozwiązań technologicznych ograniczających ich emisję do atmosfery. Wybór konkretnego rozwiązania zależy od rejonu pływania i lokalnych regulacji prawnych, oraz od budżetu armatora jaki przeznaczają na wyposażenie siłowni statku.

W pracy przedstawiono wybrane rozwiązania techniczne umożliwiające ograniczenie emisji tlenków azotu, tlenków siarki i dwutlenku węgla. Obok rozwiązań technicznych, ograniczających emisję szkodliwych składników spalin, scharakteryzowano zalety okrętowych silników dwupaliwowych (zasilanych paliwem pozostałościowym i gazem LNG) charakteryzujące się zmniejszoną emisją niektórych szkodliwych składników spalin.

Annotation:

Exhaust gases from marine engines contain a number of chemicals that are harmful to health and the environment, such as nitrogen oxides, sulfur oxides, hydrocarbons, carbon oxides and particulate matter. In order to reduce the emission of these substances into the environment, the International Maritime Organization has introduced a number of regulations that have contributed to the development of various technological solutions to reduce their emission into the atmosphere. The choice of a particular solution depends on the marine region and local regulations, as well as the shipowner's budget for equipping the marine power plant.

The paper presents selected technical solutions for reducing emissions of nitrogen oxides, sulfur oxides and carbon dioxide. In addition to technical solutions limiting the emission of harmful components of exhaust gases, the advantages of marine dual-fuel engines are characterized, which, powered by residual fuel and LNG, release less harmful components of exhaust gases.

¹ dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. AM
Politechnika Morska w Szczecinie
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin, Polska
tel.: +48 505 088 867, e-mail: z.matuszak@pm.szczecin.pl

1. Wprowadzenie

Szacuje się, że 90% światowego transportu towarów odbywa się transportem morskim [6]. Silniki spalinowe tych statków odpowiadają jedynie za niecałe 3% globalnej emisji dwutlenku węgla [7]. Osiągnięto to między innymi dzięki wieloletnim dążeniom do podnoszenia sprawności energetycznej spalinowych silników okrętowych oraz międzynarodowym i lokalnym aktom prawnym wymuszającym redukcję zanieczyszczeń wytwarzanych przez te silniki. Restrykcyjne normy emisji zanieczyszczeń ze spalinowych silników okrętowych wyznaczają kierunki rozwoju okrętowych silników spalinowych oraz instalacji okrętowych. Powstają dzięki temu rozwiązania techniczne, które mają służyć do zmniejszania szkodliwych emisji substancji wytwarzanych przez silniki spalinowe statków.

Międzynarodowa konwencja o zapobieganiu zanieczyszczaniu morza przez statki (MARPOL) początkowo obejmowała jedynie problemy zanieczyszczania środowiska morskiego olejami oraz szkodliwymi substancjami ciekłymi przewożonymi luzem.

Opisujący zanieczyszczanie powietrza przez statki Załącznik VI konwencji MARPOL został przyjęty w roku 1997, a obowiązuje od 19 maja 2005 roku. Początkowo obejmował emisje tlenków siarki oraz tlenków azotu, substancji zubożających warstwę ozonową, lotnych związków organicznych, spalania odpadów oraz jakość paliwa okrętowego. Od momentu powstania załącznik VI jest stale rozwijany poprzez kolejne rezolucje Komitetu Ochrony Środowiska Morskiego i dodawane są teksty dotyczące między innymi ustalenia stref kontroli emisji, monitorowania zużycia paliwa przez statki czy też zmniejszenia dopuszczalnej zawartości siarki w paliwach okrętowych.

Spaliny okrętowych silników spalinowych zawierają w sobie szereg szkodliwych dla zdrowia oraz środowiska substancji chemicznych takich jak: tlenki azotu, tlenki siarki, węglowodory, tlenki węgla oraz cząstki stałe. Wybór konkretnego rozwiązania zależy od rejonu pływania i związanych z tym lokalnych regulacji prawnych oraz od kondycji finansowej armatora.

2. Ograniczania emisji tlenków azotu

Ilość tlenków azotu powstałych w procesie spalania paliwa w silniku o zapłonie samoczynnym zależy głównie od parametrów takich jak: temperatura procesu, czas przebywania reagentów w strefie reakcji oraz ilość tlenu w układzie spalania [3].

Czas przebywania reagentów w strefie reakcji jest ściśle związany z prędkością obrotową silnika i dla silników okrętowych napędu głównego dąży się do osiągnięcia jak najniższej stabilnej prędkości obrotowej.

Przykładem wykorzystania wpływu obniżenia zawartości tlenu w układzie spalania na emisję tlenków azotu są przedstawione dalej: system recyrkulacji spalin, zastosowanie emulsji paliwowo-wodnej, wykorzystanie metody selektywnej katalitycznej redukcji.

Recyrkulacja spalin

System recyrkulacji spalin przedstawiono na przykładzie rozwiązania firmy MAN B&W (rys.1). System przeznaczony jest do zastosowania dla paliw o zawartości siarki do 0,5%. Dostarcza on do komory spalania gazy wydechowe celem obniżenia zawartości tlenu w powietrzu doładowującym. Pozwala to zmniejszyć maksymalną temperaturę spalania, a więc obniżyć ilość powstających tlenków azotu. Zależnie od wybranego trybu pracy system jest zdolny do redukcji emisji NO_x do poziomu II lub III z konwencji MARPOL. Poziom redukcji emisji jest uzależniony od ilości spalin powracających do

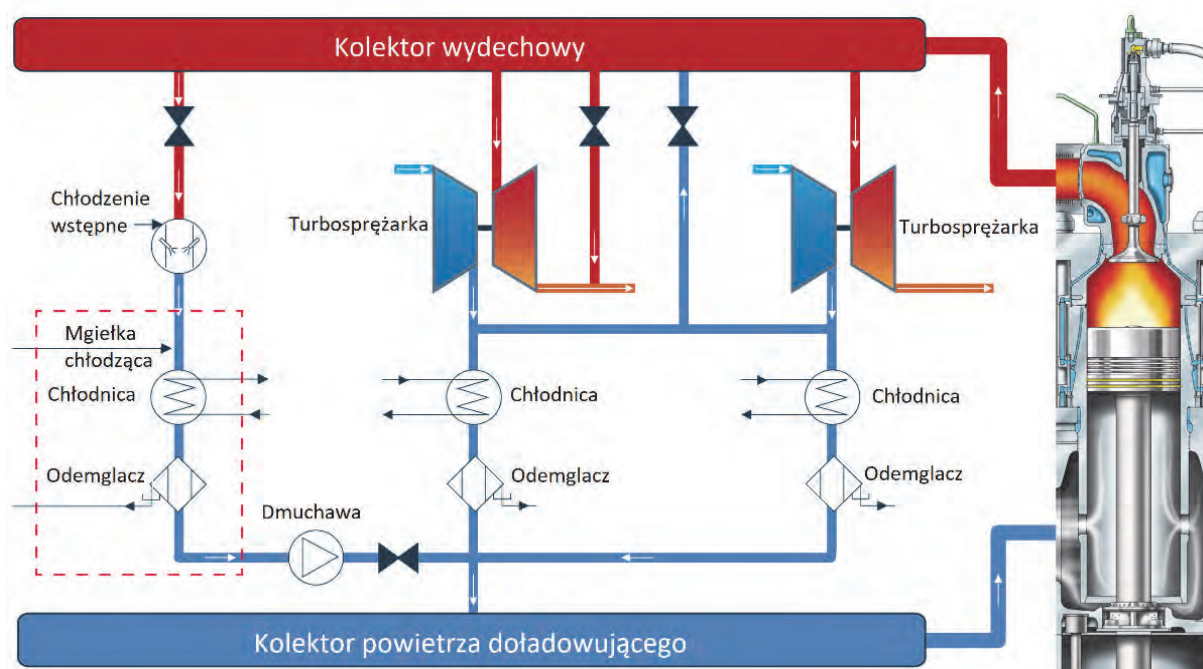
komory spalania. W trybie poziomym II recyrkuluje 10÷15% spalin natomiast w trybie progu III recyrkuluje 25÷45% spalin [8].

Selektywna redukcja katalityczna spalin

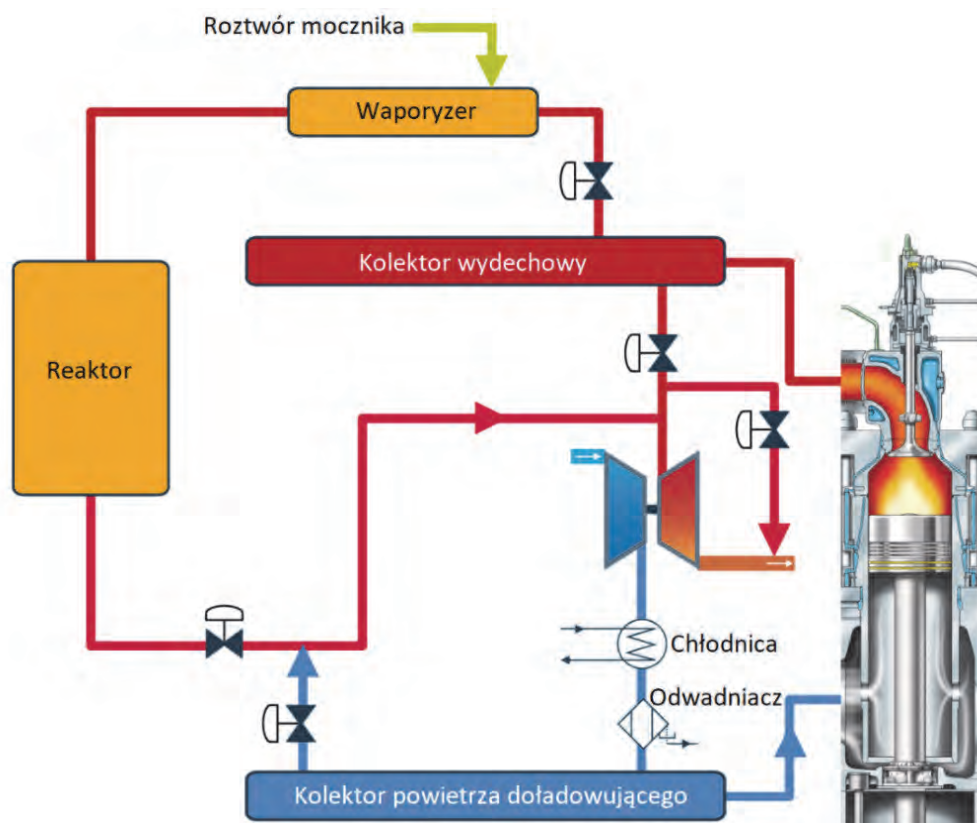
Amoniak wytwarzany z rozkładu termicznego mocznika redukuje tlenki azotu do azotu i wody. Roztwór mocznika jest wykorzystywany zamiast czystego, gazowego amoniaku, ponieważ jest łatwiejszy w dozowaniu oraz nie jest toksyczny.

Do prawidłowego działania systemu ważne jest zachowanie odpowiedniej temperatury procesu, gdyż przy zbyt niskiej temperaturze powstaje wodorosiarczan amonu, który osadza się na elementach reaktora zmniejszając powierzchnię, na której zachodzi reakcja redukcji katalitycznej, a przy zbyt wysokiej temperaturze dochodzi do utleniania się amoniaku do tlenku azotu, co prowadzi do zwiększenia emisji NO_x [5].

Uproszczony schemat układu selektywnej katalitycznej redukcji przedstawiono na rys.2. Do waporyzera wtryskiwany jest roztwór mocznika, który odparowuje i rozpada się termicznie na amoniak i dwutlenek węgla. Powstałe gazy mieszają się ze spalinami i trafiają do komory reaktora o dużej powierzchni wewnętrznej. W silnikach dwusuwowych ze względu na stosunkowo niską temperaturę spalin reaktor umieszczony jest przed turbosprężarką [8].



Rys.1 System recyrkulacji spalin [wg 8]



Rys.2 Schemat systemu selektywnej katalitycznej redukcji [wg 8]

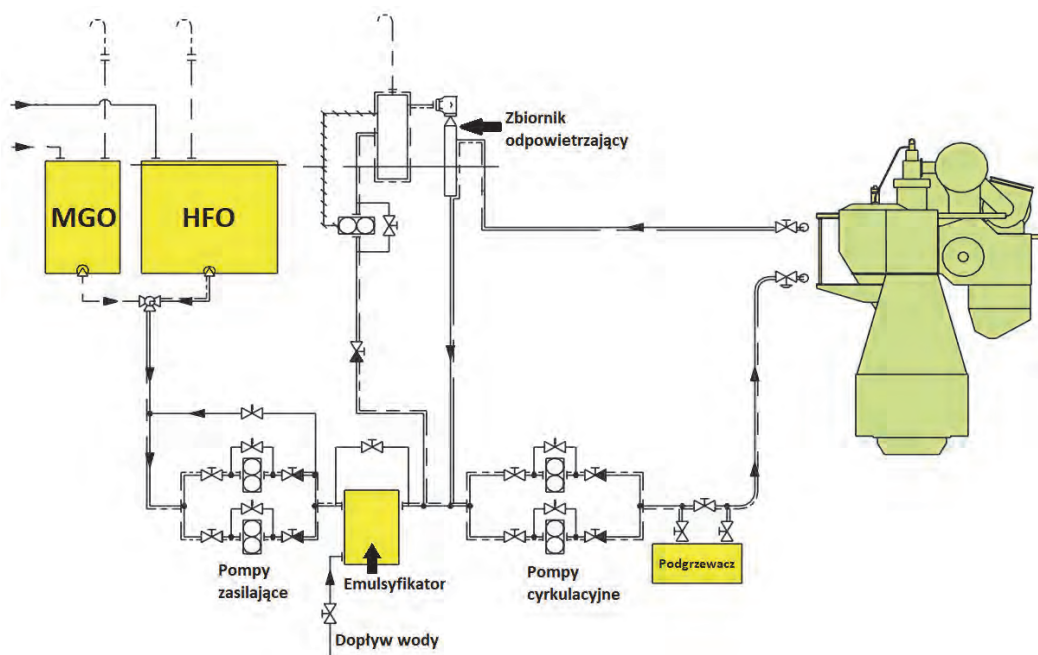
Do wad tego rozwiązania można zaliczyć wzrost specyficznego zużycia paliwa wynoszący 0,5 g/kWh przy obciążeniu znamionowym oraz konieczność uzupełniania odczynników i wymiany katalizatorów [8]. Zaletą jest wysoki stopień redukcji emisji NO_x oraz możliwość odizolowania systemu, kiedy nie jest konieczna redukcja emisji.

Zastosowanie emulsji paliwowo-wodnej

System emulsji paliwowo-wodnej redukuje ilość emitowanych przez silnik tlenków azotu poprzez wprowadzenie wody do komory spalania. Zawarta w emulsji woda odparowując w komorze spalania odbierając z niej energię. Powoduje to obniżenie temperatury procesu spalania paliwa, a więc zmniejszenie emisji tlenków azotu. Dodatkowo emulsyfikacja wpływa korzystnie na proces atomizacji paliwa, co również poprawia charakterystykę emisji silnika.

Redukcja emisji tlenków azotu zależy od zawartości wody w emulsji paliwowo-wodnej. Przyjmuje się, że wzrost zawartości wody o 1% powoduje spadek emisji NO_x o 1%, przy czym maksymalna możliwa redukcja emisji NO_x wynosi około 50% [9]. Aby osiągnąć odpowiednie rozdrobnienie i wymieszanie emulsji paliwowo-wodnej wykorzystuje się emulsyfikatory.

System tworzenia emulsji paliwowo wodnej składa się z jednostki sterującej dozowaniem wody na podstawie przepływu paliwa, oraz z homogenizatora mechanicznego. Aby zapobiegać ponownemu dodawaniu wody do cyrkulującej między silnikiem a zbiornikiem odpowietrzającym emulsji, emulsyfikator umieszcza się za pompami zasilającymi (rys.3).



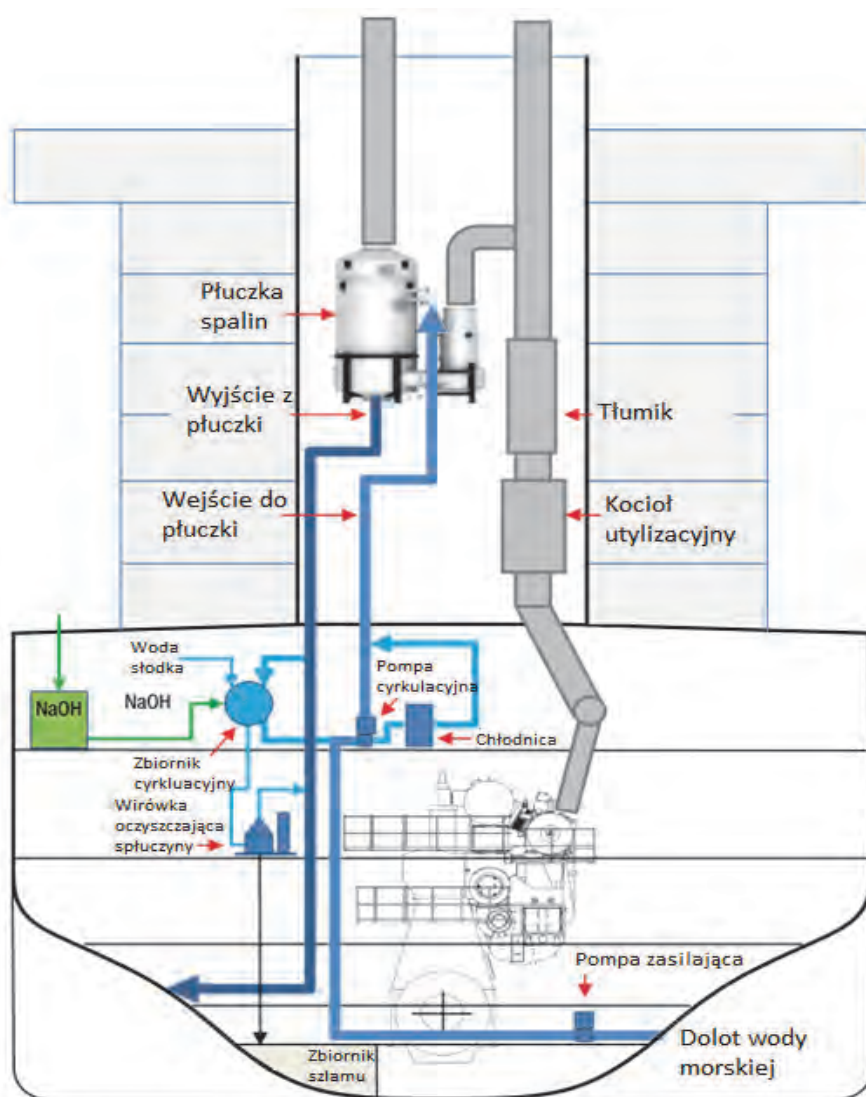
Rys.3 Przykład rozmieszczenia emulsyfikatora w systemie paliwowym [wg 8]

Wykorzystanie oraz wytworzenie emulsji paliwowo-wodnej przysparza szereg problemów eksploatacyjnych, takim m.in. jak podatność paliw na tworzenie stabilnej emulsji [4], wpływ wprowadzonej do paliwa wody na zwiększenie jego lepkości [9], reakcja soli zawartej w wodzie z wanadem znajdującym się w paliwie, co prowadzi do formowania się osadów na powierzchni elementów układu wtryskowego i możliwości ich zatarcia [2].

3. Ograniczanie emisji tlenków siarki

Ilość tlenków siarki w spalinach okrętowych silników spalinowych związana jest z zawartością siarki w paliwie. Metody ograniczania emisji SO_x sprowadzają się do oczyszczania spalin lub do stosowania paliwa o niskiej zawartości siarki. Przepisy obowiązujące od 1 stycznia 2020 roku zmniejszyły dozwoloną w paliwie okrętowym zawartość siarki z 3,5% do 0,5% na akwenach globalnych oraz do 0,1% w strefach kontroli emisji. Dopuszczone jest spalanie paliw o wyższej zawartości siarki pod warunkiem zainstalowania na statku urządzeń zmniejszających emisję SO_x .

Spaliny mogą być oczyszczane z tlenków siarki w komorze płuczki natryskiwaną na nie wodą morską (rys.4). Wysoka alkaliczność wody morskiej pozwala na proces wiązania się wody z tlenkami siarki zawartymi w spalinach. Oczyszczone spaliny przepływają przez komin do atmosfery, a woda z powstałymi kwasami siarkowymi gromadzi się na dnie komory, skąd jest wypompowywana za burtę.



Rys.4 Przykład system płukania spalin [wg 1]

System otwarty jest wykorzystywany w trakcie podróży morskiej, kiedy dozwolone jest mniej dokładne oczyszczanie spalin. Pozwala to na zaoszczędzenie roztworu wodorotlenku sodu wykorzystywanego podczas pracy w systemie zamkniętym.

System zamknięty używany jest w portach i na wodach o niskiej alkaliczności, np. W trakcie żeglugi po jeziorach i rzekach. Do neutralizacji kwasu siarkowego rozpuszczonego w wodzie wykorzystuje się 50% roztwór wodorotlenku sodu, który krąży między komorą płuczki a zbiornikiem cyrkulacyjnym. Zużycie roztworu wodorotlenku sodu zależy od obciążenia silnika oraz zawartości siarki w paliwie.

Do obowiązujących regulacji prawnych dotyczących emisji tlenków siarki można dostosować się stosując paliwa niskosiarkowe, tj. paliwo o zawartości siarki poniżej 0,5%, dostosowane do wymagań podróży poza strefami kontroli emisji siarki oraz paliwo o zawartości siarki poniżej 0,1%, używane w strefach kontroli emisji siarki. Stosowanie tych paliw stwarza jednak wiele problemów eksploatacyjnych [10, 11].

4.Ograniczanie emisji dwutlenku węgla

Podstawowe metody ograniczania emisji dwutlenku węgla ze spalinowych silników okrętowych polegają na zmniejszeniu zużycia paliwa, zmianie rodzaju paliwa lub lepszym wykorzystaniu energii uzyskiwanej z procesu spalania.

Polega to na wspomaganiu napędu statku różnego rodzaju układami żaglowymi, z w tym rotorami, wykorzystaniem ciepła odpadowego, jako metody podnoszenia sprawności energetycznej siłowni statku oraz stosowanie silników dwupaliwowych (np. paliwo pozostałościowe + LNG) przez wykorzystanie paliwa o mniejszej zawartości węgla w cząsteczce.

5. Podsumowanie

Rosnąca świadomość społeczna dotycząca problematyki ocieplenia klimatu oraz zanieczyszczenia środowiska, wywiera presję prowadzącą do obostrzeń regulacji związanych z ochroną środowiska, a regulacje te dotyczą również transportu morskiego.

Producentów urządzeń okrętowych proponują nowe technologie oraz udoskonalanie istniejących już rozwiązań ograniczających emisję szkodliwych substancji z okrętowych silników spalinowych. Od armatorów eksploatujących statki zależy jakie rozwiązania zostaną wybrane.

Komitet Ochrony Środowiska Morskiego w 2018 roku opracował wstępną strategię ograniczenia emisji gazów cieplarnianych przez statki. Zakłada ona ograniczenie do 2050 roku emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 50% w stosunku do emisji z roku 2008 [12].

Literatura

- [1] <https://www.alfalaval.com/microsites/puresox/> [dostęp 09.08.2022].
- [2] Anderasen A., Brauner N., Water-in-fuel emulsion as marine engine fuel for reduced NOx and particulate emissions, Environmental Project No. 1380, 2011.
- [3] Borkowski T., Emisja Spalin Przez Silniki Okrętowe Zagadnienia Podstawowe, Fundacja Rozwoju WSM Szczecin, 1999.
- [4] Burak S., Improving Heavy Fuel Oil Usage by Homogenization, 2016
- [5] <https://www.alfalaval.com/microsites/puresox/why-puresox/> [dostęp 09.08.2022].
- [6] <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Default.aspx> [dostęp 09.08.2022].
- [7] International Maritime Organization. Third IMO Greenhouse Gas Study, 2014.
- [8] 8.MAN B&W. Two-stroke Marine Engines Emission Project Guide for MARPOL Annex VI Regulations, MAN B&W, 2019.
- [9] MAN B&W. G50ME-B9.3-TII Project Guide, 2014.
- [10] MAN B&W. Service Letter SL2019-670/DOJA, 2019.
- [11] MAN B&W. Operation on Low-Sulphur Fuels, 2013.
- [12] Marine Environment Protection Committee. Resolution MEPC.304(72), Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, 2018.

ŘÍZENÍ A SPRÁVA TESTOVACÍHO POLYGONU PRO CÍRKULÁRNÍ EKONOMIKU

Stanislav MIŠÁK, VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET ¹

Lukáš PROKOP, VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET ²

Anotace:

V kontextu vývoje v oblasti minimalizace klimatických změn byly orgány EU přijaty dva strategické dokumenty, které definují směr, kterým se má celé hospodářství evropské unie ubírat v následujících letech. Jedním z důsledků těchto změn je rozvoj v oblasti cirkulární ekonomiky a snahy o maximální využití surovin, ideálně lokálního charakteru. Toto platí nejen v oblasti energetiky. Jelikož se do značné míry jedná o technologie nové, ne vždy již plně etablované a využívané v průmyslové praxi je nutné nejprve realizovat pilotní projekty, které využitelnost, účinnost a ekonomickou efektivitu jednotlivých technologií prověří.

Jedním z takových pilotních projektů je testovací polygon pro cirkulární ekonomiku s názvem CEETe. Jedná se o modulární, mobilní, robustní a škálovatelné technologického řešení pro efektivní přeměnu alternativních paliv, odpadů a vedlejších produktů jako alternativních surovin na využitelné chemické látky a užitečné formy energie, jejich uložení a efektivního užití s podporou nejmodernějších metod, BIM a technologií digitálního dvojčete v souladu s principy cirkulární ekonomiky.

Vzhledem k tomu, že se jedná o složitý technologický celek, je jedním z hlavních technických problémů realizace systému pro řízení a správu celého testovacího polygonu. V projektu je využit systém pro řízení toků energií mezi jednotlivými zdroji elektrické energie a akumulacím zařízením a současně tento systém umožňuje řízení vybraných technologií. Stejně tak jsou centrálně sledované a řízené veškeré technologie v testovacím polygonu instalované.

Annotation:

In the context of developments in climate change minimization, two strategic documents were adopted by the EU institutions, which define the direction the entire economy of the European Union should take in the coming years. One of the consequences of these changes is development in the circular economy and efforts to maximize the use of raw materials, ideally of a local nature. This applies not only in the field of energy. Since these are largely new technologies, not always fully established and used in industrial practice, it is necessary to first implement pilot projects that will test the usability, effectiveness, and economic efficiency of individual technologies.

One such pilot project is a circular economy testing ground called CEETe. It is a modular, mobile, robust, and scalable technological solution for the effective transformation of alternative fuels, waste and by-products as alternative raw materials into

¹ prof. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D.

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Centrum energetických a environmentálních technologií
17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava - Poruba
tel.: +420 596 999 308, e-mail: stanislav.misak@vsb.cz

² doc. Ing. Lukáš Prokop, Ph.D.

tel.: +420 596 999 306, e-mail: lukas.prokop@vsb.cz

usable chemical substances and useful forms of energy, their storage and efficient use with the support of the most modern methods, BIM and digital twin technologies in compliance with the principles of the circular economy.

Since it is a complex technological unit, one of the main technical problems is the implementation of a system for the control and management of the entire test polygon. The project uses a system for managing energy flows between individual sources of electrical energy and energy storage, and at the same time this system enables the management of selected technologies. In the same way, all technologies installed in the test polygon are centrally monitored and controlled.

DIAGNOSTIKA POHONŮ S FREKVENČNÍM MĚNIČEM V PRAXI

Petr NAHODIL, ELVITED-NAHODIL, Lomnice ¹

Jan POKORNÝ, Vysoké učení technické v Brně, FSI ²

Miloš HAMMER, Vysoké učení technické v Brně, FSI ³

Anotace:

Práce je zaměřena na multiparametrickou diagnostiku, která je dnes důležitou součástí údržby strojů a zařízení. Zabývá se využitím oborů jako je vibrodiagnostika, elektrodiagnostika, termodiagnostika, tribodiagnostika, montážní a optická měření i dalších diagnostických metod za účelem získání uceleného obrazu o sledovaných zařízeních. Spojení multiparametrické diagnostiky a moderních výpočtových metod v mnoha případech usnadní hledání vhodných nápravných opatření pro řešení problémů zvláště u strojů s proměnlivými otáčkami a dynamickým zatížením.

1. Úvod

Pro technickou praxi je důležitá technická diagnostika (dále diagnostika). V současné době ji lze považovat za rozsáhlou vědní disciplínu, která prodělala značný vývoj. Nyní se na diagnostiku nazírá úplně jinak, než tomu bylo např. před 40 lety. V ČSN ISO 13372 je diagnostika definována jako ověřování symptomů a syndromů pro určení podstaty závad nebo poruch. Diagnostika je chápána jako věda zaměřená na zjištění technického stavu objektu. Realizace diagnostiky vždy vychází z vytvoření diagnostického systému, který se skládá z objektu diagnostiky, diagnostických prostředků souborů metod a metodik a osoby diagnostika. Základním současným úkolem diagnostiky není měřit, ale ohodnotit stav sledovaného zařízení. Postupem času se diagnostika začala rozdělovat dle různých hledisek, avšak důležité je dělení podle příslušné diagnostické veličiny.

2. Multiparametrická diagnostika

Při diagnostice složitých zařízení poháněných frekvenčním měničem je nutné zhodnotit celkový stav stroje, případně zhodnotit, zda všechny parametry a chování zařízení odpovídá očekávanému trendu stárnutí zařízení. Abychom mohli toto zhodnocení provést, je třeba využít všechny dostupné možnosti tzv. multiparametrické diagnostiky a v některých případech je vhodné naměřené výsledky porovnat s výsledky výpočtového modelování. V tomto článku je popsán přístup využívající multiparametrickou diagnostiku včetně ověření naměřených výsledků pomocí výpočtového modelu rotoru zkratového

¹ Ing. Petr Nahodil

ELVITED-NAHODIL, elektro-vibro-termo diagnostika

Tišnovská 6, 679 23 Lomnice

tel.: +420 737 275 354, e-mail: vibro-nahodil@seznam.cz, petr.nahodil@vut.cz, <https://elvited.webnode.cz/>

² Ing. Jan Pokorný

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

ÚMTMB - odbor inženýrské mechaniky

Technická 2896/2, 616 69 Brno

tel.: +420 541 144 921, e-mail: jan.pokorny4@vutbr.cz

³ doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

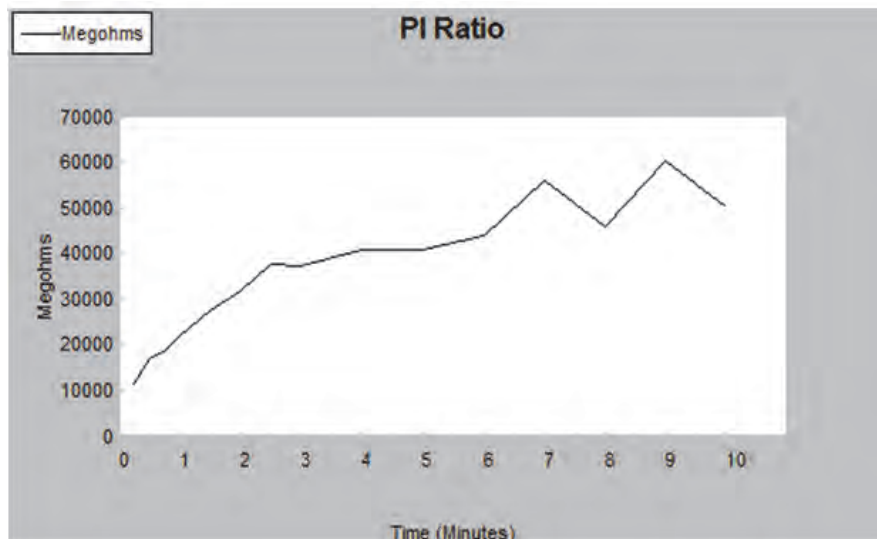
Ústav automatizace a informatiky

tel.: +420 541 142 194, e-mail: hammer@fme.vutbr.cz

generátoru. Je využíváno metod elektrodiagnostiky, vibrodiagnostiky, tribodiagnostiky a dalších metod uvedených níže.

2.1. Statická elektrodiagnostika

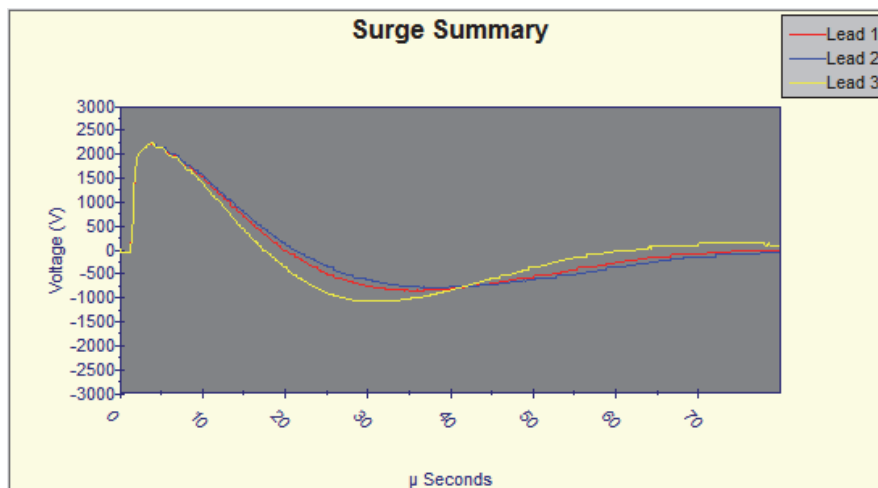
Při kontrole elektrického stavu pohonu, se provádí základní měření a porovnání ohmických odporů jednotlivých fází vinutí pohonu, měření izolačního odporu (obr.1) a polarizačního indexu izolace vinutí. Dále se pak provádí měření závislosti unikajících proudů na napětí (obr.2), a rázový test k odhalení mezizávitových zkratů (obr.3).



Obr.1 Polarizační křivka izolačního odporu vinutí



Obr.2 Závislost unikajících proudů na napětí

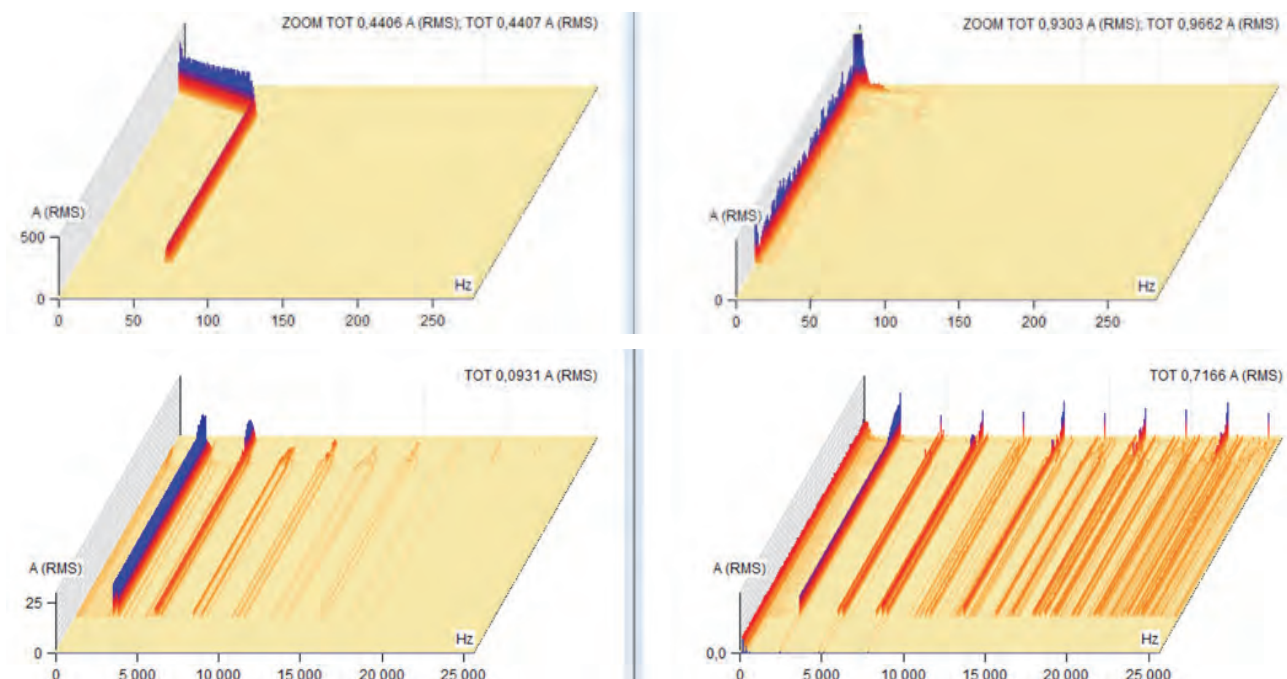


Obr.3 Test rázovou vlnou na mezizávitové zkraty

Další důležitou kontrolou je kontrola vizuální, kde je nutné prohlédnout, zda připojení pohonů odpovídá správnému zapojení kabelů, včetně provedení připojení stínění kabelů, kontrola ekvipotenciálního pospojování a přechodových odporů v pospojování, uzemnění rotorů apod. Dále je nutné zkontrolovat, zda vizuálně nedochází k tepelným či jiných degradací izolací kabelů, vinutí apod.

2.2 Dynamická elektrodiagnostika

Dynamická elektrodiagnostika se provádí za chodu stroje, Ve většině případů měříme napájecí proud motoru z frekvenčního měniče, kde sledujeme jeho symetrii, podíl harmonických násobků a vyšších frekvenčních složek způsobených pulzní frekvencí frekvenčního měniče a proudy v PE vodiči mezi pohonem a frekvenčním měničem (obr.4).

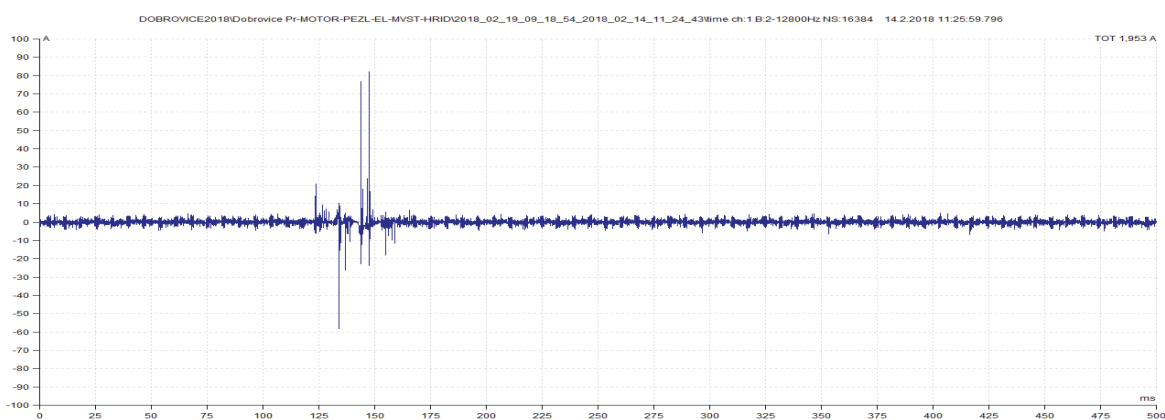


Obr.4 Příklad spektra napájecího proudu a spektra v PE vodiči

Další důležitou analýzou je měření proudu na vodičích ekvipotenciálního pospojování, uzemnění a dalších vodivých neživých částech strojního zařízení. Na základě těchto měření pak sestavujeme proudovou mapu, a hledáme zdroje proudu tekoucí v neživých částech přes ložiska, ozubení apod. Ne vždy se musí jednat o proudy, které vznikají v rotorech asynchronních motorů, případně proudy kapacitní v důsledku kapacit a vyšších frekvencí z frekvenčních měničů.

U pohonů s frekvenčními měniči je důležité měřit také souhlasné napětí (součtové napětí vektorů napětí fáze U, V a W) a proud. Při vyšších hodnotách souhlasného napětí se generuje hřídelové napětí v rotoru elektromotoru a vznikají hřídelové proudy.

Velmi důležitým měřením u těchto pohonů jsou proudy v PE vodičích. Toto měření je nutno provádět jak velikostně (RMS a PEAK hodnoty) a spektrálně, tak sledovat především časový průběh zda se zde nevyskytují proudové výboje apod. (obr.5).



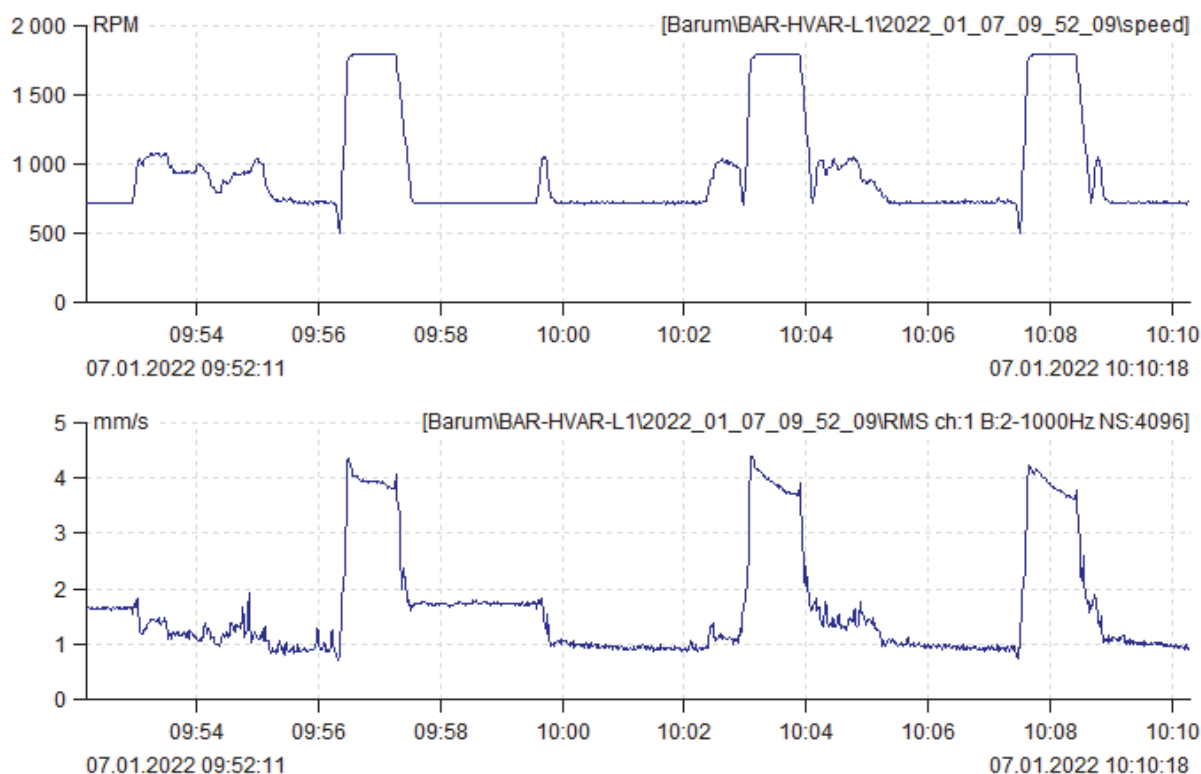
Obr.5 Časový průběh proudu v PE vodiči s proudovým výbojem

Tyto proudové výboje, mohou dosahovat i několik desítek ampér, a mohou být i různé polarity. Při dynamickém měření proudů je také vhodné použít metod termodiagnostiky, kde sledujeme například nadměrné zahřívání jednotlivých částí stroje, vodičů případně kontaktních spojů za předpokladu, že stroj je v ustáleném stavu.

2.3. Vibrodiagnostika

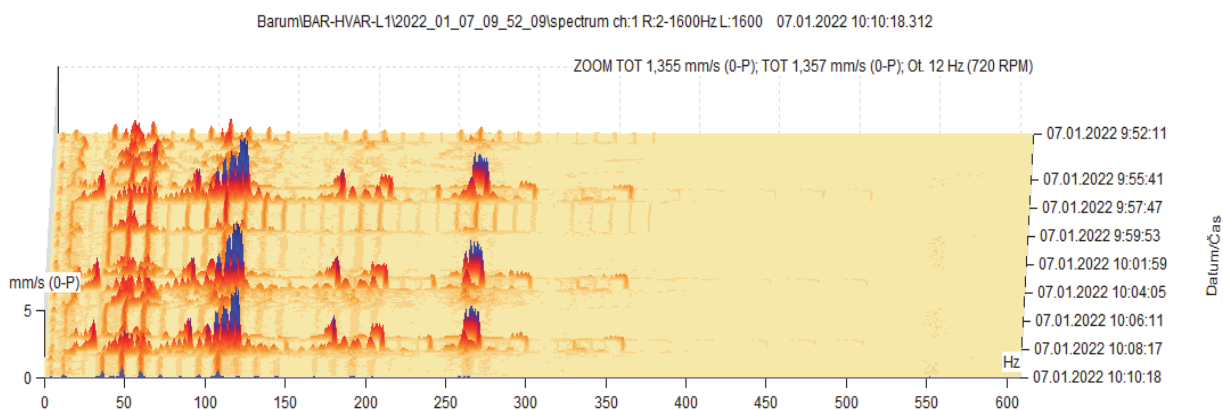
Využití metod vibrodiagnostiky v analýze pohonů s frekvenčním měničem má velký význam. Tyto stroje velmi často pracují s proměnlivými otáčkami, kde dynamika změn otáček a zatížení může být různá a přechodové stavy mezi různými pracovními režimy bývá různý a má významný vliv na hodnocení vibrací daného stroje. Proto nestačí měřit tyto stroje jen v určitém časovém okamžiku, ale je nutné měřit zařízení během celého pracovního cyklu. Toto měření bývá pak značně náročné na vyhodnocení měření, zvláště pak, když v pracovním cyklu není dostatečně dlouhá ustálená doba pro vyhodnocení některých parametrů stroje, jako jsou například poruchové frekvence ložisek, a další vady kde pro analýzu potřebujeme dostatečně dlouhý ustálený časový vzorek naměřených dat. V těchto případech pak je vždy zapotřebí měřit otáčky pohonu, případně dalších os hřídelí daného zařízení. Při hodnocení těchto strojů hodnotíme jak mohutnost (rychlost) vibrací, jejich spektrum a v některých případech i časový průběh a fázi vibrací, ale i zrychlení vibrací a jeho spektrum a časový signál s různými frekvenčními filtry. Pro hodnocení

ložisek pak využíváme metod obálky zrychlení, kde je třeba upozornit, že při vyhodnocení poruchových frekvencí ložisek dochází velmi často k záměně 2x napájecí frekvence motoru z FM za poruchovou frekvenci daného ložiska.



Obr.6 Závislost průběhu hodnot vibrací na otáčkách

Jako příklad lze uvést hodnoty vibrací v závislosti na otáčkách motoru (obr.6) a spektrum rychlosti vibrací zobrazených v kaskádě (obr.7), kde můžeme sledovat, která frekvence způsobuje zvýšení vibrací stroje.



Obr.7 Kaskáda spektra rychlosti vibrací a jeho průběh

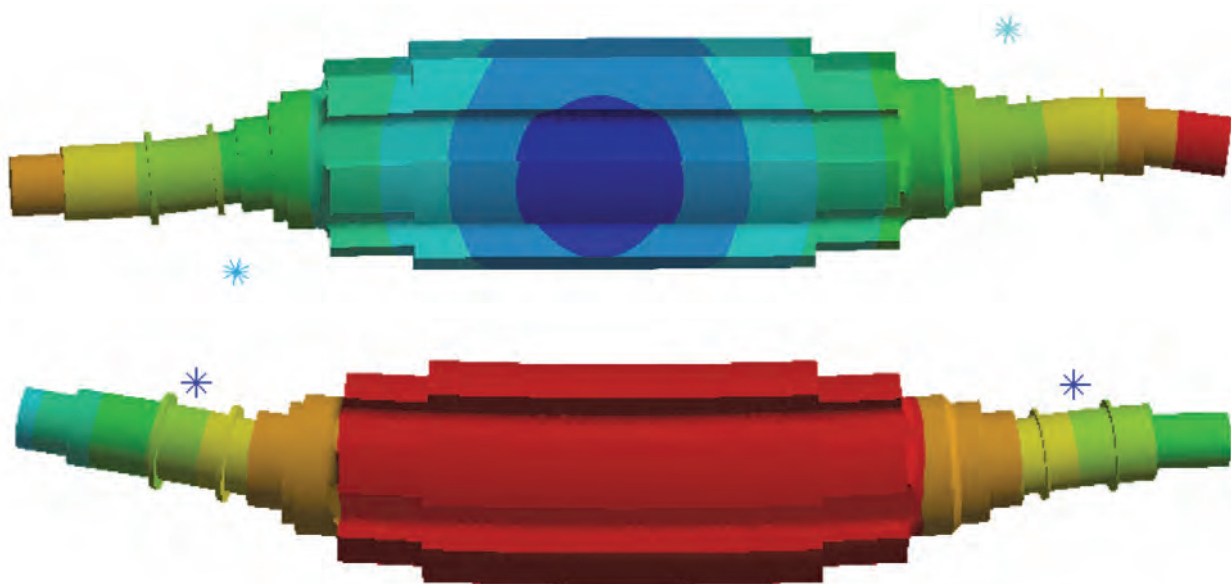
Podobně takto můžeme sledovat průběh zrychlení vibrací případně i obálky zrychlení. Díky těmto metodám vibrodiagnostiky můžeme lépe pochopit chování stroje a vlivy které ovlivňují životnost a spolehlivost strojního zařízení.

Dalšími metodami multiparametrické diagnostiky u pohonů s frekvenčním měničem jsou metody tribodiagnostiky, termodiagnostiky, analýz poškozených dílů (ložisek, ozubených kol, spojek apod) a dalších metod vedoucích k odhalení příčiny problému.

3. Výpočtové modelování

Pohony s proměnlivými otáčkami pracují v různých provozních režimech. Řešení některých problémů, zvláště specifického chování rotorů a jejich rezonancí, nebývá jednoduché. Někdy lze řešení a vhodné opatření nalézt pomocí podrobné multiparametrické analýzy, analýz poškozených částí stroje a rozboru konstrukce. Jindy je však nutné využít pro řešení moderní metody návrhu opatření, kde je na základě reverzního inženýrství (proces s cílem odkrýt princip fungování zkoumaného předmětu) sestaven výpočtový model pro výpočet chování stroje pomocí metody konečných prvků. Tento výpočtový model a jeho okrajové podmínky jsou na základě provedených měření odladěny a dále jsou na tomto modelu simulovány zásahy, které vedou k řešení daného problému se strojním zařízením.

Spojení multiparametrické diagnostiky a moderních výpočtových metod velmi často pomáhá řešit problémy s rezonančními frekvencemi různých strojních zařízení, s dynamikou rotorových soustav apod. Na výpočtovém modelu lze pak zkoumat vlivy jednotlivých zásahů na vlastní frekvence zařízení při různých provozních režimech. Jedná se např. o vliv tuhosti uložení zařízení, vliv dynamických parametrů ložisek, vlivy dynamického chování na torzní kmity rotorů, zatížení spojky, apod.



Obr.8 Vlastní tvary rotoru elektromotoru

Vhodným a promyšleným zásahem lze pak na výpočtovém modelu ověřit, zda je navržené opatření dostatečně účinné pro odstranění daného problému. Příkladem toho mohou být výsledky vlastních tvarů rotoru elektromotoru (obr.8) získané z výpočtového

modelu, který byl odladěn na základě multiparametrické diagnostiky reálného zařízení. Pomocí výpočtového modelu byl ověřován vliv tuhosti uložení rotoru na vlastní frekvenci tohoto rotoru.

4. Závěr

V dnešním průmyslu stále přibývá pohonů s frekvenčním měničem. Jejich výhodou je relativně snadná regulovatelnost otáček i výkonu různých zařízení. S těmito pohony se setkáváme jak v energetice, tak ve výrobních firmách. Každá aplikace může mít různé problémy, které mohou mít příčinu jak v elektrické části, tak v mechanické části. Nebývá výjimkou, že zařízení s frekvenčním měničem ovlivňuje i vedlejší zařízení, kde způsobuje určité problémy a naopak. Z tohoto důvodu využití multiparametrické diagnostiky a moderních výpočtových metod pro analýzu a návrh opatření je velice žádané a v mnoha případech eliminuje finanční prostředky, kde metoda pokus - omyl nepřináší často žádaný výsledek, a mnohdy i dojde k nevratným úpravám, které zhorší stav strojního zařízení. Multiparametrický přístup s využitím moderních diagnostických a výpočtových metod je době Průmyslu 4.0 nepostradatelnou součástí diagnostických a technických disciplín. Díky tomuto spojení metod multiparametrické diagnostiky při analýze problému a moderních výpočtových metod při návrhu vhodných opatření je tedy možné nalézt řešení složitých problémů se stroji s frekvenčními měniči.

Literatura

- [1] Nahodil, P. and M. Hammer. Selected characteristics and diagnostics of motor powered by frequency converter , MM Science Journal, pp.2077-2084, ISSN 1805-0476, MM publishing, s.r.o. (2017), článek v časopise
- [2] Opočenská, H.; Nahodil, P. and M. Hammer. Use of multiparametric diagnostics in predictive maintenance, MM Science Journal, pp.2090-2093, ISSN 1805-0476, MM publishing, s.r.o. (2017), článek v časopise
- [3] Nahodil, P. Analýza statorového proudu pro určení stavu rotoru asynchronních motorů, Sborník konference DIAGO ATD ČR 2018
- [4] Nahodil, P. Motor a hřídelové napětí, Sborník konference DIAGO ATD ČR 2017
- [5] Nahodil, P. Motor a hřídelové napětí, Řízení a údržba průmyslového podniku č. 1/2017, část Technická diagnostika, článek v časopise, ISSN 1210-311X
- [6] Nahodil, P. a T. Petržela. Měření common mode voltage na asynchronním motoru napájeném frekvenčním měničem, Sborník konference DIAGO ATD ČR 2019
- [7] Nahodil, P. a M. Hammer. Elektrodiagnostika jako součást multiparametrické diagnostiky v průmyslové praxi, Řízení a údržba průmyslového podniku č. 6/2020, část Technická diagnostika, článek v časopise, ISSN 1803-4535
- [8] Vance, J. M.; Murphy B. and F. Zeidan. Machinery vibration and rotordynamics, New Jersey, Wiley (2010) ISBN 978-0-471-46213-2

MANAŽÉRSTVO RIZÍK A BEZPEČNOST STROJOV V KONTEXTE DIGITALIZÁCIE

Hana PAČAIOVÁ, Technická univerzita v Košiciach, SF ¹

Ivan HABALA, Technická univerzita v Košiciach, SF

Lukáš DURÍŠ, Technická univerzita v Košiciach, SF

Tomáš GAZDA, Technická univerzita v Košiciach, SF

Peter DARVAŠI, Technická univerzita v Košiciach, SF

Ferdinand KÓČA, Technická univerzita v Košiciach, SF

Anotácia:

Bezpečnosť strojov s rozvojom digitálnych technológií narastá na význame. Uplatniteľnosť integrovanej bezpečnosti počas ich celého životného cyklu je štandardnou súčasťou pri ich vývoji a umiestňovaní na trhu nielen v Európskej únii. Nové požiadavky súvisiace so 4. priemyselnou revolúciou na digitalizáciu pracovísk, vyžadujú nové prístupy v konštrukcii strojov. Avšak tieto nové prístupy na jednej strane prinášajú zvýšenie výkonnosti, kvality, spoľahlivosti ale na druhej strane vytvárajú potenciál pre nové riziká. Ako posudzovať tieto riziká, tak aby boli zohľadnené všetky etapy životného cyklu stroja, ak identifikácia nebezpečenstiev vyplýva hlavne zo starých skúseností? Bez správnej identifikácii nebezpečenstiev nie je možné vykonať dostatočnú analýzu a hodnotenie rizík. Nedostatočné opatrenia, či už z hľadiska kvalitatívneho alebo kvantitatívneho (ich účinnosť) majú vplyv na úroveň bezpečnosti. Tento príspevok sa zameriava na popis základného rámca posudzovania rizík pri zohľadnení nových technológií aplikovaných na strojové zariadenia.

1. Úvod

Smernica Európskej únie 2006/42/ES [1] vymedzuje akých zariadení, resp. akých jeho súčastí sa týkajú jej ustanovenia. Jedná sa o strojové zariadenia, vymeniteľné prídavné zariadenia, bezpečnostné časti, zdvíhacie príslušenstvo, reťaze, laná a záchytné pásy, odnímateľné zariadenia pre mechanický prenos a tzv. čiastočne skompletizované strojové zariadenia. Pričom strojové zariadenie je definované ako súbor, ktorý je vybavený alebo určený na vybavenie pohonným systémom, ktorý nepoužíva priamo vynaloženú ľudskú alebo zvieraciu silu a ktorý sa skladá z častí alebo komponentov, z ktorých najmenej jedna je pohyblivá a ktoré sú vzájomne spojené na účely osobitného použitia.

Vývoj tejto smernice zaručuje vývoj v oblasti bezpečného používania strojového zariadenia na voľnom trhu Európskej únie počas celého jeho životného cyklu. Zohľadňuje ako mechanické, elektrické, tepelné, ergonomické a iné vlastnosti strojového zariadenia, ktoré predstavujú potenciálny zdroj nebezpečnej situácie (ohrozenia) a vytvára rámec postupov na znižovanie z nich vyplývajúcich rizík.

S vývojom technológií, integrácie výrobných procesov a digitalizácie pracovísk, chápanie strojového zariadenia ako nemeniace sa, základom pevne vymedzený strojový systém nie je celkom správne. Z toho dôvodu aplikovaním harmonizovaných noriem na

¹ prof. Ing. Hana Pačaiová, PhD.

Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta

Katedra bezpečnosti a kvality produkcie

Letná 9, 042 00 Košice, Slovenská republika

tel.: +421 556 022 290, mobil: +421 903 719 474, e-mail: hana.pacaiova@tuke.sk

bezpečnosť strojov (ako požiadavka smernice) sa dopĺňajú aj rámce pre popis systému na ktorého sa požiadavky bezpečnosti vzťahujú. Jedná sa najmä o integráciu pracovísk, implementáciu robotov do pracovných liniek, ako aj o priamu spoluprácu človeka s robotom (tzv. kolaboratívne roboty, resp. koboty).

Ochranné bezpečnostné zariadenia majú v súčasnosti široké pôsobenie využitia, ich spoľahlivosť a výkonnosť závisí od koncepcie návrhu strojového zariadenia. Avšak integrácia ich riadenia do riadenia strojového zariadenia môže predstavovať nové kybernetické riziko. Napriek tomu, že pokrok v technológiách strojových zariadení v rámci digitalizácie narastá priam exponenciálne, bez dôsledného posúdenia rizík, koncept vrodenej bezpečnosti môže byť neefektívnym alebo aj neúčinným spôsobom prevencie nehôd a úrazov.

2. Digitalizácia a bezpečnosť strojových zariadení

Podľa Risktec [2] digitalizovanie (angl. digitization) je možné chápať ako proces prevodu informácií do digitálneho formátu. Pojem digitalizácia (angl. digitalisation) predstavuje integráciu digitálnych technológií do každodenného života digitalizáciou všetkého, čo sa digitalizovať dá. Cieľom digitalizácie je zlepšiť činnosti, procesy tým, že je ich možné napr. zjednodušiť, zefektívniť, zrýchliť, popr. získať ďalšie výhody pre podporu cieľov.

Podľa platformy Industry RUM [3] sa vysvetlenie pojmu digitalizácia člení na 4 úrovne vo vzťahu k úrovni jej zavádzania v organizáciách. Toto vysvetlenie súvisí s všeobecným používaním pojmu digitalizácia v slovenčine, čo môže vyvolať mylnú predstavu o cieľoch jej použitia (podobne ako bezpečnosť v slovenčine, môže mať dva významy z hľadiska jej rámca využitia - angl. safety a security).

Jedná sa o nasledujúce úrovne:

1. digitalizácia (angl. digitization) v užšom slova zmysle, je prvý stupeň digitalizácie informácií a dát v podniku. Digitalizácia na tejto úrovni neovplyvňuje procesy organizácie, len poskytuje informácie vo vhodnej, najmä efektívnej forme.
2. digitalizácia (angl. digitalization) v širšom slova zmysle predstavuje proces zavádzania nových digitálnych technológií do života. Je zameraná na implementáciu digitálnych technológií do procesov organizácie. Vhodným príkladom je zber údajov zo strojových zariadení, napr. o ich stave, výkonnosti, kvalite vyrábanej produkcie, spotrebovanej energii, emisiách a pod. Podobne simulácia procesov za účelom zvýšenia ich efektívnosti alebo úrovne bezpečnosti a pod.
3. Digitálna transformácia (angl. digital transformation) predstavuje už komplexný a rozsiahly proces, v ktorom sa jedná o zmenu existujúcich alebo tvorbu nových procesov v súlade s podnikateľskými zámermi - cieľmi organizácie.
4. Digitálny podnikateľský model (angl. digital business model) je najvyššou úrovňou v chápaní digitalizácie. Jeho cieľom je prinášať nové hodnoty pre zainteresované strany s využitím digitálnych technológií. Jedná sa o priami vzťah so zákazníkmi, verejnosťou a ďalšími zainteresovanými stranami previazaním procesov a ich dostupnosťou v digitálnej forme s cieľom zvýšiť výkonnosť, transparentnosť a udržateľnosť organizácie [4]. Táto úroveň musí však citlivo reagovať na zmeny podnikateľského prostredia a musí byť podporená dynamickým manažérstvom rizík.

Ako je z predchádzajúceho zrejmé porozumenie pojmu digitalizácia vyžaduje pochopenie o aké činnosti, resp. procesy sa jedná a čo je cieľom organizácie. Digitalizácia

aj keď na jednej strane prináša možnosti - príležitosti zlepšovať výkonnosť organizácie, na druhej strane s ňou súvisia, v súčasnosti nie celkom zvládnuté procesy manažérstva rizík.

Vplyv digitalizácie na bezpečnosť strojov je možné členiť na tri úrovne:

- úroveň sledovania stavu strojov s cieľom zvyšovania úrovne ich efektívnosti (vhodný je pojem tzv. celkovej efektívnosti [5]). Mohlo by sa povedať, že sa jedná o základnú úroveň strojovej digitalizácie. Úlohou tejto úrovne je podporiť výkonnosť a efektívnosť procesov organizácie. Aplikujú sa základné požiadavky na spoľahlivosť a bezpečnosť strojov.
- úroveň vzájomnej integrácie strojov (vytváraním tzv. integrovaných výrobných systémov, IVS). Jedná sa o vyššiu úroveň strojovej digitalizácie, kedy sa zjednocujú pracoviská a vytvárajú efektívne riešenia, napr. aj implementáciou robotov. Cieľom tejto úrovne je podporiť digitalizáciu procesov. Aplikujú sa požiadavky na bezpečnosť IVS.
- úroveň integrácie strojov do procesov. Jedná sa o najvyššiu (holistickú) úroveň digitalizácie strojov, kedy ich komunikácia, spracovanie dát a ich spoľahlivosť sa zameriava na podporu kľúčových procesov a strategické ciele organizácie. Dalo by sa povedať, že na tejto úrovni je dôležitá kompetentnosť údajov vo všetkých smeroch (horizontálne aj vertikálne), pričom ich kritickosť závisí od adresne priradenej úrovni k manažérskym procesom organizácie. Na tejto úrovni sa z hľadiska bezpečnosti vyžadujú integrované prístupy a komplex nástrojov manažérstva rizík [6].

Podľa tohto členenia úrovne digitalizácie strojov vo vzťahu k ich požiadavkám na bezpečnosť je možné charakterizovať metódy riadenia rizík a ich rozsah.

3. Digitalizácia a manažérstvo rizík

Manažérstvo rizík, podobne ako v prípade digitalizácie, musí byť vzťahované k posudzovaným systémom a ich vlastnostiam a k stanoveným cieľom. Pod systémom (objektom) je možné chápať stroj, pracovisko, proces, výrobnú jednotku, organizáciu alebo spoločnosť.

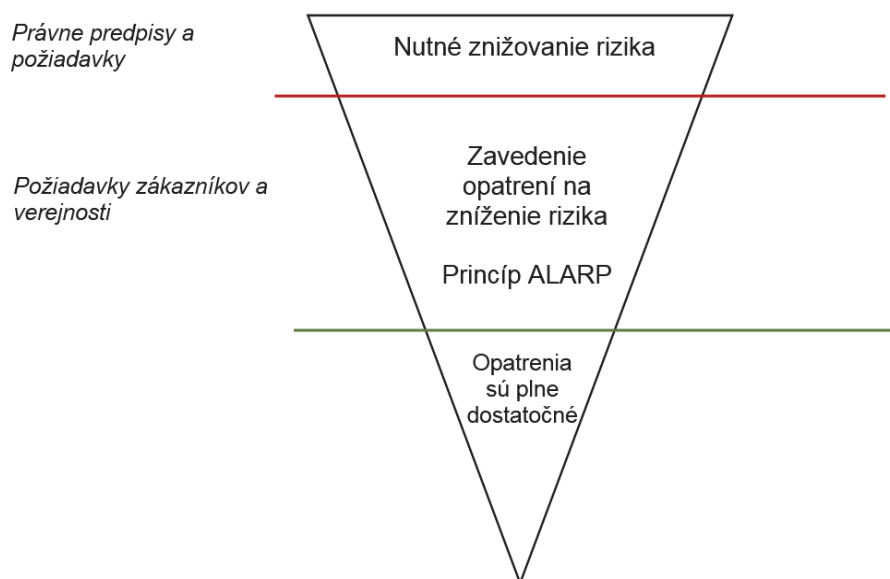
Ak vychádzame z ISO 31000 [7], potom manažérstvo rizika (angl. risk management) je možné chápať ako kultúru, procesy a štruktúry zamerané na efektívne manažérstvo potenciálnych príležitostí a neželaných účinkov.

V manažérstve rizika je nevyhnutné pochopiť základný algoritmus pozostávajúci z identifikácie, analýzy a hodnotenia rizika (tzv. posudzovanie rizika). Avšak kompletný algoritmu manažérstva rizika musí zahŕňať aj prvok znižovania rizika (tzv. zaobchádzanie s rizikom). Kritériom pre voľbu nástrojov, t.j. opatrení pre zaobchádzanie s rizikom, sú stanovené ciele, za účelom ktorých bolo manažérstvo rizika aplikované.

Základným rámcom vymedzujúcim proces zaobchádzania s rizikom je aplikovanie tzv. princípu ALARP (angl. As Low As Reasonable Practicable) [8]. Tento model určuje hranice pre hodnotenie rizika stanovením troch úrovní: vysoká (netolerovateľná), stredná (priateľná alebo tolerovateľná) a nízka (zostatková, plne akceptovateľná) úroveň, pozri obr.1. Tento princíp vymedzenia minimálne troch hodnotiacich úrovní pre riadenie rizika sa v súčasnosti chápe ako základ z ohľadom na manažérské systémy a ich implementácia pri plnení požiadaviek zainteresovaných strán.

Princíp ALARP (je skratka pre „tak nízke, ako je rozumne, resp. prakticky možné) je integrovaný do oblasti stredného rizika, kde požiadavky na jeho ďalšie znižovanie môžu

predstavovať problémy časové a/alebo finančné. ALARP teda popisuje úroveň, do akej očakávame, že riziká na pracovisku budú pod kontrolou. Zníženie týchto rizík súvisí so zavedením vhodných (účinných a efektívnych) opatrení tak, aby sa udržali na požadovanej prijateľnej úrovni.



Obr.1 Princíp znižovania rizika a ALARP

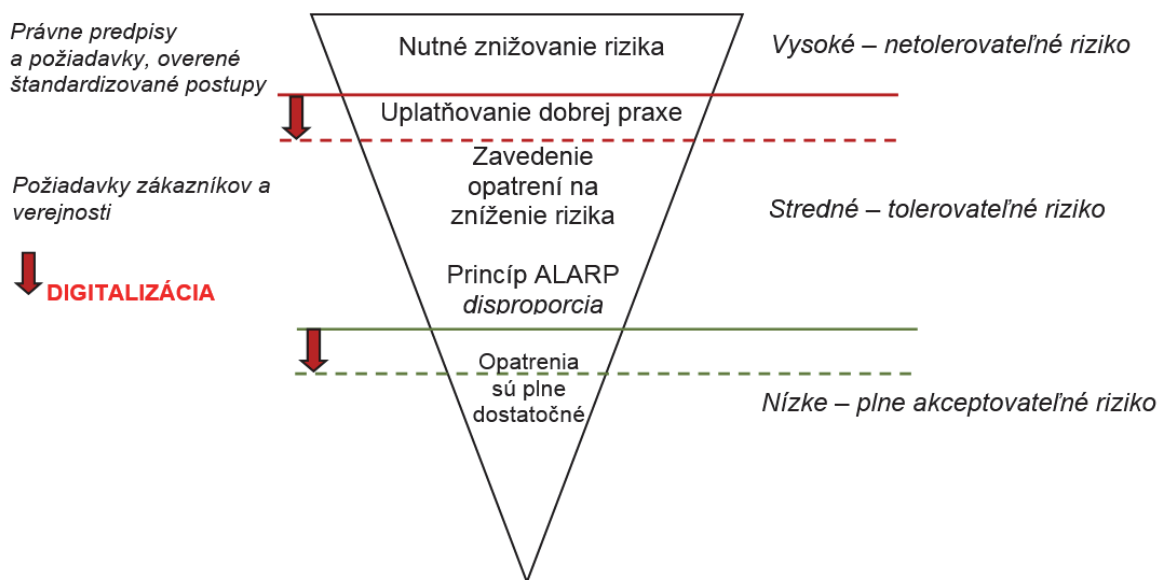
Digitalizácia v oblasti vývoja strojových zariadení vyžaduje aplikáciu nových snímačov, komunikačných prostriedkov jednak pri prenášaní informácií stroj-stroj, stroj-človek, stroj-proces a stroj-prostredie. Tak ako už bolo spomenuté, úroveň týchto informácií sa môže meniť podľa požiadaviek na ich dôležitosť pri rozhodovaní na určitých manažérskych úrovniach. Aplikácia umelej inteligencie (angl. Artificial Intelligence AI) do robotických pracovísk vyžaduje riadenie nových rizík. Zlyhanie softvéru, riadiacich systémov, blokovanie toku údajov (Cyber security - CS) môže mať dopad na samotný stroj ale aj na kritické procesy organizácie. Nesprávne integrovanie dát, neznalosť fungovania strojov, IVS, organizačných procesov, požiadaviek zákazníkov (najmä vnímanie verejnosti) a samotných cieľov organizácie, môže pri digitalizácii predstavovať veľké riziko.

Pri holistickom prístupe ako predstavuje digitálny biznis model, bez dôkladného posúdenia rizík, štruktúrovaného na sledované oblasti alebo systém, môže byť úspešnosť jeho aplikácie ohrozená.

Žiaľbohu typickým príkladom je prístup niektorých spoločností ponúkajúcich zavedenie digitalizácie postavený na tvrdení „je jedno kde budú naše snímače na stroji umiestnené“, veď systém sa naučí aj na poruchách. Samozrejme ale tá porucha môže predstavovať stratu biznisu alebo závažnú haváriu v organizácii. Mnoho spoločností ponúkajúcich digitalizáciu nemá o spôsoboch merania stavu strojov ani minimálnu znalosť. Pojmy ako vibrodiagnostika, tribodiagnostika, termodiagnostika atď. sú pre nich neznámym vedným odborom [9]. Viac ako 50 rokov vyvíjané a v praxi aplikované štandardy sú pre nich problémom pre užívateľa a nie súčasťou seriózneho projektu digitálnej transformácie.

Aby boli dosiahnuté ciele digitalizácie, tieto ciele musia podporovať ciele organizácie (systému) a prinášať pridanú hodnotu vo forme skorého varovania o rizikách pri akejkoľvek zmene (vnútornej a vonkajšej), na základe predikcie nežiadúcich stavov, simulácie potenciálnych dopadov a hodnotenia optimálnych spôsobov ich znižovania.

Dopad digitalizácie, na úrovne manažérstva rizík je schematicky znázornený na obr.2 [2]. Je zrejmé, že digitalizáciou sa nezmení oblasť ALARP (stredného rizika) ale očakáva sa, že úroveň vysokého - netolerovateľnejšieho rizika bude širšia, práve v súvislosti s neistotou, ktorú digitalizácia prináša. Na druhej strane, je však predpoklad vzniku overených štandardizovaných postupov - dobrej praxe, ktorá umožní túto neistotu zmierňovať.



Obr.2 Vplyv digitalizácie na znížovanie rizika a ALARP

4. Bezpečnosť strojov a manažérstvo rizík

Bezpečnosť strojov vyžaduje aplikáciu harmonizovaných noriem. Smernica o strojoch (2006/42/ES) v článku 7 uvádza „Strojové zariadenia vyrobené v zhode s harmonizovanou normou, na ktorú bol uverejnený odkaz v Úradnom vestníku Európskej únie, sa považujú za spĺňajúce základné požiadavky na bezpečnosť a ochranu zdravia, ktorých sa týka takáto harmonizovaná norma“.

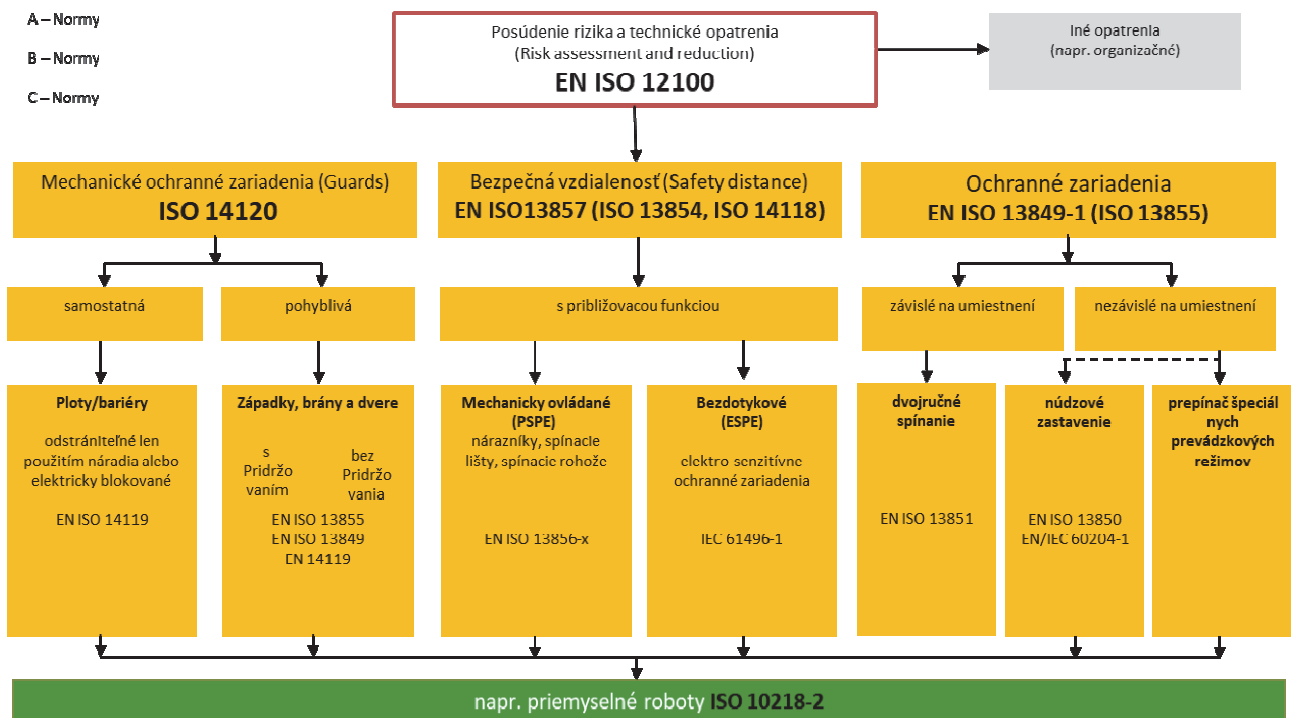
Zjednodušene povedané, na podporu správne skonštruovaného strojového zariadenia je vydávaná celá rada noriem, ktorých splnenie podporuje dosiahnuť požadovanú úroveň bezpečnosti.

Tieto normy majú základnú štruktúru (obr.3):

- Všeobecné bezpečnostné normy: jedná sa o normy typu A, ktoré poskytujú základné pojmy a zásady na projektovanie, konštrukciu a všeobecné hľadiská, ktoré môžu byť aplikované na všetky strojové zariadenia. Medzi základné bezpečnostné normy typu A patrí napríklad EN ISO 12100. Práve táto norma popisuje všeobecné zásady a princípy posudzovania rizika.
- Skupinové bezpečnostné normy: jedná sa o normy typu B, ktoré riešia väčšinou jediný bezpečnostný aspekt alebo jeden typ bezpečnostného zariadenia, ktoré môže byť použité pre väčší počet strojov. Rozdeľujú sa na: normy typu B1, týkajúce sa jednotlivých bezpečnostných aspektov (napr. bezpečných vzdialeností, teploty povrchu, hluku a pod.), a normy typu B2, týkajúce sa príslušných bezpečnostných zariadení (napr. rôznych ochranných krytov, tlakovo citlivých zariadení, dvojručného ovládacieho zariadenia, blokovacieho zariadenia a pod.). Významnou normou je norma ISO 13849-1 (Bezpečnosť strojových zariadení - Bezpečnostné časti

radiacích systémov - Časť 1: Všeobecné zásady pre projektovanie), ktorá stanovuje základné kritériá pre výkonnosť týchto bezpečnostných zariadení na báze rizík.

- Špecifické normy: sú normy typu C, určujúce detailné bezpečnostné požiadavky na jednotlivý konkrétny typ stroja alebo skupinu strojov. Odkazujú sa na súvisiace normy typu A a B alebo ak je to možné, tiež na ďalšie normy typu C a definujú bezpečnostné požiadavky a stanovujú riziká a priority, ktoré sú nutné. Platí zásada, že normy typu B a C nesmú opakovať, príp. slovne opisovať text iných noriem, na ktoré sa odkazujú.



Obr.3 Štruktúra harmonizovaných noriem v oblasti bezpečnosti strojov [10]

Základný rámec na posudzovanie rizík strojov definuje norma ISO 12100 (typ A). Táto norma popisuje algoritmu pozostávajúci z jednotlivých krokov ako je:

- Analýza rizika: stanovenie hraníc stroja, identifikácia nebezpečenstva a odhad pravdepodobnosti a dôsledkov, odhad rizika.
- Hodnotenie rizika na základe úrovne rizika.
- Stanovenie opatrení na znižovanie rizika tzv. trojkrokovou metódou.

Trojkroková metóda predstavuje v prvom rade zmenu konštrukcie, ktorou je možné riziko odstrániť, v druhom kroku zníženie rizika aplikovaním bezpečnostných ochranných zariadení a v treťom kroku informovanie o zostatkovom riziku po prijatí opatrení. Na túto normu nadväzuje najmä v prípade aplikácie bezpečnostných zariadení ISO 13849-1. Ich výkonnosť a spôsob zapojenia je podmienená výsledkom posúdenie rizík (aplikovaním tzv. grafu rizika).

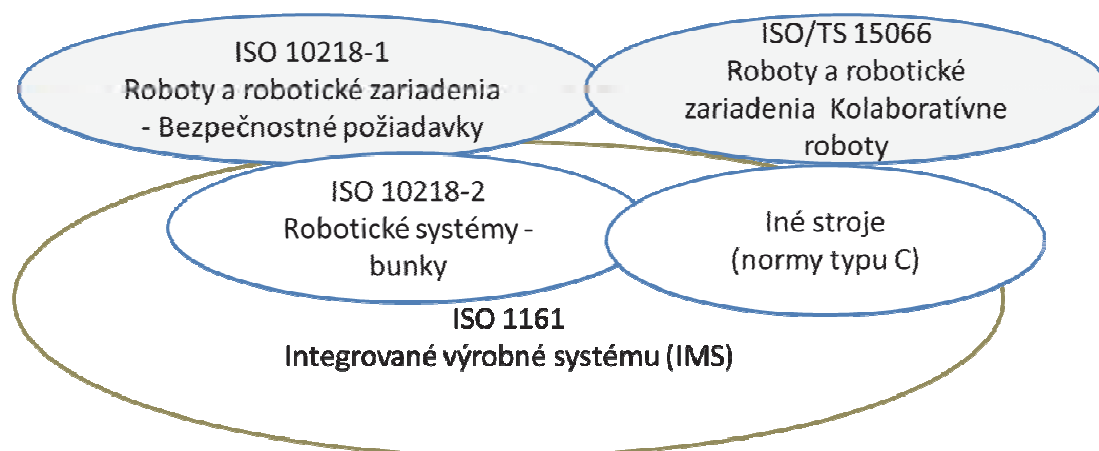
Týmto spôsobom, prostredníctvom harmonizovaných noriem je zaistené nielen identifikovanie všetkých nebezpečenstiev a posúdenie rizík súvisiacich so zamýšľaným použitím stroja počas celého jeho životného cyklu ale aj spoľahlivosť (resp. výkonnosť - PL, angl. performance level) navrhovaných bezpečnostných opatrení tak aby bolo dané riziko pod kontrolou.

Významnou normou z hľadiska digitalizácie v bezpečnosti strojov je norma, resp. technická správa ISO/TR 22100-4 (Bezpečnosť strojov - vzťah s ISO 12100, Časť 4: Návod pre výrobcov strojov pre zváženie aspektov IT bezpečnosti (kybernetickej bezpečnosti). Táto norma popisuje identifikáciu kybernetických hrozieb a ich možný vplyv na bezpečnosť strojov.

Z hľadiska digitalizácie je vhodné využitie tejto normy práve pri vyššej úrovni implementácie digitalizácie do strojových zariadení.

Nemenej dôležitou normou pre podporu digitalizácie je norma ISO 11161 (typ B1) (Bezpečnosť strojov - Integrované výrobné systémy - Základné požiadavky). Popisuje požiadavky na integráciu systémov na báze posudzovania rizík, pričom zvyrazňuje zodpovednosť integrátora - osoby, ktorá navrhuje, montuje vyrába, prevádzkuje IVS a uplatňuje stratégiu bezpečnosti.

Požiadavky na bezpečnosť robotov je zohľadnená v normách najmä typu C - obr.4. Významnou z hľadiska bezpečnosti je norma ISO 10218-1. Táto norma, v prílohe A, podrobne rozpisuje signifikantné nebezpečenstvá pre roboty a robotické systémy, pričom vychádza z identických základných typov nebezpečenstiev ako ISO 12100.



Obr.4 Normy týkajúce sa bezpečnosti robotov a robotických systémov

Norma, resp. technická špecifikácia ISO/TS 15066 je norma pre konštrukciu kolaboratívnych robotov, pričom sa odvoláva na integritu bezpečnosti riadiacich systémov najmä v prípade potreby riadenia sily alebo rýchlosti pohybu robota. V norme sú stanovené limity sily a tlakov najmä vo vzťahu k biomechanickým limitom človeka [11].

5. Záver

Cieľom príspevku bolo poukázať na podporu digitalizácie strojových zariadení prostredníctvom harmonizovaných noriem a najmä poukázať na dôležitosť posudzovania rizík v rôznom stupni zavádzania digitalizácie v organizácii. Industry 4.0 vyžaduje

zefektívniť procesy, „mať pod kontrolou“ zber a kvalitu údajov, ich dostupnosť podľa potreby a dôležitosti rozhodovania. Avšak dôvera v digitalizáciu a umelú inteligenciu závisí od „dobro nastaveného“ manažérstva rizík integrovaného do procesov digitalizácie v organizácii.

Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj, pre projekt: Univerzitný vedecký park TECHNICOM pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií - II. fáza, kód ITMS: 313011D232, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja“, projekt APVV-19-0367 Rámec Integrovaného prístupu riadenia procesnej bezpečnosti pre Inteligentný podnik.

Literatúra

- [1] Smernica Európskeho parlamentu a Rady 2006/42/ES zo 17. mája 2006 o strojových zariadeniach a o zmene a doplnení smernice 95/16/ES.
- [2] Digitalisation: The impact on risk management. Risk world. Dostupné na internete: <https://risktec.tuv.com/risktec-knowledge-bank/digitalisation-risk-management/digitalisation-the-impact-on-risk-management/>
- [3] Morháč, M. Čo je digitalizácia a digitálna transformácia? Urobme si poriadok v pojmoch a významoch. Dostupné na internete: <https://industry4um.sk/en/co-je-digitalizacia-a-digitalna-transformacia-urobme-si-poriadok-v-pojmoch-a-vyznamoch/>
- [4] Kóča, F. Corporate social responsibility standards: is it possible to meet diverse customer requirements? / Andrea Sütőová, Ferdinand Kóča Spôsob prístupu: <http://dx.doi.org/10.2478/mspe-2022-0007...> In: *Management systems in production engineering* - Gliwice (Poľsko): P.A. NOVA Roč. 30, č. 1 (2022), s. 54-61. ISSN 2299-0461
- [5] Pačaiová, H. and G. Ižaríková. Base Principles and Practices for Implementation of Total Productive Maintenance in Automotive Industry, *Quality innovation prosperity-kvalita inovacia prosperita*, Vol. 23, 2019. DOI: 10.12776/QIP.V23I1.1203
- [6] Rodríguez-Espíndola, O., Chowdhury, S., Kumar Dey, P., Albores, P. and A. Emrouznejad. Analysis of the adoption of emergent technologies for risk management in the era of digital manufacturing, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 178, 2022, 121562, ISSN 0040-1625, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121562>
- [7] ISO 31000: Manažérstvo rizika - Návod, princípy, rámec a proces riadenia rizika. 2018
- [8] Nesticò, A.; He, S.; De Mare, G.; Benintendi, R. and G. Masell. The ALARP Principle in the Cost-Benefit Analysis for the Acceptability of Investment Risk. *Sustainability* 2018, 10, 4668. <https://doi.org/10.3390/su10124668>
- [9] Traini, E., Bruno, G. And F. Lombardi. Tool condition monitoring framework for predictive maintenance: a case study on milling process, *International Journal of Production Research*, 59:23, 7179-7193, DOI: 10.1080/00207543.2020.1836419
- [10] Pačaiová a kol. *Posudzovanie a riadenie rizík strojových zariadení*. 1. vyd. - Košice-Šebastovce: BEKI Design 2020. 225 s. ISBN 978-80-553-3698-5
- [11] Valori, M.; Scibilia, A.; Fassi, I.; Saenz, J.; Behrens, R.; Herbster, S.; Bidard, C.; Lucet, E.; Magisson, A.; Schaake, L. and J. Bessler J. Prange-Lasonder, G.B.; Kühnrich, M.; Lassen, A.B.; Nielsen, K. Validating Safety in Human-Robot Collaboration: Standards and New Perspectives. *Robotics* 2021, 10, 65. <https://doi.org/10.3390/robotics10020065>

DYNAMICKÉ ZKOUŠKY ZATĚŽOVACÍ ZÁKLADŮ VELKÝCH TURBOSOUSTROJÍ - SOUČASNÁ PRAXE A PERSPEKTIVNÍ METODY

Roman PAŠEK, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň ¹

Vít HORÁČEK, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň ²

Filip SCHMIDT, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň ³

Luboš SMOLÍK, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň ⁴

Anotace:

Základ turbosoustrojí významně ovlivňuje konfiguraci a cenu výrobního bloku elektrárny, ale také dynamiku rotoru turbosoustrojí. V praxi je velmi obtížné dosáhnout stavu, kdy je první vlastní frekvence základu vyšší než 50 Hz, a proto je většina základů turbosoustrojí provozovaných v ČR poddajná (nízko laděná). Při návrhu poddajného základu se provádí celá řada simulací, jejichž cílem je ověřit, že se vlastní frekvence nachází dostatečně daleko od provozních otáček stroje, a případně navrhnout úpravy zaručující splnění této podmínky.

Výpočtové modely jsou postaveny na řadě předpokladů, které se mohou značně rozcházet od skutečného provedení. Proto se simulace ověřují experimentálně. Tato práce popisuje současnou metodiku provádění tzv. dynamických zkoušek zatěžovacích, což je měření dynamické odezvy základu při nominálním provozu. Normativní dokumenty, např. již zrušená norma ČSN 731020, se zabývají odezvou v blízkosti podpor stroje. V příspěvku jsou také diskutovány nestandardní zkoušky, jako je dlouhodobý monitoring části základu nebo měření provedená na spodní straně základu, které v případě některých bloků mohou poskytnout cenné informace o dynamice systému základ - stroj.

¹ Ing. Roman Pašek
Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.
Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň
mobil: +420 604 806 070, e-mail: pasek@vzuplzen.cz

² Ing. Vít Horáček
e-mail: horacek@vzuplzen.cz

³ Ing. Filip Schmidt
mobil: +420 720 040 891, e-mail: schmidt@vzuplzen.cz

⁴ Ing. Luboš Smolík, Ph.D.
tel.: +420 371 430 792, mobil: +420 601 070 204, e-mail: smolik@vzuplzen.cz

PŘEDEPÍNANÉ ŠROUBOVÉ SPOJE A MOŽNOST JEJICH PREDIKTIVNÍ ÚDRŽBY

POSIBILITIES OF PREVENTIVE MAINTENANCE OF TENSION BOLTED JOINTS

Bohuslav PETERKA, Česká zemědělská univerzita v Praze, TF ¹

Josef POŠTA, Česká zemědělská univerzita v Praze, TF ²

Anotace:

Tento příspěvek se zaměřuje na popis dnes dostupných metod zjišťování osového napětí ve šroubu během montáže, které lze použít také během provozu šroubového spoje. Metody, které přímo umožňují měření během provozu jsou vhodné pro monitoring v údržbě a jsou základem pro sběr informací pro analýzu současného technického stavu a predikci vývoje technického stavu takto sledovaného šroubového spoje.

Annotation:

This paper focuses on the description of the methods available today for detecting axial stress in a bolt during assembly, which can also be used during operation of the bolted joint. Methods that directly allow measurements during operation are suitable for monitoring in maintenance and are the basis for collecting information for the analysis of the current technical condition and the prediction of the development of the technical condition of monitored bolted joint.

1. Úvod

Šroubové spoje jsou nejrozšířenější a univerzální provedení rozebíratelného spojení konstrukcí, jejich částí, dílů a strojních součástí. Na šroubových spojích závisí bezpečnost i spolehlivost zařízení, která je obsahují. Jsou na ně kladeny vysoké požadavky, bývají velmi namáhány nejen mechanicky, ale často také tepelně, korozně, chemicky. Pro jejich dlouhodobě spolehlivou a bezpečnou funkci je důležitý nejen jejich správný konstrukční návrh a výrobní provedení všech jejich částí, ale také správná montáž a zajištění.

Typickým příkladem spojení s předpjatými šrouby jsou spoje různých stavebních, nosných, mostních, podpurných aj. konstrukcí, kde je primárním požadavkem mechanická pevnost a únosnost spojů po celou dobu jejich technického života.

¹ Ing. Bohuslav Peterka, Ph.D.

Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

Kamýcká 129, 165 00 Praha - Suchbát

tel.: +420 224 384 334, e-mail: peterka@tf.czu.cz

² prof. Ing. Josef Pošta, CSc.

tel.: +420 224 383 266, e-mail: posta@tf.czu.cz

Dalším typickým příkladem důležitých a náročných předepjatých šroubových spojů jsou spoje přírubového typu, tj. vícešroubové spoje s předpětím. Pro tento typ spojení je typické, že primárním požadavkem je těsnost spoje za všech projektových provozních podmínek.

2. Montáž a demontáž předepjatých šroubových spojů

Spojovací šrouby jsou vždy předepjaté, tj. musí být utaženy tak, aby v nich vznikla osová tahová síla. Tato osová síla způsobí prodloužení šroubu a stlačení spojovaných součástí. Mezi šroubem a maticí tedy vznikne silový styk, rovněž mezi spojovanými částmi je silový styk (podle provedení spojovaných částí to však může být i tvarový styk).

Osová síla musí být tak velká, aby vyvodila mezi spojovanými částmi tlak tak velký, že:

- tření mezi spojovanými částmi přenesou všechny výsledné příčné síly, a
- při nejvyšším možném vnitřním tlaku bude tlak mezi spojovanými částmi ještě tak velký, že nedojde k jejich oddálení, případně že jimi sevřené těsnění nebude vnitřním přetlakem roztrženo.

Při konstrukčním návrhu daného šroubového spoje je, s přihlédnutím k provozním podmínkám a dalším okolnostem, stanovena hodnota potřebného statického předpětí šroubů. Tato hodnota je vyjádřena jako statická osová síla ve šroubu. Při montáži je pak nezbytně nutné tuto předepsanou, tj. požadovanou, hodnotu osově síly skutečně dosáhnout. Velikost osově síly (tj. předpětí šroubu) je tedy při montáži nutno kontrolovat.

Kontrolu (vytvoření) osově síly ve šroubu lze principiálně provést některým z dále uvedených způsobů:

- kontrola osově síly měřením utahovacího momentu,
- kontrola osově síly měřením úhlu pootočení matice nebo šroubu,
- předepínání šroubů na mez kluzu,
- předepínání s přímým měřením prodloužení šroubu,
- předepínání s ultrazvukovou kontrolou prodloužení šroubu,
- předepínání s použitím speciálních indikačních přípravků.

Při praktické montáži lze některé způsoby kontroly osově síly kombinovat.

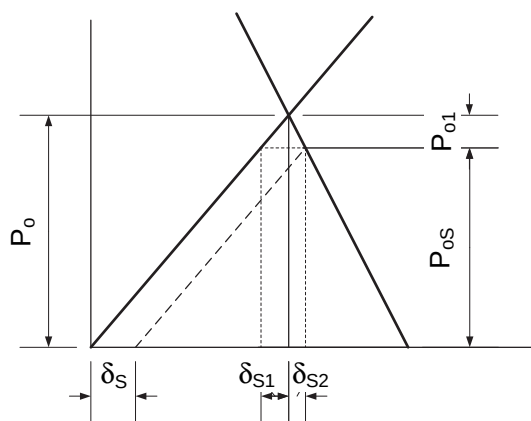
3. Selhání šroubových spojů v provozu

Selhání předepjatého šroubového spoje znamená, že z nějakého důvodu dojde k jeho uvolnění, tj. ke ztrátě jeho předpětí. Příčinou selhání může být nesprávný konstrukční návrh spoje, nevhodné vlastnosti materiálů tvořících součásti spoje, nesprávná montáž, nevhodný způsob zajištění, dlouhodobě působící nepříznivé provozní vlivy.

K uvolnění (povolení) spoje může dojít v důsledku sesedání spoje, nebo pohybu, mikropohybu či pružení součástí spoje.

3.1. Uvolnění spojů sesedáním součástí

Sesedá spoj, který je zatížen ve směru osy šroubu. Utažením předepjatého šroubového spoje dojde ke stlačení dosedacích ploch součástí, dosedacích ploch pod hlavou šroubu a pod maticí, dotykových ploch v závitech. Mikronerovnosti povrchů kontaktních ploch se plasticky deformují a zarovnávají. To působí pokles předpětí, viz obr.1. Tento děj trvá řádově hodiny až dny po utažení. Na sesedání má vliv drsnost povrchů, geometrické nerovnosti, počet stlačovaných ploch a velikost tlaku na stlačovaných plochách. Na velikost tlaku mají vliv také geometrické poměry ve spoji - např. zkosení hran měrný tlak zvyšuje, přírubové provedení hlav šroubů a matic měrný tlak snižuje. Sesedání může být také významně ovlivněno vlastnostmi těsnění, sevřeného ve spoji.



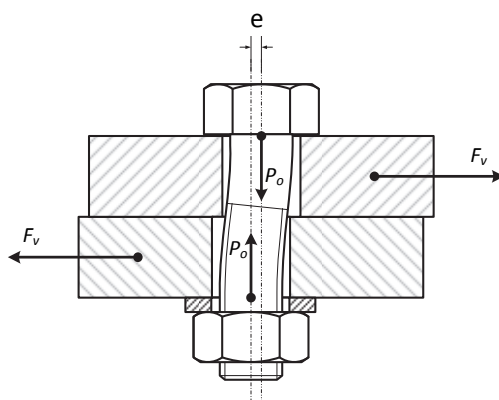
Obr.1 Uvolnění předepjatého šroubového spoje sesednutím (Zdroj: [2])

kde:

- P_o statická síla předpětí vzniklá utažením
- P_{os} statická síla předpětí po sesednutí = skutečná síla předpětí
- P_{o1} pokles statické síly předpětí v důsledku sesednutí
- δ_s celková velikost sesednutí
- δ_{s1} zkrácení předepjaté délky šroubu v důsledku sesednutí
- δ_{s2} zkrácení předepjaté sevřené součásti v důsledku sesednutí

3.2. Uvolnění spojů pohybem součástí

Vlivem dynamických sil, působících na předepjatý spoj v jiném než osovém směru, může docházet k mikroposuvům mezi součástmi spoje. Vlivem těchto posuvů může dojít k rotaci šroubu a matice, tím k následnému poklesu předpětí až k úplnému povolení šroubu, případně až k jeho vypadnutí. Situace je znázorněna na obr.2.



Obr.2 Uvolnění předepjatého šroubového spoje sesednutím (Zdroj: [2])

3.3. Uvolnění spojů relaxací napětí a tečením materiálu

Zatímco sesedání deformacemi povrchových mikronerovností probíhá řádově hodiny až dny, relaxace probíhá dlouhodobě.

Při relaxaci dochází ke zhutňování materiálu, které rovněž snižuje předpětí. Relaxace se významněji projevuje u měkkých kovů, polymerů a kompozitních materiálů.

Tečení materiálu je velmi pomalý pohyb spojený se vznikem trvalých mikrodeformací vlivem dlouhodobě působícího napětí, které se však nachází pod mezí kluzu materiálu. Tečení je výraznější u materiálů, které jsou vystaveny dlouhodobému působení tepla a teplotám blízkým se bodu rekrystalizace. Míra tečení se zvyšuje také s rostoucí teplotou okolního prostředí.

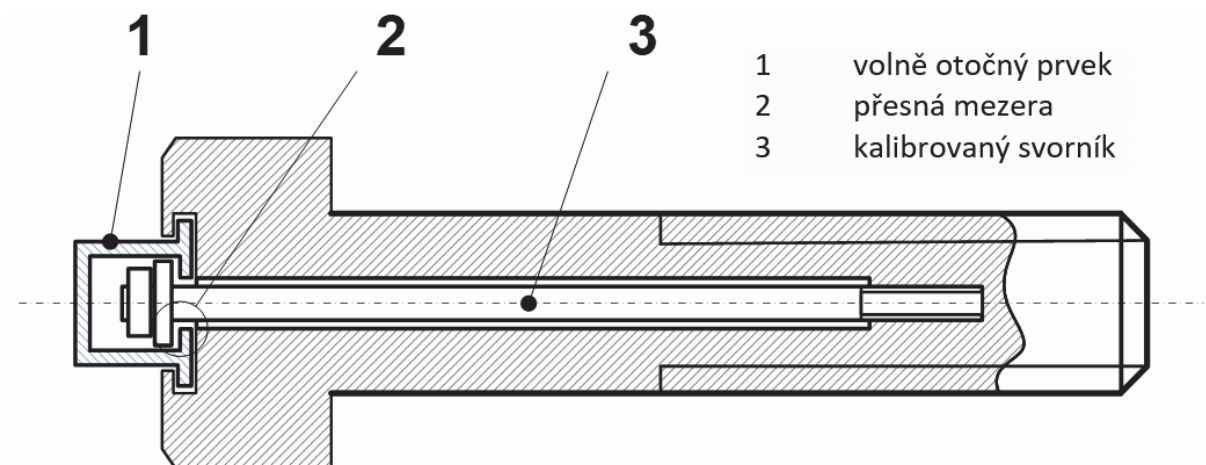
4. Metody zjišťování osově síly vhodné pro provozní monitoring a predikci vývoje

Především důvody selhání šroubových spojů spojené s relaxací napětí a tečením, a to jak šroubu, ale také dalších komponent spoje (příruby, těsnění atp.) mají společný projev spočívající ve změně délky šroubu.

Pokud předpokládáme, že šroubový spoj bude v některých případech vhodné podrobit provozní kontrole stanovené osově síly, nabízí se využití metod měření, které jsou s úspěchem využívány při vlastní montáži šroubového spoje a jsou založeny na měření změny délky šroubu.

4.1. Šrouby s kalibrovaným nosníkem

Šroub Rotabolt, obr.3, má vývrt, ve kterém je vložen kalibrovaný svorník 3, který přesně vymezuje mezeru 2 mezi hlavou svorníku a vsazeným volně otočným prvkem 1. Velikost mezery odpovídá potřebnému prodloužení šroubu pro dosažení požadované osově síly. Jakmile je při utahování šroub natažen o velikost mezery, je znemožněno volné otáčení prvku 1, což hmatově signalizuje montérovi, že požadované předpětí bylo dosaženo.



Obr.3 Princip šroubu RotaBolt (Zdroj: [2])

Na podobném principu pracují dnes dostupné šrouby SmartBolt a MaxBolt, kde je změna délky šroubu indikována v průhledítce resp. je zobrazována barevným indikátorem, nebo zpracována elektronickým snímačem. Variantní provedení MaxBolt SPC4 používá elektronický snímač, který měří posun (změnu polohy) čela svorníku, tuto změnu ukazuje či indikuje přímo na šroubu a může tuto informaci také předávat do nadřazeného systému.



Obr.4 Ukázka systému SPC4 s převodníky a ústřednou pro bezdrátovým přenos dat (Zdroj: [3])

4.2. Měřicí podložky

Další možností provozního měření osově síly je využití tzv. měřících podložek. Podložka je obvykle tvořena siloměrným prvkem, který převádí působící tlakové napětí na elektrický signál dále zpracovávaný nadřazeným systémem (obr.5).



Obr.5 Měřicí podložka s převodníkem na proudovou smyčku 4 ÷ 20 mA (Zdroj: [4])

4.3. Měření ultrazvukem

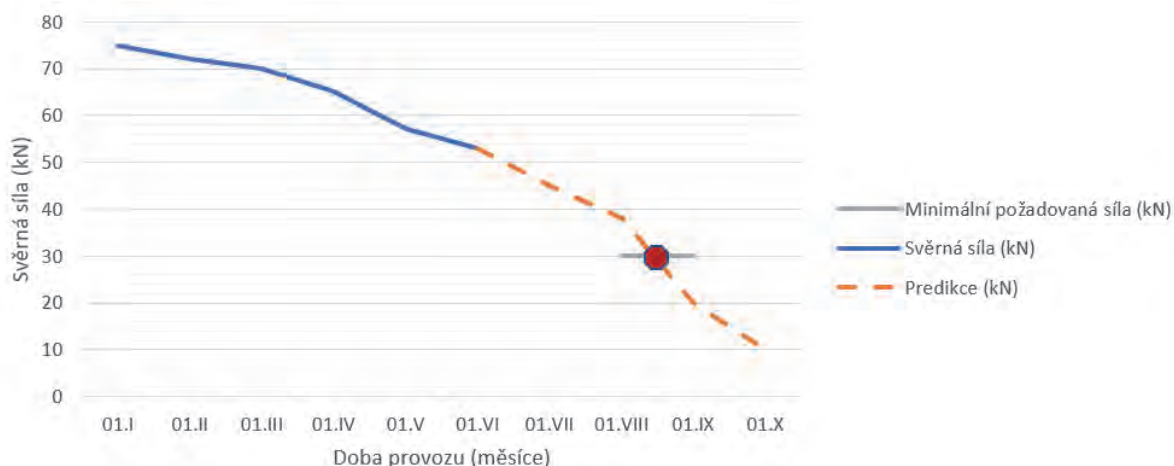
Prodloužení šroubu také nepřímo, pomocí ultrazvuku. Ultrazvuková sonda vysílá do šroubu ultrazvuk, který se jako vlna šíří materiálem šroubu, odrazí se od čela šroubu a postupuje zpět. Sonda zaznamená dobu průchodu vlny tam a zpět, z této doby se vypočítá délka šroubu. Přístroj pro toto měření, obr.6, může zobrazit výsledek v délkových jednotkách, nebo v jednotkách síly, nebo v jednotkách napětí, nebo v procentech přednastavené hodnoty síly či napětí. Takto lze tedy poměrně velmi přesně nastavit požadovanou hodnotu při montáži spoje. Lze však také kdykoliv později tuto hodnotu zkontrolovat, a tak se přesvědčit, zda nedochází k uvolňování spoje. Výhodou tohoto způsobu je, kromě přesnosti a opakovatelnosti měření, také široký rozsah použití. Např. přístroj na obr.6 je schopen měřit šrouby v délkách od 12 mm do 24000 mm, umožňuje také ukládání a následné zpracovávání a porovnávání naměřených hodnot. Nevýhodou tohoto způsobu je vysoká pořizovací cena, pomalá práce při přesném utahování, nutná vysoká kvalifikace pracovníka. V případě požadavku na možnost kontinuálního sledování utažení je nutno každý šroub trvale opatřit ultrazvukovou sondou a tu propojit s nadřazeným systémem.



Obr.6 Přístroje pro ultrazvukové měření prodloužení šroubů (Zdroj: [6], [7])

4.4. Optické měření senzorem FBG

Další možností měření prodloužení šroubu, resp. osového napětí, které skýtá potenciál pro využití v rámci provozního monitoringu je měření ve šroubu zabudovaným senzorem na principu optické tenzometrie Fiber Bragg Grating (FBG). Jedná se v podstatě o optické vlákno s vícenásobnou Braggovou mřížkou vlepené polymerem vhodných vlastností do vývrtu v tělese šroubu. Jak je vlákno spolu se šroubem natahováno nebo zkracováno mění se optické vlastnosti a tím i měřené spektrum záření. Změna spektra je pak převáděna na změnu délky vlákna. Pro tento způsob měření nejsou v současnosti dostupné komerční produkty pro oblast šroubových spojů resp. jejich údržby, měření je omezeno na laboratorní a vývojové zkoušky [6].



Obr.7 Princip predikce na základě měření osově síly ve šroubu (Zdroj: autoři)

5. Závěr

Technická diagnostika v mnoha oblastech údržby již dlouho a s dobrými výsledky poskytuje data o provozu strojů, která je možno dále zpracovat a užitím vhodného algoritmu prognózovat vývoj technického stavu. Problematika šroubových spojů, jejich montáže, údržby a demontáže je velice aktuální a přímo vybízí k využití moderních měřících a diagnostických metod. V odůvodněných provozních případech je pak vhodné sledovat osově napětí ve šroubovém spoji trvale, nebo pochůzkovým systémem a získaná data trendovat. Získaný trend pak ukazuje na provozní chování spoje. Spolu s informací o provozních podmínkách a zatížení může být trend cenným podkladem například pro hodnocení provozního chování těsniv, zajišťovacích prvků a spojením svíraných částí, typicky přírub. Odhadem budoucího vývoje z historických dat získáváme zároveň představu o zbytkové životnosti do okamžiku poklesu svorné síly pod požadovanou minimální mez (obr.7). Získaný časový interval je pak vstupní informací pro optimalizaci a plánování údržby a rovněž předcházení nenadálých havarijních stavů.

Literatura

- [1] Legát, V. a kol. Management a inženýrství údržby. Professional Publishing, Praha 2016, ISBN978-80-7431-119-2
- [2] Pošta, J. a kol. Technologie údržby strojů - Šroubové spoje, 1. vyd., Praha, 2019. 86 s. ISBN 978-80-213-2947-8

- [3] [online]. Dostupné z: Valley Forge and Bolt Mfg. Co. (2022, July 19). SPC4 Load Indicating System | Load Indicating Bolt | VF Bolts. Valley Forge & Bolt. <https://www.vfbolts.com/product/spc4-load-indicating-system-2/>
- [4] Messende Unterlegscheibe, Messunterlegscheibe, Vorspannkraft, Schraubmontage. Wägezellen, Messunterlegscheibe, Schneelastsensor, Messverstärker, Vorspannkraft [online]. Dostupné z: <https://www.bds-solutions.de/BoltValid.html>
- [5] Khomenko, A., Koricho, E. G., Haq, M. and G. L. Cloud. (2016). In-service preload monitoring of bolted joints subjected to fatigue loading using a novel 'monitorque' bolt. Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution, Volume 8, 261-267. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21611-9_32
- [6] Ultrasonic Bolt Measuring Services | Ultrasonic Bolt Measuring Tools. [online] [cit. 31.10.2022]. Dostupné z: <https://milltorc.com/ultrasonic-bolt-measuring-services/>
- [7] Load monitor - BoltScope Ultra - Hydratight. DirectIndustry - The B2B marketplace for industrial equipment: sensors, automation, motors, pumps, handling materials, packaging, etc. [online]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/hydratight/product-53249-2050149.html>

STANOVIŠTĚ PRO ANALÝZU ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ V PODMÍNKÁCH SPECIFICKÝCH PRO LETECKÉ SYSTÉMY

Lukáš PROKOP, VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET ¹

Ondřej KABOT, VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET ²

Jan FULNEČEK, VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET ³

Stanislav MIŠÁK, VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET ⁴

Anotace:

Průrazné napětí plynného dielektrika závisí na jeho tlaku, jak popisuje Paschenova křivka. Používání různých elektrických zařízení ve vysokých nadmořských výškách proto může vést k selhání izolace, pokud není správně navržena pro toto prostředí. Průvodním jevem hrozícího selhání izolace je přítomnost částečných výbojů. Ty mohou být využívány jako prostředek pro diagnostiku stavu izolačního systému elektrických zařízení. Specifickým prostředím pro tuto problematiku jsou elektrické systémy využívané v letadlech, u kterých je v posledních letech snaha o navýšení napěťových hladin, což by vedlo ke snížení jejich váhy. Za účelem analýzy této problematiky bylo vytvořeno stanoviště, které díky speciální vakuové komoře s ohřevem umožňuje jak simulaci podmínek v nehermetické části letadla, tak přivedení vysokého napětí na zkoušený objekt a následnou detekci částečných výbojů. Stanoviště umožňuje krátkodobá i dlouhodobá měření za sníženého tlaku a zvýšené teploty. Umožňuje zároveň napájení vzorku jak stejnosměrným, tak střídavým napětím do úrovně 10 kV. Měření pak může být prováděno jak na jednom vzorku nebo můstkově v případě dvou identických vzorků, což umožňuje eliminaci rušení, které do řetězce vstupuje před samotnou komorou. Naměřené průběhy pak mohou být dále analyzovány a problematika popsána.

Annotation:

The breakdown voltage of a gaseous dielectric depends on its pressure, as described by the Paschen's curve. Therefore, the use of various electrical equipment at high altitudes can lead to insulation failure if not properly designed for this environment. An accompanying phenomenon of impending insulation failure is the presence of partial discharges. These can be used as a means of diagnosing the condition of the insulation system of electrical equipment. A specific environment for this issue is the electrical systems used in aircrafts, where in recent years there has been an effort to increase the voltage levels, which would lead to a reduction in their weight. To analyse this issue, a test-stand was created which, thanks to a special heated vacuum chamber, enables the simulation of conditions in the non-hermetic part of the aircraft, as well as the application of high voltage to the tested object and the subsequent detection of partial discharges. The

¹ doc. Ing. Lukáš Prokop, Ph.D.

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Centrum energetických jednotek pro využití netradičních zdrojů energie
17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava - Poruba
tel.: +420 596 999 306, e-mail: lukas.prokop@vsb.cz

² Ing. Ondřej Kabot

tel.: +420 596 993 449, e-mail: ondrej.kabot@vsb.cz

³ Ing. Jan Fulneček, Ph.D.

tel.: +420 596 993 449, e-mail: jan.fulnecek@vsb.cz

⁴ prof. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D.

tel.: +420 596 999 308, e-mail: stanislav.misak@vsb.cz

test-stand enables short-term and long-term measurements under reduced pressure and elevated temperature. At the same time, it enables the supply of the sample with both direct and alternating voltage up to the level of 10 kV. The measurement can then be performed both on one sample and bridge measurement method can be used in the case of two identical samples, which enables the elimination of interference that enters the chain before the chamber itself. The measured signals can then be further analysed, and the issue described.

PLASTICKÁ MAZIVA PRO LOŽISKA ELEKTROPOHONŮ HYBRIDNÍCH VOZIDEL A ELEKTROMOBILŮ

Pavel RŮŽIČKA, TotalEnergies Marketing ČR s.r.o., Praha ¹

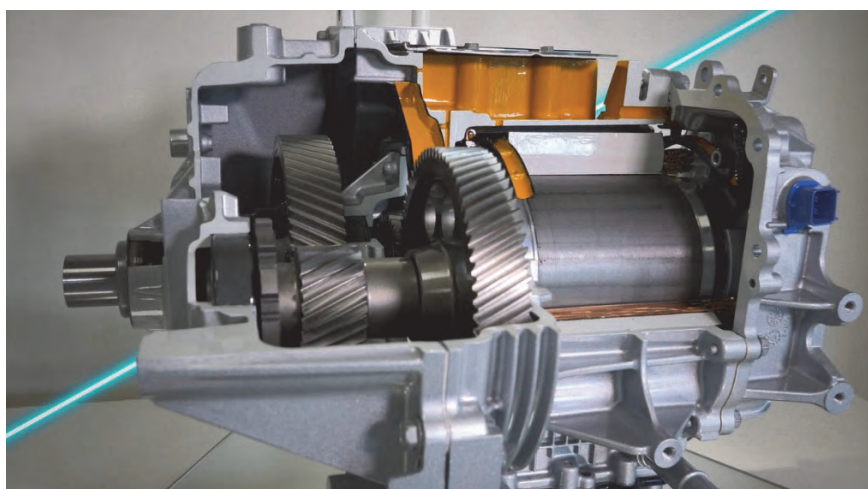
Ladislav HRABEC, VŠB - Technická univerzita Ostrava, FS ²

1. Úvod

Je zřejmé, že v souladu se současnou strategií podpory životního prostředí probíhá v posledních letech skutečně mohutným tempem intenzivní vývoj v oblasti elektropohonů pro hybridní vozidla a elektromobily (dále jen elektro-automobily). Tomu odpovídá i stále se zvyšující množství sériově vyráběných vozidel. Třebaže to není patrné na první pohled, neobejdou se i tato vozidla s elektropohony bez provozních náplní, jež umožňují dlouhodobé zajištění jejich spolehlivého provozu. Cílem daného příspěvku je podat základní informaci týkající se vhodných plastických maziv pro ložiska pohonných agregátů automobilů s elektropohony.

2. Elektrické pohonné agregáty hybridních vozidel a elektromobilů

Elektroagregáty hybridních vozidel a elektromobilů jsou tvořeny elektromotory, jež jsou zdrojem točivého momentu, dále přenášeným pomocí příslušných převodů na kola vozidla (obr.1). K akumulaci elektrické energie pak slouží dobíjecí zdroje - baterie (obr.2).



Obr.1 Pohonný elektroagregát vozidla [1]

¹ Ing. Pavel Růžička, Ph.D.

Technický poradce TotalEnergies Marketing ČR s.r.o.

Rohanské nábřeží 678/29, 186 00 Praha 8 - Karlín

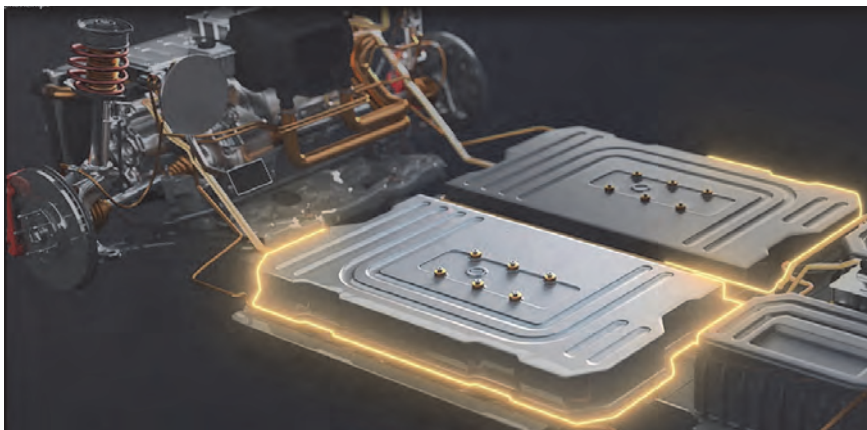
e-mail: pavel.ruzicka@external.totalenergies.com, <https://totalenergies.cz/>

² Ing. Ladislav Hrabec, Ph.D.

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní

17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava - Poruba

tel.: +420 597 324 600, e-mail: ladislav.hrabec@vsb.cz



Obr.2 Bateriový systém na elektrovozidlech [2]

V případě elektromobilů (BEV - Battery Electric Vehicle) je zdrojem hnací síly třífázový elektromotor (podrobněji viz [2]), jehož výkon definuje dynamiku vozidla. Je zřejmé, zatížení motoru elektromobilu je vysoké, čemuž vzhledem k rozměrům pro dané výkony odpovídá i značné tepelné zatížení.

Rotor elektromotoru je uložen ve valivých ložiscích naplněných plastickým mazivem a zakrytých oboustranně. Ložiska jsou lícovaně uložena v koncových přírubách motoru a jsou pojištěna proti případnému axiálnímu posunu. Motory běžných BEV se pohybují okolo $80 \div 100$ kW svého výkonu [2]. Je zřejmé, že zejména tepelné zatížení valivých ložisek klade vysoké nároky na mazání a technické parametry vhodných plastických maziv aplikovaných v ložiscích. Jedná se zejména o:

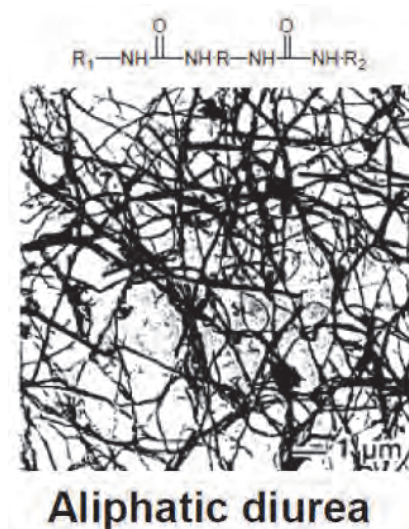
Zmíněné komponenty pracují při zvýšených teplotách a kladou na provozní náplně a kapaliny speciální požadavky:

- vysoce účinné dielektrické izolační vlastnosti z důvodu blízkého kontaktu s elektroagregáty vozidel,
- dlouhodobé spolehlivé mazání s minimalizací opotřebení, a to také při extrémních provozních podmínkách,
- zesílené antioxidační vlastnosti zabraňující degradaci maziva.

3. Vhodná plastická maziva pro valivá ložiska elektromotorů vozidel s elektromotory - plastická maziva se zpevňovadlem na bázi polymočoviny

Pro aplikace náplní valivých ložisek elektrických točivých strojů se stále častěji používají účinná plastická maziva se zpevňovadlem na bázi polymočoviny. Polymočovina představuje tzv. „nemýdelnaté“ zpevňovadlo na bázi mnohonásobných močovinných vazeb. Obr.3 znázorňuje tzv. strukturu na bázi alifatické polymočoviny.

Plastická maziva se zpevňovadlem na bázi polymočoviny se vyznačují zejména dlouhou životností, čili dlouhodobým zachováním podstatných funkcí maziva za velmi náročných provozních podmínek (vysoké teploty, tlaky, suché nebo naopak vlhké prostředí, ...). Nejvyšší kvalitu představují maziva, kde se podařilo při zvýšených provozních teplotách prodloužit životnost ve srovnání s „klasickými“ komplexními mazivy až o 50%. Tato maziva poskytují výborný mazací výkon, zesílenou mechanickou stabilitu a pevnost ve smyku, účinnější antikorozi ochranu a trvalý výkon jak při vysokých tak nízkých teplotách. Vykazují velmi dobrou skladovatelnost a rovněž vysokou odolnost vůči tuhnutí. Pozoruhodná je i schopnost snižovat hlučnost provozovaného zařízení.



Obr.3 Alifatická polymočovina

Z hlediska tepelného zatížení je důležitá vlastnost těchto maziv, že nekapalní ani při teplotách přesahujících 280 °C. Pozoruhodný je rovněž fakt, že molekulární struktura maziv je mnohem stabilnější než u maziv s kovovými mýdly. To znamená, že energie může být pohlcována, aniž by docházelo k destrukci zpevňovačů.

Plastická maziva na bázi polymočoviny jsou charakteristická jako maziva snižující hlučnost zařízení. Je to dáno rovněž molekulární strukturou, tzv. samoregenerací a speciálními charakteristikami při oscilačních pohybech nebo při výskytu vibrací. To zvyšuje životnost vysokootáčkových ložisek.

Uvedená plastická maziva nové generace na bázi polymočoviny, vyrobená speciální technologií za účelem dosažení optimálních parametrů plastického maziva, se vyznačují následujícími ekonomicko-provozními výhodami:

- díky zvýšené životnosti - podstatně kratší servisní intervaly a činnosti spojené s mazáním a údržbou,
- racionalizace skladových zásob a typů maziv, jelikož maziva mohou nahradit mnoho druhů jiných maziv díky svému širokému teplotnímu rozsahu použití,
- prodloužená životnost až o 50% oproti „klasickým“ komplexním mazivům,
- nižší riziko nákladných poškození a havárií,
- snížené riziko chybné aplikace maziva v důsledku zjednodušené údržby,
- zvýšená bezpečnost na pracovišti v důsledku nižších ztrát a úniků,
- maziva neobsahují žádné těžké kovy nebo složky, které jsou považovány za škodlivé lidskému zdraví a životnímu prostředí.

Tabulky 1 a 2 znázorňují technické parametry plastických maziv řady ALTIS se zpevňovačem na bázi polymočoviny (tab.1 - základový olej na minerální bázi, tab.2 - základový olej na syntetické esterové bázi).

Tab.1 Plastické mazivo na bázi polymočoviny a minerálního základového oleje

TYPICKÉ PARAMETRY	METODY	JEDNOTKY	ALTIS EM 2
Mýdlo/zpevňovadlo		-	Polymočovina
NLGI stupeň	ASTM D 217/DIN 51 818	-	2
Barva	Vizuální	-	Kobaltová zelená
Vzhled	Vizuální	-	Hladký
Rozsah provozních teplot		°C	- 20 to 180
Penetrace při 25°C	ASTM D 217/DIN51 818	0.1 mm	265 - 295
Oddělení oleje 168 hod. při 40°C	DIN 51 817/IP 121/NFT 60-191	% mass	< 1
Test na vys. otáčky a tepl. 10.000rpm/149°C	ASTM D 3336	Hrs.	> 1300
Antikorozivní test SKF- EMCOR	DIN 51 802/IP220/NFT 60-135/ISO 11007	hodnocení	0 - 0
Bod skápnutí	IP 396/DIN ISO 2176	°C	> 260
Kinemat. viskozita zákl. oleje při 40°C	ASTM D 445/DIN 51 562-1/ISO 3104/IP71	mm²/s (cSt)	110
FAG-FE9 3000/1.5/170 °C	DIN 51 821	h F10/F50	> 225

Tab.2 Plastické mazivo na bázi polymočoviny a syntetického základového oleje

TYPICKÉ PARAMETRY	METODY	JEDNOTKY	ALTIS SH 2
Mýdlo/zpevňovadlo		-	Polymočovina
NLGI stupeň	ASTM D 217/DIN 51 818	-	2
Barva	Vizuální	-	Světle žlutá
Vzhled	Vizuální	-	Hladký, jemný
Rozsah provozních teplot		°C	- 40 to 180
Penetrace při 25°C	ASTM D 217/DIN51 818	0.1 mm	265-295
Tekutost-tlak 1400 mbar	DIN 51 805	°C	- 43
Penetrace při -40°C		0.1 mm	90
Dlouhodobý test 150 °C	ASTM D 3336	Hrs	> 2000
Čtyřkuličkový test EP	ASTM D 2596	Kgf	> 315
Antikoroze SKF- EMCOR	DIN 51 802/IP220/NFT 60-135/ISO 11007	hodnocení	0-0
Bod skápnutí	IP 396/DIN ISO 2176	°C	>280
FAG-FE9 3000/1.5/170 °C	DIN 51 821	h F10/F50	> 400
Kinemat. viskozita zákl. oleje při 40°C	ASTM D 445/DIN 51 562-1/ISO 3104/IP71	mm²/s (cSt)	80

4. Závěr

Vozidla s elektropohony jsou vybavována stále dokonalejšími pohonnými agregáty. Ty vyžadují sofistikované provozní náplně pro ně určené s formulacemi, jež odpovídají nejnáročnějším technickým požadavkům a provozním podmínkám.

Výše zmíněná nová generace plastických maziv na bázi polymočoviny tvoří kompletní řadu produktů, které prošly náročným technickým vývojem, od maziv pro celoživotní náplně elektromotorů, přes maziva na minerální bázi s vysokotlakými aditivy až po mazivo na syntetické esterové bázi doporučené zejména pro vysokootáčková tepelně zatížená valivá ložiska. Vhodná je tedy aplikace těchto maziv právě pro valivá ložiska elektrických strojů v elektropohonech vozidel.

Literatura

- [1] Prezentační materiály TotalEnergies
- [2] Josef Gamba. Elektromobily a některé jejich poruchy. In *Tribotechnika v provozu a údržbě 2022*. VŠB-TU Ostrava, 2022. Orea Resort Devět Skal, Sněžné. ISBN 978-80-248-4647-7

LOKALIZACE RÁZOVÉHO BUZENÍ V TECHNOLOGICKÉM CELKU S VYUŽITÍM VLNKOVÉ TRANSFORMACE

Luboš SMOLÍK, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň ¹

Václav HOUDEK, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň ²

Zdeněk KUBÍN, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň ³

Anotace:

Vibrace a vlny vyvolané rázovým buzením se mohou vyskytovat v nejrůznějších zařízeních a systémech. Pro případy, kdy má systém jednoduchou geometrii - jde například o desky, nosníky, hřídele nebo potrubí - existuje pro úlohu lokalizace buzení celá řada dobře popsanych metod. Tato práce ale představuje experimentální metodu využitelnou pro lokalizaci rázového buzení v systému s libovolnou geometrií, tedy i s takovou, o které uživatel metody nic neví. Metoda využívá současné měření průběhu vibrací v bodech o známé poloze. Samotná lokalizace probíhá ve dvou krocích: nejprve se určí časy příchodu vln do jednotlivých měřicích bodů a poté je s využitím optimalizační úlohy s vazebními podmínkami nalezena nejpravděpodobnější pozice buzení. Časy příchodu vln jsou určeny pomocí nově vyvinuté metody využívající kontinuální vlnkovou transformace a optimální dělení intervalu. Práce dále prezentuje dva případy nasazení uvedené metody: jednak laboratorní měření na upínacím přípravku pro validaci metody a poté lokalizaci buzení ve víceetapové převodovce.

Annotation:

Vibration and waves due to shocks can occur in various equipment and machinery. In cases when the mechanical system is of simple geometry - such as a plate, beam, shaft or pipe - there are many well-described methods to locate the excitation point. This paper, however, presents a method to locate the excitation point in the system of arbitrary 3D geometry, which can even be unknown to the user. The method employs concurrent measurements of vibration waveforms at measurement points with known coordinates. Localisation is a two-step process: first, the times of arrival of the travelling waves have to be determined at each measurement point, and then the most probable excitation point is found by solving a constraint optimisation problem. This work proposes a novel technique to estimate the times of arrival by combining continuous wavelet transform with optimal interval partitioning. Furthermore, the paper presents two experiments that employed the proposed method. The first one was performed in a lab to validate the method, and the second one was performed in situ to locate damage in a multi-stage gearbox.

¹ Ing. Luboš Smolík, Ph.D.

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň

tel.: +420 371 430 792, mobil: +420 601 070 204, e-mail: smolik@vzuplzen.cz

² Ing. Václav Houdek

e-mail: houdek@vzuplzen.cz

³ Ing. Zdeněk Kubín, Ph.D.

tel.: +420 371 430 793, mobil: +420 737 273 730, e-mail: kubin@vzuplzen.cz

1. Úvod

Lokalizace rázů je speciální disciplína nedestruktivní diagnostiky využívaná v aplikacích, kde je požadována vysoká bezpečnost nebo spolehlivost provozu, jako je aerospace, energetika a potrubní doprava. Úloha lokalizace zahrnuje dva problémy: určení času příchodu vlny (ToA) vyvolané rázem do jednotlivých měřicích bodů a formulaci vztahů pro odhad polohy zdroje, které obvykle vyžadují znalost rychlosti šíření vlny.

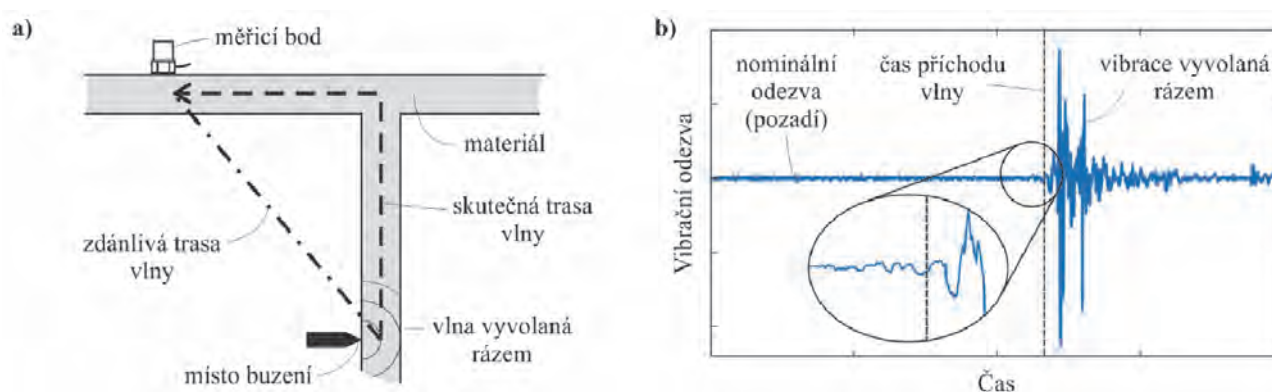
Vědecká literatura představuje různé metody pro odhad polohy zdroje. Asi nejjednodušší je triangulace předpokládající konstantní a známou rychlost šíření vzruchu od zdroje vyžadující určitý počet pevných měřicích bodů [1]. Sofistikovanější metody využívají metody založené na technice formování paprsku (angl. *beamforming*). To je technika prostorového filtrování, která dokáže v pevném měřicím bodě určit směr, ze kterého vzruch přichází [2]. Tyto metody nejsou příliš vhodné pro anizotropní prostředí, protože v takovém případě vyžadují znalost vztahů mezi rychlostí šíření vzruchu a anizotropií prostředí. Pro lokalizaci zdrojů buzení v anizotropních prostředích se tak často používají metody jiné. V případě anizotropních ploch je populární metoda, která využívá několik velmi blízko umístěných snímačů vibrací nebo akustické emise, které slouží pro určení ToA vzruchu, směru, ze kterého vzruch přichází, a případně vzdálenosti zdroje. Běžně využívaná jsou pole šesti snímačů [3], v novější literatuře byla úspěšně použita i pole o čtyřech snímačích [4]. Metoda [3] nevyžaduje znalost rychlosti šíření vzruchu a polohu zdroje řeší jako optimalizační úlohu, ve které jsou rychlosti optimalizační proměnné.

ToA se standardně definuje jako první vzorek, na kterém je možné detekovat přítomnost užitečného signálu způsobeného vzruchem [3]. Vzhledem k tomu, že je ToA potřebné v celé řadě aplikací, existuje pro jeho určení velké množství metod. Nejjednodušší metoda určuje ToA jako čas, kdy užitečný signál překročí stanovenou prahovou hodnotu [5]. Tato metoda je ale citlivá na nastavení prahové hodnoty a není vhodná v situacích, kdy má užitečný signál malý odstup od pozadí. Často se tak ToA určuje až po oddělení užitečného signálu od pozadí. To lze provést širokým spektrem nástrojů. Za všechny uvedme speciálně navržené filtry [6], metody postavené na vzájemné korelaci signálů [7], Fourierově analýze [8] a vlnkové transformaci [9]. Další speciální metody jsou uvedeny např. v [10].

Tento příspěvek představuje české odborné veřejnosti experimentální metodu využitelnou pro lokalizaci rázového buzení v systému s libovolnou geometrií, která byla původně navržena v předchozí práci autorů [10]. Metoda je inovativní ve způsobu určení ToA, které je postaveno na kombinaci kontinuální vlnkové transformace [11] a optimálního dělení intervalu [12]. Kombinace těchto metod umožňuje určit ToA s přesností na jednotky vzorkovacích period i pokud má užitečný signál malý odstup od pozadí. Vlastní úloha lokalizace buzení je řešena jako optimalizační úlohy s vazebními podmínkami. I zde je navržen nový postup, který umožňuje provést měření dat po částech. Díky tomu není uživatel metody limitován dostupným počtem snímačů či měřicích kanálů.

2. Metody

Každý ráz předá soustavě energii, která se obvykle dá sledovat jako vlna šířící se materiálem od místa rázu. Průchod vlny je možné měřit snímači umístěnými v pevných bodech. Dráha, kterou vlna urazí od místa rázu do měřicího bodu může být obecně delší, než je spojnice těchto dvou bodů, viz obr.1a. Algoritmus lokalizující místo rázu ale nezná skutečnou dráhu vlny a proto tento operuje s tzv. zdánlivou trasou vlny, což je spojnice mezi místem buzení a měřicím bodem, a zdánlivou rychlostí vlny, což je rychlost, kterou by se vlna šířila, pokud by se pohybovala po zdánlivě trase.



Obr.1 a) Porovnání skutečné a zdánlivé trasy vlny a b) typický průběh vlny měřený pevném měřicím bodě.

2.1. Odhad času příchodu vlny

Aby bylo možné lokalizovat místo rázu, je nutné přesně určit ToA vlny do měřicího bodu. Typický průběh vlny měřený v pevném bodě je ukázán na Obr.1b. Pro přehlednost jde o případ, kdy vlna způsobí řádově vyšší odezvu, než je nominální odezva (pozadí). I v tomto takřka ideálním případě je obtížné z časového průběhu stanovit ToA vlny s přesností vyšší než několik jednotek až desítek vzorkovacích period.

Proto je pro tuto úlohu použita časově-frekvenční analýza. Asi nejpoužívanější metodou časově-frekvenční analýzy je krátkodobá Fourierova transformace (STFT). Jak ukazuje obr.2a, STFT poskytuje konstantní rozlišení v čase i ve frekvenci v celém analyzovaném frekvenčním rozsahu. Časové rozlišení, které je pro odhad času příchodu vlny stěžejní, lze zlepšit za cenu snížení frekvenčního rozlišení. Lze dokázat, že

$$\sigma_t \sigma_f \geq \frac{1}{4\pi} \approx 0,08 \text{ cyklu},$$

kde σ_t , σ_f jsou směrodatné odchylky odhadů času a frekvence. Kontinuální vlnková transformace (CWT) se také řídí principem neurčitosti uvedeným výše, ale časové rozlišení se napříč frekvenčním rozsahem mění, viz obr.2b. Díky tomu CWT poskytuje dobré časové rozlišení pro děje odehrávající se na vysokých frekvencích, což je žádoucí pro zde popisovanou aplikaci.

CWT je podobně jako STFT integrální transformací, která je definována vztahem [11]

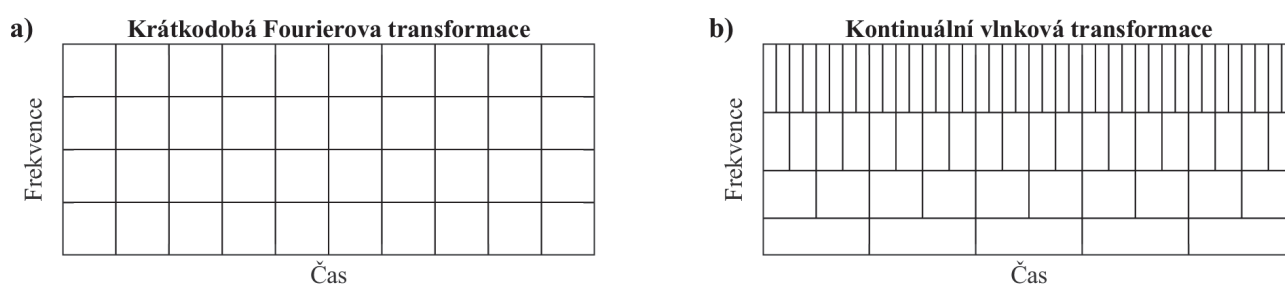
$$W(s, t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \Psi^*\left(\frac{t - \tau}{s}\right) d\tau,$$

kde $x(t)$ je transformovaný signál, $\Psi^*(t)$ je komplexně sdružená mateřská vlnka a parametry τ , s definují časový posun a měřítko mateřské vlnky. Mateřská vlnka se volí s ohledem na zamýšlenou aplikaci CWT. Obecně platí, že pro úlohy časové lokalizace je vhodné volit mateřské vlnky, které svým tvarem odpovídají lokalizovanému ději, tedy

signálu, který je ukázán na obr.1b. Tento signál lze velmi přibližně popsat jako frekvenční modulaci Gaussovy křivky, čemuž odpovídá tzv. Morletova vlnka

$$\Psi(t) = \sqrt{\frac{2\sigma_\omega^2}{\pi}} \exp(i\omega_c t - \sigma_\omega^2 t^2),$$

kde i je imaginární jednotka a parametry ω_c, σ_ω vyjadřují centrální frekvenci a frekvenční rozptyl vlnky. Práce [10,11] ukazují, že parametry ω_c, σ_ω přímo souvisí s měřítkem s . To znamená, že jakékoliv měřítko s jednoznačně odpovídá frekvenci a v případě použití Morletovy vlnky lze výsledky CWT jednoduše interpretovat v čase i frekvenci.



Obr.2 Schématické porovnání časového a frekvenčního rozlišení krátkodobé Fourierovy transformace (STFT) a kontinuální vlnkové transformace (CWT). a) Zatímco STFT má konstantní rozlišení v obou oblastech, b) CWT má vyšší frekvenční rozlišení na nízkých frekvencích a lepší časové rozlišení na vysokých frekvencích.

Obr.3a ukazuje tvar Morletovy vlnky pro $\omega_c = 1$ a $\sigma_\omega \in \{0,1, 0,5\}$. Aplikace CWT využívající Morletovu vlnku s různými hodnotami frekvenčního rozptylu σ_ω na odezvu na buzení rázovým kladívkem z obr.3b jsou potom ukázány na obr.3c - 3f. Odtud je patrné, jak se při zvyšování hodnoty σ_ω zhoršuje frekvenční rozlišení CWT v pásmu $1 \div 3$ kHz a jak se naopak zlepšuje rozlišení časové. Pro $\sigma_\omega = 0,5$ již stanovení času příchodu vlny téměř nezáleží na volbě frekvence, protože škálogram má v rozmezí $1,5 \div 3$ kHz prakticky totožný obsah. V tomto rozmezí je navíc velmi příznivý odstup užitečného signálu od šumu (pozadí), a to kolem 40 dB. Velmi podobné vlastnosti mají škálogramy pro $\sigma_\omega \in (0,5, 2)$. Pro $\sigma_\omega > 2$ je už odstup signálu od šumu nízký a tyto hodnoty σ_ω tak nejsou vhodné pro aplikace s významným vlivem pozadí.

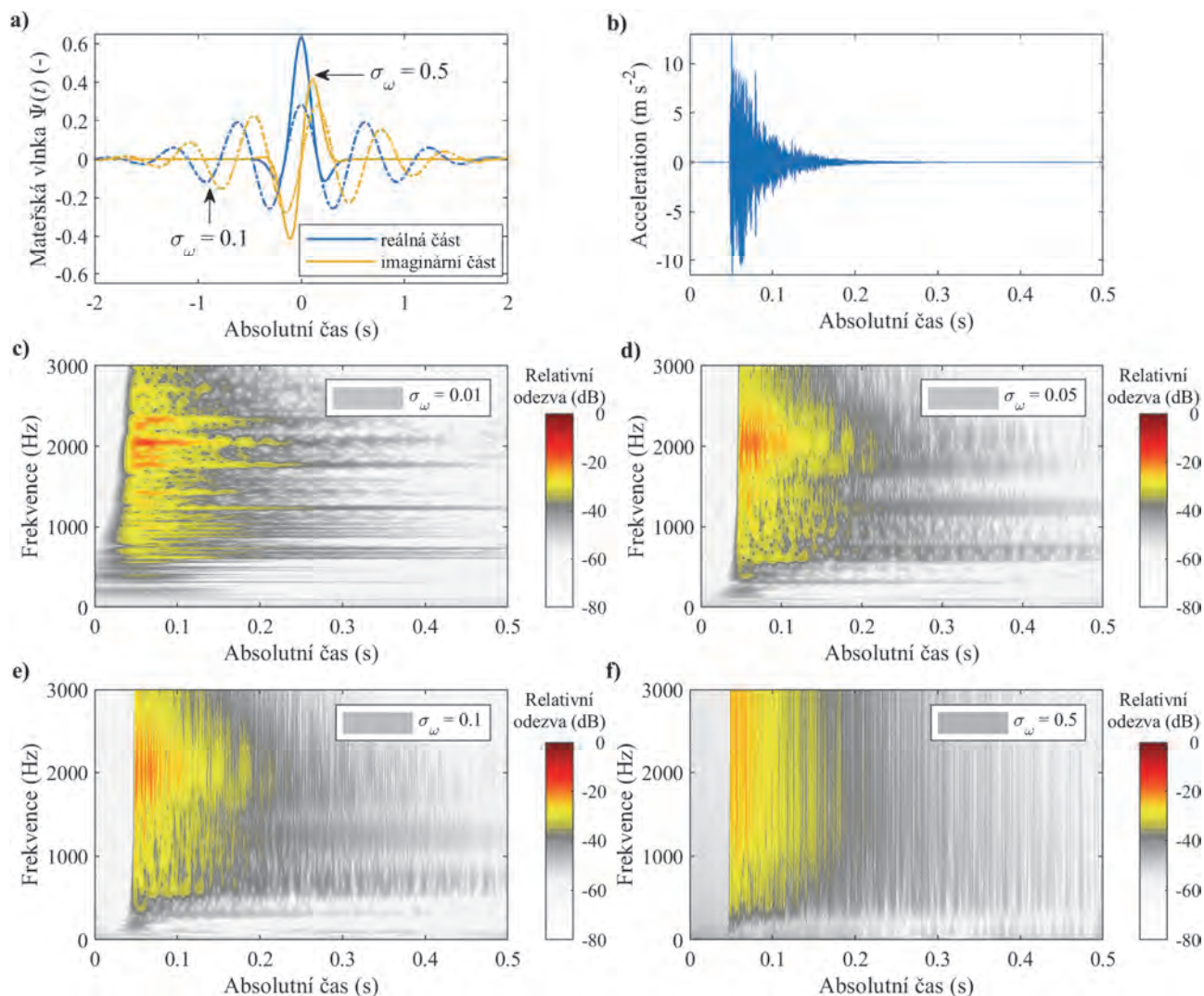
Škálogramy jsou dále využity pro stanovení času příchodu vlny. Konkrétně se uvažuje řez škálogramem o konstantní frekvenci f_0 , který je velmi podobný vlně z obr.3b, a to i v případě, kdy je původní signál zatížen vlivem pozadí. ToA je pak z daného řezu určen pomocí metody optimálního dělení intervalu popsané v [12]. Tato metoda rozdělí posloupnost X na dva segmenty $X_{1:p}$ a $X_{p+1:m}$ tak, že platí:

$$C(X_{1:p}) + C(X_{p+1:m}) + k < C(X),$$

kde k je nezáporná konstanta a C je cenová funkce. Bod p je nalezen tak, aby k bylo maximální. Hodnota p tedy závisí na volbě cenové funkce C . V případě, kdy je C aritmetický průměr segmentu, odpovídá p bodu, kde je rozdíl aritmetických průměrů $X_{1:p}$ a $X_{p+1:m}$ maximální. Posloupnost X je nutné vybrat tak, aby její levá strana obsahovala pouze pozadí a pravá strana kombinaci užitečného signálu a pozadí.

2.2. Nalezení místa rázového buzení

Předpokládejme, že místo rázového buzení - dále *zdroj* - je hledáno pomocí $N + 1$ snímačů v $P > N + 1$ měřicích bodech. Pak jeden ze snímačů musí být umístěn v pevném referenčním bodě a celá zkouška vyžaduje provedení $M - (P - 1)/N$ sad měření. Dále použité označení poloh referenčního bodu, měřicích bodů a ToA vlny je uvedeno v tab.1, která předpokládá, že zkouška je provedena s využitím tříosých snímačů zrychlení. Metoda je nicméně použitelná i v případě, že je měření provedeno pomocí jednoosých snímačů libovolné vibrační veličiny nebo akustické emise.



Obr.3 a) Vliv parametru σ_ω na tvar Morletovy vlnky za předpokladu $\omega_c = 1, \tau = 0, s = 0,1$.
b) Typická odezva na buzení rázovým kladívkem a c) ÷ f) škálogramy této odezvy získané pomocí Morletovy vlnky s různými hodnotami parametru σ_ω .

Tab.1 Označení poloh referenčního snímače $\mathbf{A}_R$ a měřicích bodů $\mathbf{A}_i^{(j)}$ a ToA vlny do referenčního bodu $\mathbf{t}_R^{(j)}$ a do měřicích bodů $\mathbf{t}_i^{(j)}$. Směry x, y, z jsou vztaženy ke globálnímu souřadnicovému systému, tzn. že nejsou závislé na natočení snímače.

Sada měření	Referenční bod	Snímač č. 1	...	Snímač č. N
$\{1\}$	$\mathbf{A}_R = \begin{bmatrix} a_{Rx} \\ a_{Ry} \\ a_{Rz} \end{bmatrix}, \mathbf{t}_R^{(1)} = \begin{bmatrix} t_{Rx}^{(1)} \\ t_{Ry}^{(1)} \\ t_{Rz}^{(1)} \end{bmatrix}$	$\mathbf{A}_1^{(1)} = \begin{bmatrix} a_{1x}^{(1)} \\ a_{1y}^{(1)} \\ a_{1z}^{(1)} \end{bmatrix}, \mathbf{t}_1^{(1)} = \begin{bmatrix} t_{1x}^{(1)} \\ t_{1y}^{(1)} \\ t_{1z}^{(1)} \end{bmatrix}$	...	$\mathbf{A}_N^{(1)} = \begin{bmatrix} a_{Nx}^{(1)} \\ a_{Ny}^{(1)} \\ a_{Nz}^{(1)} \end{bmatrix}, \mathbf{t}_N^{(1)} = \begin{bmatrix} t_{Nx}^{(1)} \\ t_{Ny}^{(1)} \\ t_{Nz}^{(1)} \end{bmatrix}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
$\{M\}$	$\mathbf{A}_R = \begin{bmatrix} a_{Rx}^{(M)} \\ a_{Ry}^{(M)} \\ a_{Rz}^{(M)} \end{bmatrix}, \mathbf{t}_R^{(M)} = \begin{bmatrix} t_{Rx}^{(M)} \\ t_{Ry}^{(M)} \\ t_{Rz}^{(M)} \end{bmatrix}$	$\mathbf{A}_1^{(M)} = \begin{bmatrix} a_{1x}^{(M)} \\ a_{1y}^{(M)} \\ a_{1z}^{(M)} \end{bmatrix}, \mathbf{t}_1^{(M)} = \begin{bmatrix} t_{1x}^{(M)} \\ t_{1y}^{(M)} \\ t_{1z}^{(M)} \end{bmatrix}$	...	$\mathbf{A}_N^{(M)} = \begin{bmatrix} a_{Nx}^{(M)} \\ a_{Ny}^{(M)} \\ a_{Nz}^{(M)} \end{bmatrix}, \mathbf{t}_N^{(M)} = \begin{bmatrix} t_{Nx}^{(M)} \\ t_{Ny}^{(M)} \\ t_{Nz}^{(M)} \end{bmatrix}$

Jakákoliv vlna šířící se od zdroje do měřicího bodu $\mathbf{A}_i^{(j)}$ potřebuje následující čas:

$$t_i^{(j)} - t_R^{(j)} + \Delta t_R = T_i^{(j)} + \Delta t_R,$$

kde $t_R^{(j)}, t_i^{(j)}$ jsou ToA do reference a měřicího bodu. Konstanta Δt_R vyjadřuje čas, který vlna potřebuje na překonání trasy mezi zdrojem a referencí a $T_i^{(j)}$ je relativní čas $T_i^{(j)} = t_i^{(j)} - t_R^{(j)}$. Výše uvedený čas souvisí s polohami relevantních bodů následovně:

$$\|\mathbf{A}_i^{(j)} - \mathbf{X}\| - v_i^{(j)} \left[\text{median}(T_{ix}^{(j)}, T_{iy}^{(j)}, T_{iz}^{(j)}) + \Delta t_R \right],$$

kde $\mathbf{X} = [x_s \ y_s \ z_s]^T$ je poloha zdroje a $v_i^{(j)}$ je zdánlivá rychlost vlny v měřicím bodě $\mathbf{A}_i^{(j)}$, viz obr.1a. Tento vztah může být převeden do implicitní formy

$$r_i^{(j)} = \|\mathbf{A}_i^{(j)} - \mathbf{X}\| - v_i^{(j)} \left[\text{median}(T_{ix}^{(j)}, T_{iy}^{(j)}, T_{iz}^{(j)}) + \Delta t_R \right].$$

Odmocnina se součtu druhých mocnin reziduí $r_i^{(j)}$ pak tvoří cílovou funkci

$$f = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (r_i^{(j)})^2},$$

která má nezávislé optimalizační proměnné $x_s, y_s, z_s, v_1^{\{1\}}, \dots, v_N^{\{M\}}, \Delta t_R$. Optimalizace cílové funkce f je pak provedena s využitím vazebních podmínek

$$\begin{aligned} X &\leq g(A_1^{\{1\}}, \dots, A_N^{\{M\}}), \\ v_{i,\min}^{\{j\}} &\leq v_i^{\{j\}} \leq v_{i,\max}^{\{j\}}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M, \\ \Delta t_R &\geq \max(t_R^{\{1\}} - t_1^{\{1\}}, \dots, t_R^{\{M\}} - t_N^{\{M\}}), \end{aligned}$$

které zajišťují fyzikálně přípustné řešení optimalizačního problému. První podmínka omezuje polohu zdroje, např. na prostor vymezený měřicími body, druhá podmínka stanovuje minimální a maximální přípustné zdánlivé vlnové rychlosti a třetí podmínku je nutné přidat, aby hodnoty $v_{i,\max}^{\{j\}}$ odpovídaly vlnové rychlosti pro daný materiál.

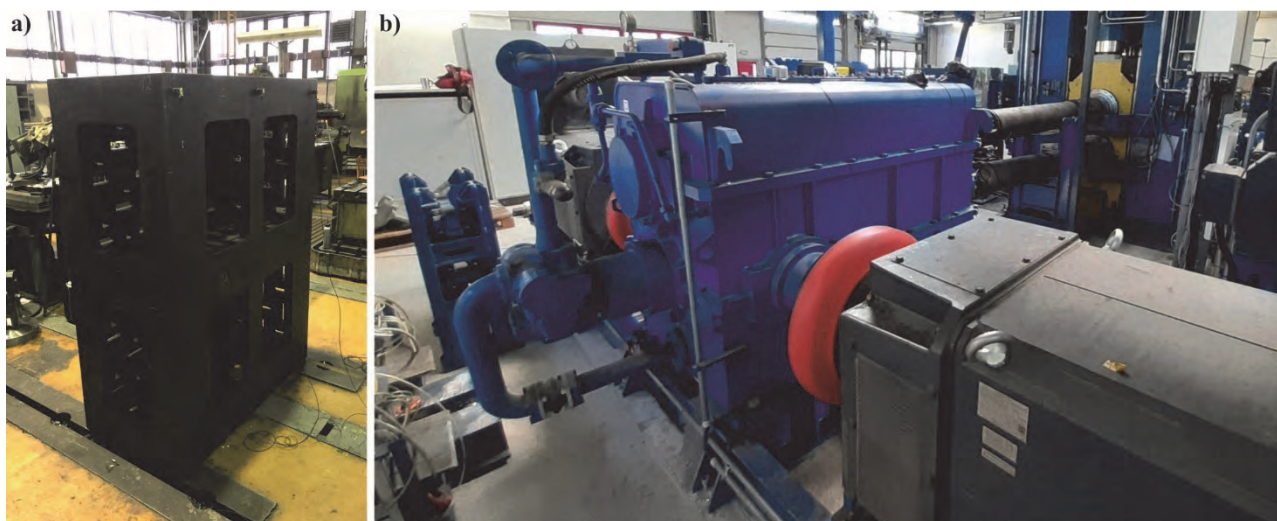
Optimalizační úloha s vazebními podmínkami má více optimalizačních proměnných než reziduí $r_i^{\{j\}}$, a proto je nutné jí dále omezit rovnostmi mezi vybranými vlnovými rychlostmi. Obvykle se předpokládá, že zdánlivé vlnové rychlosti v měřicích bodech, které se nacházejí blízko u sebe, se rovnají. Pokud by tyto rovnosti nebyly uvažovány, našla by optimalizační úloha hodnoty $v_i^{\{j\}}$ tak, aby vyhovovaly počáteční odhadům X a Δt_R .

3. Validace metody

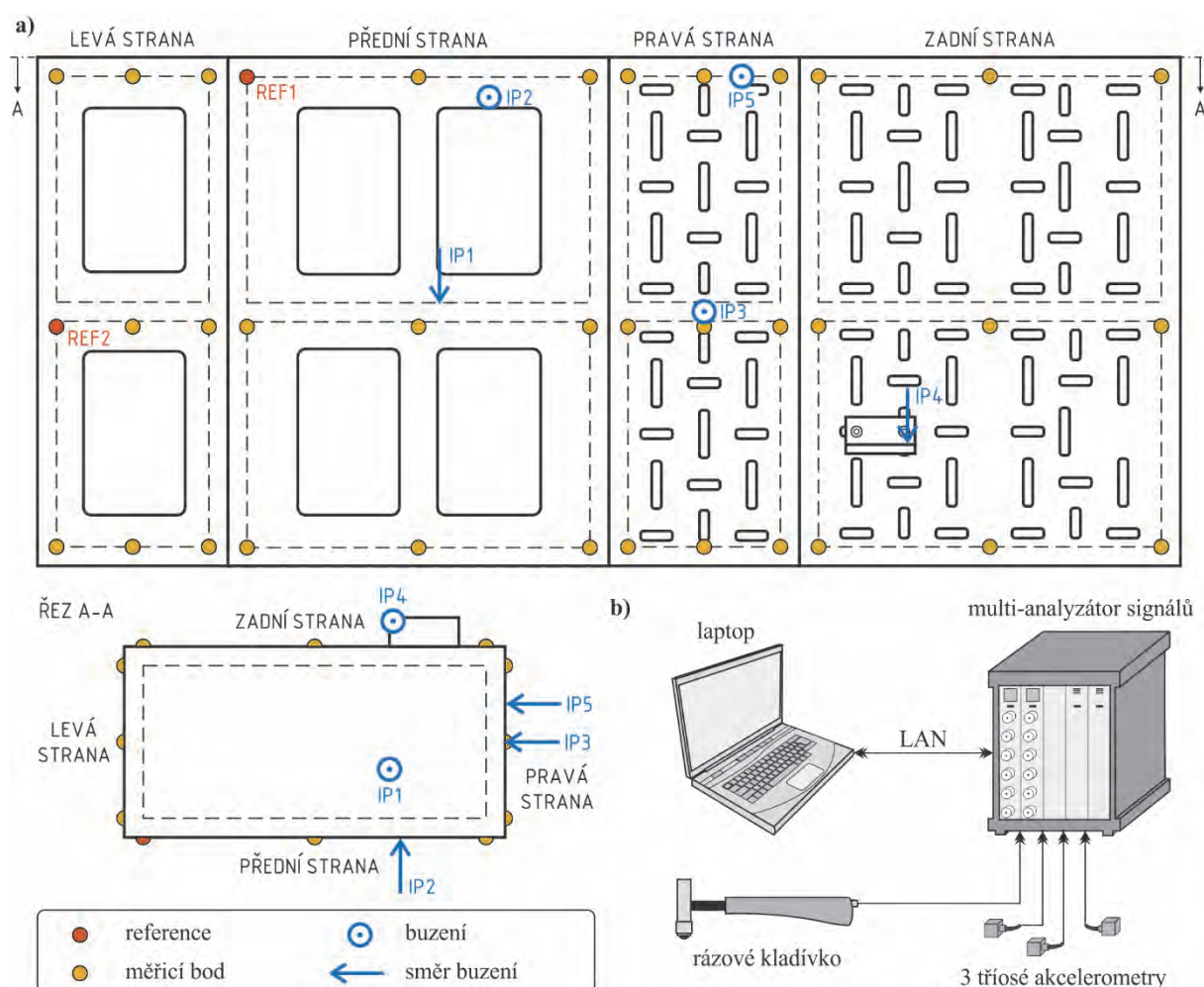
Tato kapitola prezentuje dva případy nasazení uvedené metody: validační laboratorní zkoušku na přípravku (obr.4a) a in-situ zkoušku vícestupňové převodovky (obr.4b).

3.1. Příklad 1 - Validační laboratorní zkouška

Přípravek z obr.4a byl postupně buzen v pěti různých místech ukázaných na obr.5a rázovým kladívkem Endevco 2305-5 s hliníkovým hrotem Dytran 6250A. Odezva na buzení byla měřena v 36 měřicích bodech tříosými akcelerometry Brüel & Kjaer 4529. Použitý multianalizátor se dvěma moduly Brüel & Kjaer 3050-A-060 má pouze 12 kanálů, proto bylo měření odezvy provedeno v 18 sadách pro každé místo buzení, přičemž referenční akcelerometr byl po celou dobu v jednom referenčním bodě a dva zbylé akcelerometry byly postupně přesouvány. Navíc bylo testováno, jak budou výsledky lokalizace ovlivněny volbou referenčního bodu, a tak byla celá zkouška zopakována s jiným referenčním bodem. Celkem tedy bylo zaznamenáno 180 sad měření se vzorkovací frekvencí 151 kHz.



Obr.4 a) Přípravek použitý pro laboratorní zkoušku a b) převodovka zkoušená in-situ



Obr.5 a) Schéma měřicích bodů a míst a směrů buzení a b) použitý měřicí řetězec

Na zaznamenaná data poté byla aplikována metoda popsaná v kapitole 2, přičemž pro odhad ToA sloužily řezy škálogramem na třech různých škálách odpovídajících

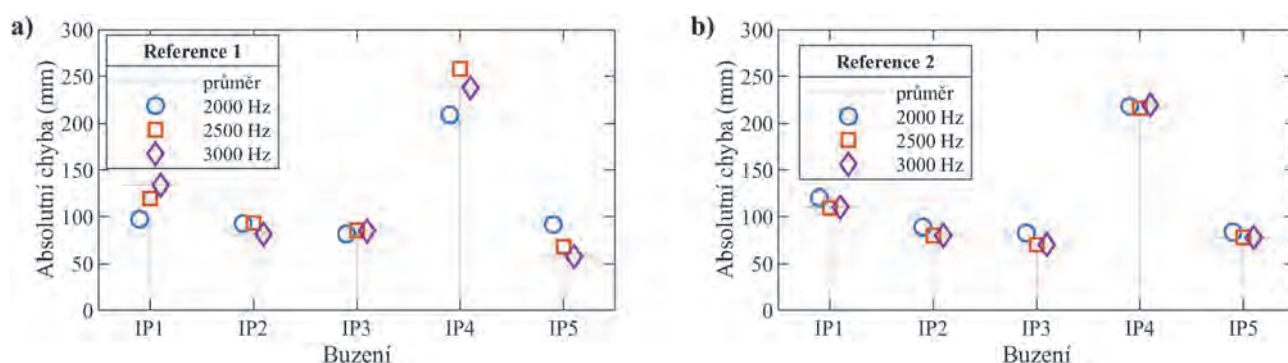
frekvencím 2000, 2500 a 3000 Hz. Počáteční vlnová rychlost byla zvolena tak, aby odpovídala rychlosti podélných vln v oceli (5800 m.s^{-1}). Počáteční odhad polohy rázového buzení byl proveden s konstantními rychlostmi a sloužil jako počáteční podmínka pro následný optimalizační proces. Ten konvergoval obvykle po $50 \div 70$ iteracích k optimálnímu řešení. Souhrn výsledků je zobrazen na obr.6.

Typická chyba v určení polohy buzení je $40 \div 120 \text{ mm}$ pokud zdroj leží uvnitř prostoru vymezeného měřicími body. Lze také tvrdit, že reference 2, která leží blíže středu přípravku, poskytuje asi o 10% přesnější výsledky. Rozdílná situace je u buzení IP4, které bylo realizováno mimo prostor vymezený měřicími body. Zde je chyba výrazně vyšší a souvisí se vzdáleností bodu buzení od konvexního obalu vymezeného měřicími body.

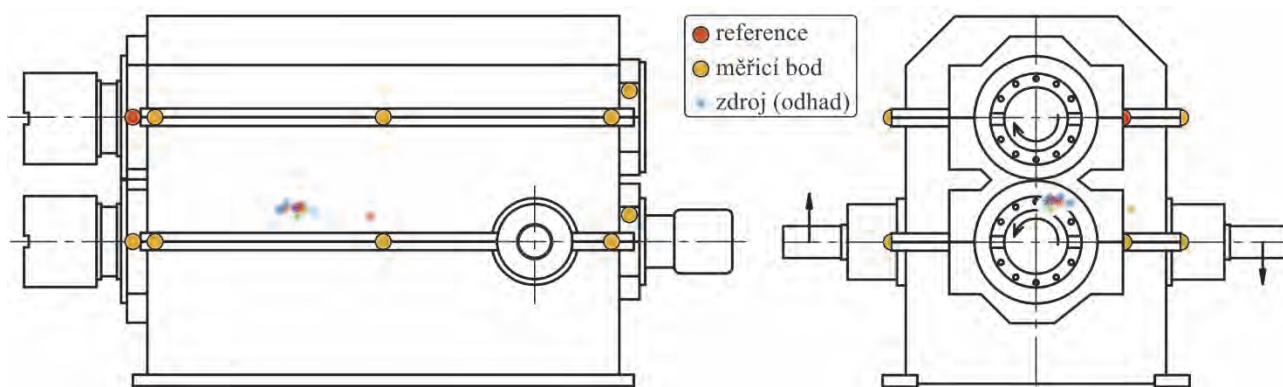
3.2. Příklad 2 - In-situ zkouška

Na převodovce ukázané na obr.4b se vyskytly problémy včetně zvýšené mohutnosti vibrací a slyšitelných úderů. Předběžná analýza odhalila, že frekvence byla totožná jako frekvence výstupních hřídelů a amplituda úderů závisela na výstupním momentu. Každý úder se sestával z dvojice rázů, ke kterým došlo velmi rychle po sobě. Podobné nálezy obvykle indikují deformaci zubu ozubeného kola nebo poškození povrchu zubu. Vizuální zkouška nicméně žádnou významnou indikaci, např. chybějící zub, nepotvrdila. Vzhledem k tomu, že převodovka byla vícešupňová a byla osazena dvojicí vstupních i výstupních hřídelů, nebylo možné identifikovat vadné soukolí, protože na dané poruchové frekvenci jich bylo provozováno více. Z toho důvodu byla pro lokalizaci soukolí použita metoda představená v kapitole 2.

Měření bylo provedeno zařízením popsaným v kapitole 3.1. V tomto případě ale byly použity čtyři tříosé snímače, protože rázové kladívko nebylo potřeba. Odezva byla měřena celkem v 16 bodech ukázaných na obr.7. Na celou zkoušku tedy bylo potřeba zaznamenat 5 sad měření se vzorkovací frekvencí 151 kHz. Výsledky optimalizace jsou ukázány na obr.7. Výsledky závisí na frekvenci pro výpočet ToA a na počáteční podmínce. Vyjma dvou se ale všechny odhadované body nacházejí poblíž jednoho z podezřelých soukolí.



Obr.6 Absolutní chyby lokalizace buzení znázorněného na obr.5a. Frekvence indikuje frekvenci řezu škálogramem, na kterém je počítán ToA. Průměr se rovná absolutní chybě od bodu buzení se zprůměrovanými souřadnicemi, nikoliv průměrné chybě.



Obr.7 Odhadované body buzení v převodovce z obr.4b. Výsledky optimalizačního procesu se nachází v blízkosti soukolí a liší se v závislosti na frekvenci pro výpočet ToA a na počáteční podmínce. Výsledky nebyly v době psaní článku verifikovány NDT zkouškou.

4. Diskuze a závěry

V příspěvku byla představena metoda pro lokalizaci rázového buzení v prostoru. Tato metoda neklade na prostředí žádné zvláštní požadavky a je tedy použitelné pro anizotropní prostředí nebo pro zařízení a technologie s neznámou geometrií. Metoda předpokládá, že rázové buzení vyvolá vlny, které se šíří prostředím a jejichž průchod lze zaznamenat pomocí snímačů vibrací nebo akustické emise umístěných v pevných měřicích bodech. Celkový počet měřicích bodů může být vyšší než počet dostupných snímačů za předpokladu, že jeden ze snímačů je referenční, tzn. umístěný v pevném referenčním bodě.

Představená metoda je dvoukroková - nejprve se určí časy příchodu (ToA) vln do jednotlivých měřicích bodů. ToA se určuje inovativní metodou kombinující kontinuální vlnkovou transformaci (CWT) [11] a optimální dělení intervalu [12]. CWT je provedena s využitím Morletovy vlnky [10,11], jejíž tvar lze řídit dvěma parametry - centrální frekvencí ω_c a frekvenčním rozptylem σ_ω . Citlivostní analýza ukazuje, že nejlepších výsledků lze dosáhnout pro $\sigma_\omega \in (0,5, 2)$ a $f \in (1500, 3000)$ Hz. Frekvenční rozsah záleží na použitých snímačích a jejich upevnění a ve speciálních aplikacích, např. při měření akustické emise, bude výrazně vyšší. Po provedení CWT se analyzuje pouze několik řezů škálogramem o konstantních frekvencích. Tyto řezy jsou podrobeny optimálnímu dělení intervalu [12], které nalezne ToA vlny s přesností na několik vzorkovacích period.

Ve druhém kroku se hledá nejpravděpodobnější pozice buzení pomocí optimalizační úlohy s vazebními podmínkami. Optimalizační úloha bere v úvahu možnou anizotropii prostředí tak, že umožňuje v jednotlivých měřicích bodech pracovat s neznámými vlnovými rychlostmi. Provedené laboratorní zkoušky ukazují, že metoda je schopná lokalizovat místo buzení s prostorovou chybou $40 \div 120$ mm, což pro rychlost podélné vlny v oceli (5800 m.s^{-1}) odpovídá vzdálenosti, kterou vlna urazí za $1 \div 3$ vzorkovací periody. Z tohoto pohledu je chyba akceptovatelná a zčásti způsobená nejistotou měření plynoucí z faktu, že zkouška je provedena po částech, tzn. že měření ve všech měřicích bodech neprobíhají souběžně. Prostorovou chybu lze snížit při použití vysokých vzorkovacích frekvencí a také ovlivnit vhodnou volbou reference - přesnějších výsledků bylo dosaženo pro referenci umístěnou blízko geometrického středu zkoušeného objektu.

Metoda má ale velmi limitované využití, pokud se místo buzení nachází mimo konvexní obal daný polohou měřicích bodů. Navržené vazební podmínky totiž nedovolují, aby se místo buzení nacházelo mimo konvexní obal a metoda tak identifikuje jako místo buzení bod na konvexním obalu, který je ke zdroji nejbližší.

Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci institucionální podpory na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace poskytnuté Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky.

Použité zkratky

CWTkontinuální vlnková transformace

STFTkrátkodobá Fourierova transformace

ToA.....čas příchodu

Literatura:

- [1] Tobias, A., Acoustic-emission source location in two dimensions by an array of three sensors. *Non-Destructive Testing*, 1976, 9(1) s. 9-12.
- [2] Mclasky, G. C., S. D. GLASER A C. U. GROSSE. Beamforming array techniques for acoustic emission monitoring of large concrete structures. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(12), s. 2384-2394.
- [3] Ciampa, F., M. Meo A E. Barbieri. Impact localization in composite structures of arbitrary cross section. *Structural Health Monitoring*, 2012 11(6), s. 643-655.
- [4] De SIMONE, M. E., F. CIAMPA, S. BOCCARDI A M. MEO. Impact source localization in aerospace composite structures. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(12) s. 125026.
- [5] Tong, C. A B. L. N. Kennett. Automatic seismic event recognition and later phase identification for broadband seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(6), s. 1896-1909.
- [6] Ciampa, F. A M. Meo. Impact localization on a composite tail rotor blade using an inverse filtering approach. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, 25(15), s. 1950-1958.
- [7] Cobos, M., F. Antonacci, L. Comanducci A A. Sarti. Frequency-sliding generalized cross-correlation: A sub-band time delay estimation approach. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2020, 28, s. 1270-1281.
- [8] Xu, J. P-wave onset detection based on the spectrograms of the AE signals. *Advanced Materials Research*, 2011, 250-253, s. 3807-3810.
- [9] Park, C.-S., S.-H. Lee A D.-J. Yoon. Enhancing impact localization from fluid-pipe coupled vibration under noisy environment. *Applied Sciences*, 2021, 11(9), s. 4197.
- [10] Houdek, V., L. Smolík A Z. Kubín. Impact point localization in three-dimensional structures using wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 179, s. 109365.
- [11] Carassale, L. A M. Marrè-Brunenghi. Wavelet-based identification of rotor blades in passage-through-resonance tests. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 98, s. 124-138 .
- [12] Killick, R., P. Fearnhead A I. A. Eckley. Optimal detection of changepoints with a linear computational cost. *Journal of the American Statistical Association*, 2012, 107(500), s. 1590-1598.

LIMITY KVANTITATIVNÍ TERMOGRAFIE ZÁVISLÉ NA VLASTNOSTECH POUŽITÝCH KAMER

LIMITS OF QUANTITATIVE THERMOGRAPHY DEPENDING ON THE PROPERTIES OF THE CAMERAS USED

Václav STRAKA, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ¹

Jiří SVOBODA, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ²

David KUBOŠ, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ³

Pavel PETRÁŇ, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ⁴

Pavel ZÍTEK, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ⁵

Mikoláš CHOURA, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ⁶

Anotace:

Infračervené termografické kamery (termokamery) jsou nejen v oblastech údržby, stavebnictví nebo technologií průmyslu, ale také ve zdravotnictví, biomedicině, výzkumu a vývoji koncipovány tak, aby splňovaly požadavky a nároky na přesnost měření, tedy i kvalitu termogramu. Pokud je cílem poskytovat skutečně validní výsledky, je nutno vzít v potaz krom standardních parametrů měření i konstrukční vlastnosti kamer jako takové, neboť významně přispívají, společně s úrovní obsluhy, ke kvalitě a vypovídající schopnosti termogramu a následného vyhodnocení.

Annotation:

Infrared thermographic cameras (thermal cameras) are designed not only in the areas of maintenance, construction or industrial technology, but also in healthcare, biomedicine, research and development to meet the requests and requirements for measurement accuracy, i.e. thermogram quality. If the aim is to provide truly valid results, the design characteristics of the cameras as such must be taken into account in addition to the standard measurement parameters, as they contribute significantly, together with the level of operator, to the quality and informative capabilities of the thermogram and subsequent evaluation.

¹ Ing. Václav Straka

"TMV SS" spol. s r.o.

Studánková 395, 149 00 Praha 4 - Újezd

tel.: +420 272 942 720, fax: +420 272 942 722, e-mail: vaclav.straka@tmvss.cz, <https://www.tmvss.cz/>

² Ing. Jiří Svoboda

e-mail: jiri.svoboda@tmvss.cz

³ Ing. David Kuboš

e-mail: david.kubos@tmvss.cz

⁴ Pavel Petráň

e-mail: pavel.petrان@tmvss.cz

⁵ Pavel Zítek

e-mail: pavel.zitek@tmvss.cz

⁶ Bc. Mikoláš Choura

e-mail: mikolas.choura@tmvss.cz

1. Úvod

Termografické kamery jsou dnes již běžným, uznávaným a velice potřebným nástrojem pro určení stavu měřených objektů a vytvoření postupů pro správné řízení údržby a predikce potenciálních závad. Pro různé aplikace je nutné vždy uvažovat minimální požadavky na parametry kamery, tak, aby byl účel vlastního měření naplněn a výsledek měl požadovanou vypovídající hodnotu. V této oblasti špičkoví výrobci nabízejí stále dokonalejší výrobky a některé jejich parametry již dávno překonaly hodnoty, které byly v minulosti považovány za hraniční.

Termokamery jsou obvykle charakterizovány technickou specifikací s parametry, které uživatel srovnává mezi jednotlivými modely, či porovnává s požadavky na systém kladenými jeho aplikací. V některých případech je však obtížnější, bez hlubší znalosti problematiky, jednotlivým parametrům porozumět, případně odvodit, zdali uváděný parametr je relevantní, či případně odpovídající jeho aplikaci.

Pro aplikace v oblasti prediktivní údržby a základního výzkumu se masově používají kamery obsahující mikrobolometr (detektor), který je výrazně levnější, než fotonové (kvantové) detektory. Právě nástup mikrobolometrů umožnil skutečně masové rozšíření termografických kamer a výrazný pokles jejich cen. Pro velkou část aplikací je mikrobolometrický detektor vyhovující, nicméně v praxi se velmi často setkáme s aplikacemi, u nichž je nutno brát v potaz omezení (vlastnosti) termografických kamer využívajících právě tento typ detektorů. Tento materiál není koncipován jako kritika kamer využívajících mikrobolometry, nýbrž je určen jako upozornění na některé z limitů vyplývajících právě z jejich fyzikálních vlastností.

V potaz je nutno brát zejména následující vlastnosti:

- rychlost snímkování (vzorkovací frekvence detektoru / kamery)
- způsob vyčítání detektoru
- aplikace v případě, kdy se objekt vůči pozorovateli pohybuje

Tyto parametry výrazně ovlivňují kvalitu výsledku v oblasti kvantitativní termografie. Pro správné posouzení možného ovlivnění výsledku je nutno vzít v potaz omezení dané fyzikálními principy, které mikrobolometry využívají. Současně bude uvedeno porovnání se záznamy pořízenými termografickými kamerami s fotonovými detektory.

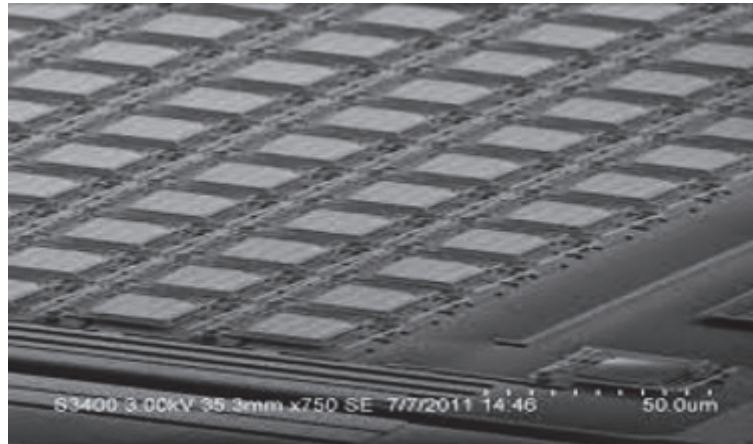
2. Rychlost snímkování

Jedním z parametrů uváděných u kamer bývá i záznamová / zobrazovací rychlost kamery. Bývá určující nejenom pro plynulost zobrazení dějů ale sekundárně, jak následně vysvětlíme, i pro přesnost měření.

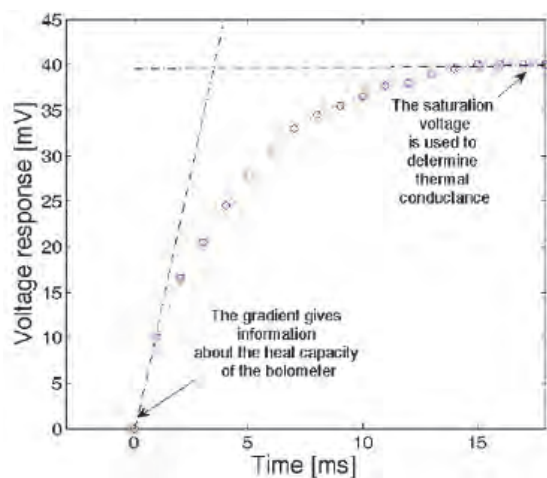
Dnešní systémy s bolometrickými detektory mají obvykle udávanou zobrazovací frekvenci v rozmezí $25 \div 60$ Hz pro plné rozlišení detektoru a v závislosti právě na fyzickém rozlišení detektoru (počtu pixelů - příklad viz obr.1). Je možné se také setkat se systémy pracujícími s obrazovou frekvencí nižší, například 7,5 nebo 9 Hz, avšak ty je možno považovat spíše za spadající do skupiny informativních měřidel nevhodných pro sledování dynamických jevů.

Mikrobolometr je ve své podstatě analogový tepelný detektor, jehož minimální čas pro spolehlivou kvantifikaci je minimálně 5 ms (tzn. 200 Hz). Jeho tepelná časová konstanta (čas potřebný na změnu vlastní teploty o 63,2% specifického teplotního rozpětí) je ≥ 5 ms (teoretická hodnota nezohledňující ochlazení detektoru). Ve skutečnosti jsou však minimální časy odlišné a pohybují se v rozhraní $7 \div 10$ ms. Pokud tedy chceme

kvantifikovat spolehlivě rychlé děje, můžeme za maximální rychlost považovat $100 \div 120$ Hz, rychlosti vyšší pak pouze za informaci, že došlo k jevu bez jeho spolehlivé kvantifikace. Ukázka rychlosti odezvy (saturace) detektoru v reakci na zářivý tok emitovaný sledovaným objektem je na obrázku 2. Příklad teplotního rozložení na jednom pixelu detektoru je na obrázku 3.



Obr.1 Struktura mikrobolometrického detektoru [6]



Obr.2 Odezva mikrobolometrického detektoru [2]



Obr.3 Tepelné rozložení mikrobolometrického detektoru [2]

Stejně tak je třeba vzít v potaz, že mikrobolometr v daném čase / frekvenci integruje hodnotu signálu a není možno aktivně řídit excitační čas, který si můžeme zjednodušeně představit jako dobu závěrky / expozice u fotoaparátů. Pokud tedy budeme mít dynamický děj, ať již z hlediska změny teploty, případně změny pozice či tvaru, je třeba brát v úvahu tuto charakteristiku detektoru, nebo pro danou aplikaci použít jiný než bolometrický detektor.

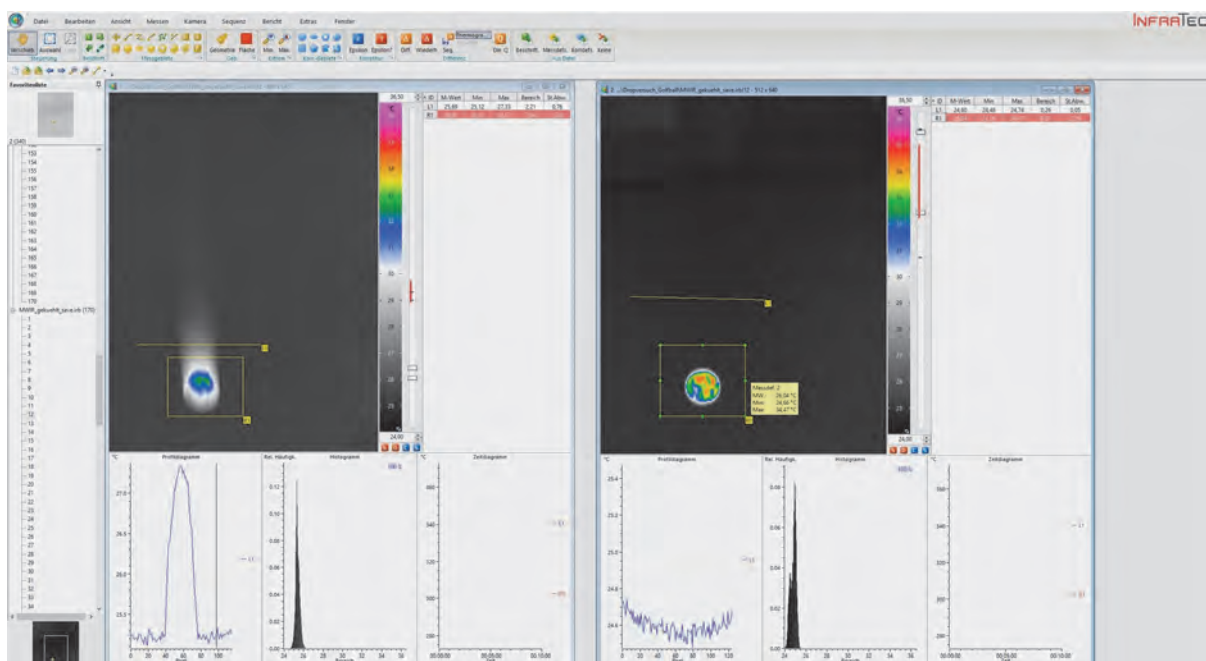
Současně je zapotřebí upozornit na rozdíl, mezi zobrazovací frekvencí a rychlostí ukládání. Pokud nepožijeme statické termogramy, ale rozhodneme se ukládat sekvenci termogramů, případně radiometrické video, tak frekvence ukládání může být omezena (v případě ukládání do vnitřní paměti kamery), případně musíme mít vhodné připojení

a možnost ukládat. Pro představu - jeden termogram o velikosti 640x480 pixelů může mít velikost 300 ÷ 500 kB.

Pokud je požadována vyšší zobrazovací / záznamová frekvence, je tento požadavek obvykle řešen zmenšením zobrazované plochy detektoru, tzv. windowing. Pak se lze setkat i se specifikacemi uvádějícími rychlosti 120, 150 nebo také 200 Hz. U hodnocení těchto rychlostí je potřeba vyjít z fyzikálních vlastností mikrobolometru.

Oproti tomu, pokud pro snímání dynamického jevu (ať již z hlediska teplotního nebo kinematického) použijeme termografickou kameru využívající kvantový detektor (někdy označovaný jako „chlazený“), můžeme pracovat s integračními časy detektoru obvykle v rozmezí jednotek až stovek mikrosekund (μ s), tedy s časy o jeden až tři řády nižšími, než v případě termografické kamery s mikrobolometrickým detektorem. Další vlastností kamer s fotonovými detektory je fakt, že je možno řídit vzorkovací frekvenci kamery nezávisle na integračním čase detektoru, či vzorkovací frekvenci synchronizovat se snímaným jevem (rotační pohyb, excitace při IR NDT).

Jako příklad můžeme uvést následující záznam porovnávající identický jev při snímání pohybujícího se kruhového objektu mikrobolometrickou kamerou (vlevo) a kamerou s fotonovým detektorem (vpravo).



Obr.4 Porovnání záznamu dynamického jevu mezi kamerou s mikrobolometrickým detektorem a kvantovým detektorem [2]

V levé části můžeme vidět rozmazaný záznam s viditelnou tepelnou stopou (připomínajícím ocas komety) způsobenou dlouhou tepelnou konstantou mikrobolometru. Záznam provedený kvantovým detektorem (vpravo) nevykazuje ani zdánlivé signály ani deformaci objektu. Vizuální stránka není jediným rozdílem. Z hlediska kvantifikace termogramů je možno vysledovat i rozdílné zdánlivé teploty (teplotní stupnice je v obou případech nastavena identicky) lišící se o cca 10% pro nejvyšší zdánlivé teploty sledovaného objektu. Tento rozdíl je způsoben právě rozdílnou technologií, obou detektorů a faktem, že se objekt pohybuje. Statické části scény jsou kvantifikovány identicky.

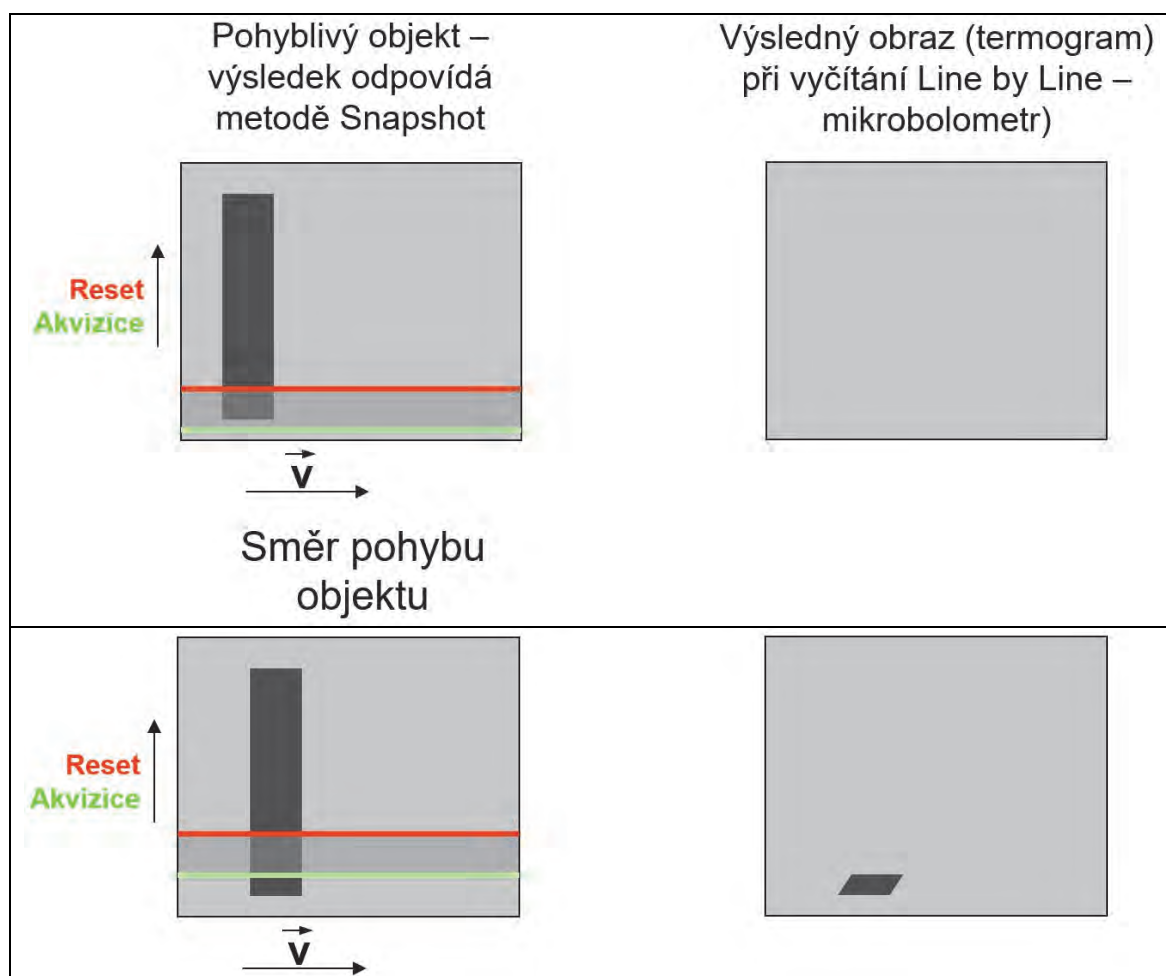
Je tedy možno konstatovat, že využitá technologie neovlivňuje pouze vzhled jako takový, ale i kvantifikaci hodnot v závislosti na velikosti objektu, teplotně homogenní plochy a rychlosti (případně směru) pohybu. Způsob kvantifikace mezních rychlostí pohybu objektu vůči použité technologii bude představen v kapitole 5.

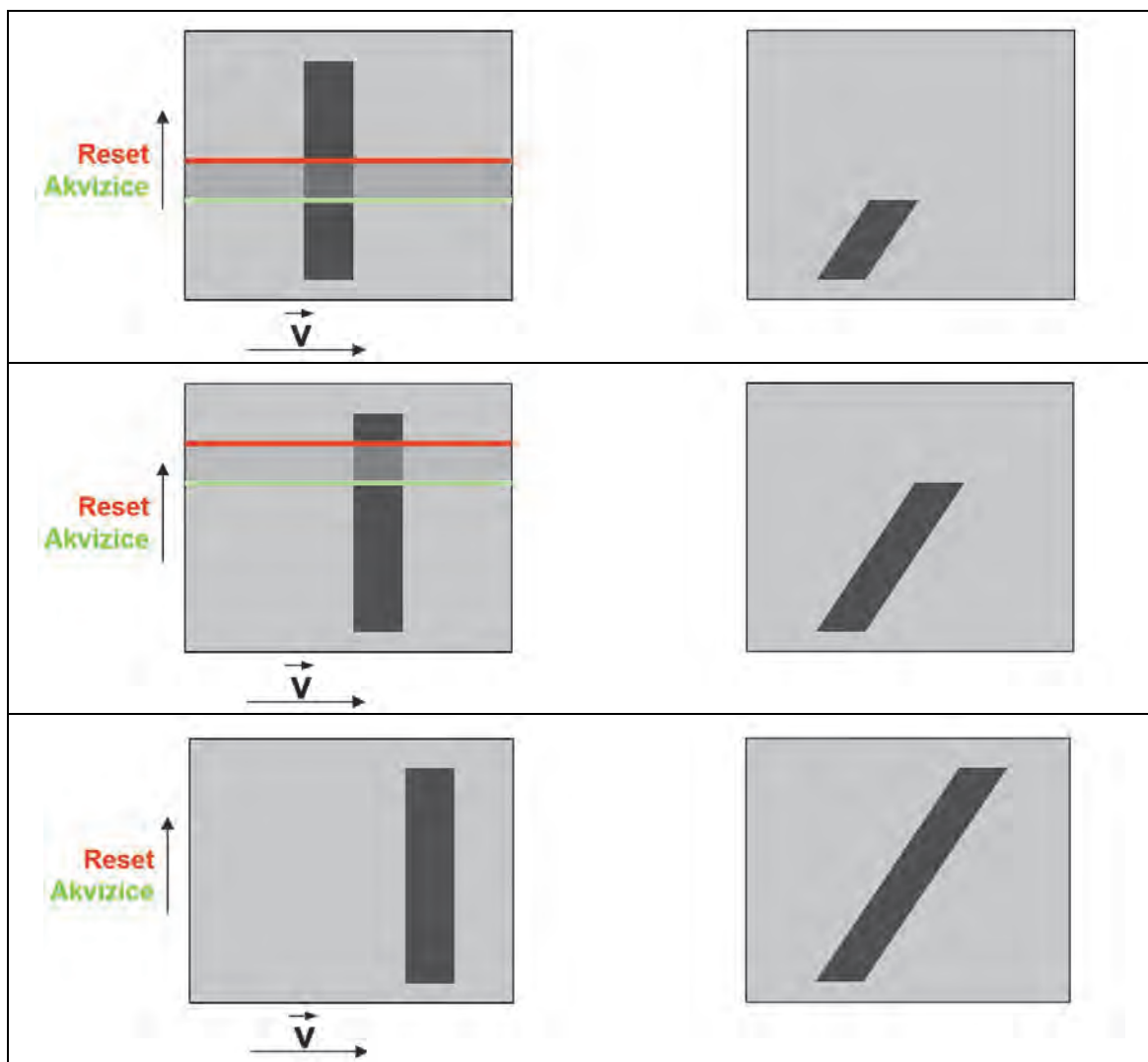
3. Způsob vyčítání detektoru

U termografických kamer s maticovými detektory rozlišujeme 2 základní způsoby vyčítání detektoru:

- Line by line - vyčítání detektoru po jednotlivých řádcích či skupinách řádků. V některých případech se může jednat i o sloupce či skupin sloupců,
- Snapshot - vyčítání detektoru jako celku v jednotném systémovém čase.

Ačkoliv se může na první pohled zdát, že se jedná o bezvýznamný technologický aspekt, může mít tato odlišnost mít zásadní vliv na kvalitu vypovídající hodnoty termogramu. Na následujícím grafickém zobrazení můžeme vidět vznik zdánlivé deformace snímaného objektu při jeho posunu. Lze si toto představit nejen jako kinematický jev, tak tepelný jev se značnou dynamikou.





Obr.5 Porovnání způsobu vyčítání detektoru line-by-line vs.snapshot [2]

Na předchozí sadě obrázků číslo 5 můžeme jednoznačně vidět deformování tvaru či termogramu při porovnání s realitou (vyčítání snapshot s vyčítáním line-by-line). Jako shrnutí můžeme uvést, že v závislosti na integračním čase / tepelné konstantě detektoru a způsobu vyčítání detektoru dochází ke geometrické deformaci pohybujícího se snímaného objektu, zejména při použití systémů s mikrobolometrickým detektorem. Tuto deformaci je současně možno chápat i jako nejednotnost časové základny termogramu a z toho vyplývající omezení při dalším zpracování dat, například korektní použití Fourierovy transformace.

Z výše uvedeného obrázku je možno pozorovat zdánlivou deformaci pozorovaného objektu způsobenou právě vyčítáním „line-by-line“ u mikrobolometrických detektorů. V této souvislosti je zapotřebí zmínit, proč mikrobolometrické detektory nevyužívají vyčítání „snapshot“ - tedy celého zorného pole v jednotném systémovém čase. U stávajících mikrobolometrů tento způsob vyčítání není možný, neboť pokud by byl použit (tedy celá plocha detektoru by byla zatížena v jeden systémový čas, tak by došlo k přetížení detektoru s jeho možným nevratným poškození či extrémně zrychlenou degradací.

4. Praktické zdokumentování vlivu způsobu vyčítání detektoru a jeho rychlosti

V předchozích kapitolách byly zmíněny vlivy rychlosti detektoru (integrační čas vs. tepelná konstanta detektoru). Abychom nepožívali pouze teoretické modely, můžeme si prakticky uvedené jevy a jejich projevy demonstrovat na následující ukázce, kterou je kvantifikace teplot a dvojkolí vagónu. Pro snímání byly použity kamery s následujícími charakteristikami:

- LWIR, 1024x768 px, NETD 30 mK, $f = 30$ Hz, mikrobolometrický detektor, časová konstanta detektoru 10 ms,
- LWIR, 1280x1024 px, NETD 30 mK, $f = 200$ Hz, kvantový detektor, integrační čas detektoru nastavený 90 μ s,
- úmyslně byly vybrány termografické kamery pracující v obdobném vlnovém rozsahu (LWIR), s podobným rozlišením detektoru, blízkým IFOV a shodným NETD (tepelná citlivost). Základní rozdíl mezi oběma systémy je možno spatřovat nikoliv ve snímací frekvenci, ale právě v integračním čase obou kamer (respektive časové konstantě mikrobolometrického detektoru a integračního času kvantového detektoru) který je přibližně 100-násobně kratší, tedy o dva řády.

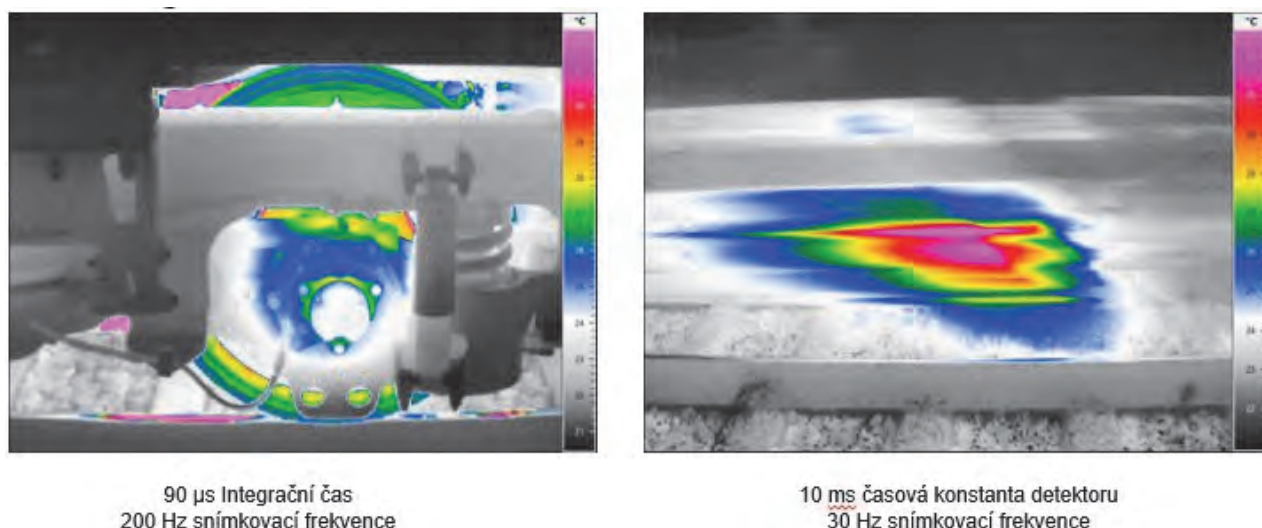
Jako pokusný objekt bylo vybrána pohybující se vlaková souprava se zaměřením na teplotu dvojkolí a brzdných systémů za provozu. Lepší představu si můžeme udělat na následujícím obrázku 6.



Obr.6 Měřený objekt použitý pro ukázkou [2]

Měření bylo provedeno za provozu, rychlost soupravy v době měření byla odhadnuta na cca 40 km.h⁻¹. Vzdálenost mezi termografickými kamerami a snímanou oblastí byla cca 1,5 m Tato vzdálenost byla zvolena s ohledem na velikost jednoho pixelu (detailu) - IFOV.

Na následujících termogramech (obrázek 7) je možno vidět výrazně odlišnou charakteristiku jevu a kvalitu záznamu pro vyhodnocení.



Obr.7 Porovnání termogramů pohyblivého objektu [2]

Na levém záznamu pořízeném termokamerou s kvantovým detektorem je možno vidět zcela konkrétní strukturu snímané scény a je možno předpokládat spolehlivou kvantifikaci teplotních polí. Záznam vpravo pořízený termografickou kamerou s mikrobolometrickým detektorem - je možno detekovat veškeré jevy společné všem mikrobolometrickým systémům, tzn. výrazně zhoršené podání geometrie pohybujících se částí a současně rozdělení do vodorovných pásů způsobených vyčítáním „line-by-line“. Obecně lze konstatovat, že zatímco záznam z kamery vybavené kvantovým detektorem je spolehlivě kvantifikovatelný, tak záznam z bolometrické kamery je možno chápat pouze jako indikaci nějakého teplotního jevu bez možnosti spolehlivé kvantifikace a určení zdroje oteplení.

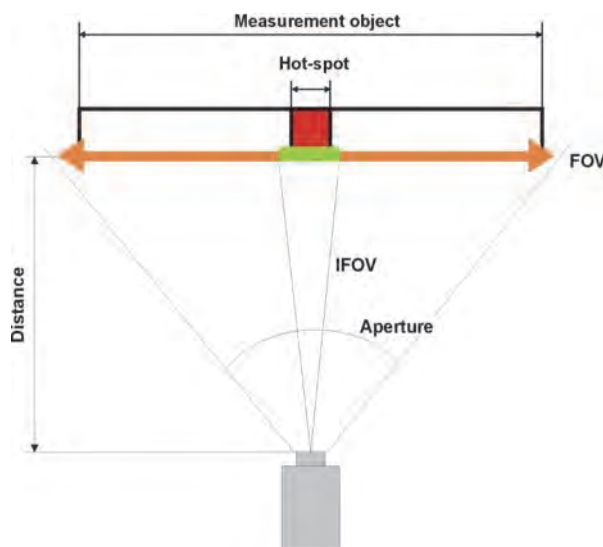
Tento příklad není míněn jako poukazování na nedostatečnou kvalitu mikrobolometrických detektorů. Jedná se o ukázkou ilustrující jejich vlastnosti a limity aplikací, na něž je možno je použít či jaké jevy je třeba předpokládat.

5. Určení základních parametrů při snímání pohybujícího se objektu

V praxi je možno se často setkat s měřeními prováděnými na pohybujících se objektech (případně pohybem technika provádějícího měření vůči objektu zájmu), při nichž je výsledná kvalita termogramu ovlivněna právě oním pohybem. Současně je ovlivněna i schopnost kvantifikovat teplotní pole v rámci termogramu.

Obecně u statického vztahu provozovatel - objekt (tzn. vzájemná poloha se nemění) platí základní teze o optických vlastnostech kamery. Na základě použitého objektivu a geometrického rozlišení kamery (a dalších parametrů optické soustavy) je obvykle udáván parametr IFOV [mRad] udávající individuální zorné pole jednoho pixelu. Tento údaj je možno považovat za validní z hlediska kvalitativní, nikoliv však kvantitativní termografie. Pokud chceme spolehlivě kvantifikovat, je nutnou podmínkou, aby teplotně homogenní plocha byla dostatečně pokryta pixely detektoru. Tento parametr bývá nazýván MFOV (měřicí zorný úhel) a obvykle je možno je vyčíslit jako $3 \div 5$ násobek IFOV, tedy že výše zmíněná teplotně homogenní oblast musí být překryta maticí o rozměru $3 \times 3 \div 5 \times 5$ pixelů. MFOV je závislé nejen na kvalitě detektoru, ale i kvalitě použité optiky, přičemž je

experimentálně stanovitelná v kvalitních laboratořích. Pokud podmínka MFOV není naplněna, budou zdánlivé teploty kvantifikovány s odchylkou, která může výrazně překročit technické specifikace použité termokamery. MFOV se určuje pomocí funkce otvoru (HFR). Toto vše platí, jak bylo výše uvedeno, pro statické uspořádání scény bez vzájemného pohybu.



Obr.7 Schématické uspořádání [2]

Nicméně v reálných aplikacích k tomuto pohybu dochází a je dobré mít představu, jak tento pohyb ovlivní kvantifikaci zdánlivých teplot v termogramu. Pro zjednodušení si představme, že se objekt pohybuje rovnoběžně s pozorovatelem a změna absolutní vzdálenosti mezi pozorovatelem a objektem bude zanedbatelná, tudíž nebude brána v potaz. Schematicky lze znázornit následovně.

Jak bylo uvedeno výše, pro správnou kvantifikaci je zapotřebí dodržet podmínky definované MFOV. Vzhledem k tomu, že objekt se vůči pozorovateli pohybuje, můžeme pro zjednodušení nahlížet na tento posun jako úhlovou rychlost (byť se o rotační pohyb v pravém slova smyslu nejedná).

Matematicky by bylo možno vyjádřit následovně:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}, \text{ resp } \omega = \frac{\varphi}{t}, \text{ případně } \omega = \frac{r * v}{abs r^2}$$

kde r = polohový vektor, $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{-2}$

Platí, že pro korektní kvantifikaci je třeba $MFOV + x * IFOV$, přičemž x = počtu pixelů detektoru, o které je potřeba MFOV navýšit pro danou vzorkovací frekvenci kamery (f). Pokud tedy chceme kvantifikovat pohybující se objekt, vytvořme si $MFOV'$ (měřící zorný úhel dynamické scény, pro který platí, že $MFOV' > MFOV$). $MFOV'$ nám tedy udává prostorový úhel. Při znalosti vzdálenosti a rychlosti pohybu objektu můžeme vypočíst velikost matice pixelů detektoru, kterými je nutno pokrýt teplotně homogenní plochu, jejíž zdánlivou teplotu chceme kvantifikovat. Pokud bychom si vytvořili modelový příklad s následujícími vstupními parametry:

- IFOV = 1 mRad $\rightarrow$ MFOV = 3 ÷ 5 mRad,
- $v = 1 \text{ m.s}^{-1}$ (rychlost pohybu objektu souběžně s pozorovatelem),
- $d = 10 \text{ m}$ (vzdálenost mezi objektem a pozorovatelem),
- $f = 30 \text{ Hz}$ (snímací frekvence kamery).

Pokud tyto vstupní parametry dosadíme do výše uvedených vzorců, můžeme vypočítat MFOV'.

Výsledek:

- $\omega = 5,4^\circ \text{ s}^{-1} \rightarrow 94,2 \text{ mRad.s}^{-1}$,
- $\text{MFOV}' = \text{MFOV} + x \cdot \text{IFOV}$,
- $x = x = \frac{\omega}{f \cdot \text{IFOV}} \rightarrow x = 3,14$,
- $\text{MFOV}' = \text{MFOV} + 3,14 \cdot \text{IFOV} \rightarrow \text{MFOV}' = 7 \div 9 \text{ mRad} = 7 \div 9 \text{ px [4]}$
- Pro uvedené parametry optického systému je tedy MFOV' pro danou vzdálenost rovno 7-9 pixelům detektoru (termogramu).

Uvedený výpočetní postup není převzatý a byl prvně publikován autory v roce 2021. Stejně tak jsou v interních materiálech definovány ekvivalentní algoritmy pro rotační pohyb objektu či pohyb objektu v 3D (trojrozměrném prostoru) včetně závislosti na změny vzdálenosti mezi pozorovatelem a pozorovaným objektem.

Je možno vidět, že také při zdánlivě malé rychlosti pohybu a poměrně značné vzdálenosti mezi pozorovatelem a pohybujícím se objektem, byla velikost MFOV' oproti statické hodnotě MFOV přibližně dvojnásobná.

Je možno oprávněně namítnout, že výpočet nebere v potaz absolutní změnu vzdálenosti mezi pozorovatelem a pohybujícím se objektem. Toto bylo zmíněno již na počátku a toto zanedbání bylo provedeno za účelem zjednodušení ukázky výpočtu, nicméně postup jako takový je velmi vhodně použitelný na většinu obvyklých situací. Obdobný postup je možno využít i na rotační pohyb, respektive kvantifikaci zdánlivých teplot rotačních prvků.

6. Závěr

Při výběru termokamery je potřeba znát aplikaci, na kterou má být dané zařízení využito, ale při volbě parametrů i rozumět, co jaký parametr znamená. Jak bylo opakovaně uvedeno, materiál není míněn jak kritika případných nedostatků termokamer vybavených mikrobolometri, ale upozornění na souvislosti mezi některými vlastnostmi mikrobolometrů a potřebami kvantitativní termografie. Při některých aplikacích je potřeba vzít jednoznačně v potaz technologická omezení mikrobolometrů či zvážit využití termokamer vybavených kvantovými detektory a jejich schopností řádově kratších integračních časů, vyšších záznamových frekvencí či možnosti skutečně synchronizovat akvizici dat s externím signálem či jevem.

Tento materiál neměl za cíl komplexní porovnání mezi termokamerami vybavenými mikrobolometrickými a kvantovými detektory. Limitních vlastností je celý souhrn a takový materiál by výrazně přesáhl vymezený rozsah. Cílem bylo upozornit pouze na některé z nich včetně způsobu, jak je eliminovat či se s nimi vyrovnat.

Celý materiál byl koncipován úmyslně naprosto nekomerčně, jednotlivé popisované jevy nejsou spojeny s konkrétními výrobci, případně údaje jsou anonymizovány. Autoři

jsou připraveni poskytnout zájemcům bližší informace, či konzultovat dotazy a požadavky vzešlé z tohoto materiálu.

Literatura

- [1] ČSN EN 16714-3 Nedestruktivní zkoušení - Termografické zkoušení - Část 3: Termíny a definice
- [2] Infratec GmbH, Infrarotsensorik und Messtechnik, Dresden: Manual of infrared camera VarioCAM® HD
- [3] OIML R 141 2008
- [4] Interní materiály "TMV SS" s.r.o.
- [5] www.tmvss.cz
- [6] www.lno.ca, 2018
- [7] https://cs.wikipedia.org/wiki/%C3%9Ahlov%C3%A1_rychlost

PROBLEMATIKA MIKROSKOPICKÉ TERMOGRAFIE

ISSUES OF MICROSCOPIC THERMOGRAPHY

Václav STRAKA, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ¹

Jiří SVOBODA, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ²

David KUBOŠ, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ³

Pavel PETRÁŇ, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ⁴

Pavel ZÍTEK, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ⁵

Mikoláš CHOURA, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ⁶

Anotace:

Kvantitativní termografie je v posledních letech využívána ve zvýšené míře také pro mikroskopické aplikace vyžadující dostatečné zobrazení detailů zkoumaného objektu. Jedná se nejenom o zobrazení s dostatečným geometrickým rozlišením, ale současně i dostatečně spolehlivou kvantifikaci radiačního toku emitovaného objektem a korektní přepočet na teploty. Tato oblast má některé limity a specifika, kterým je věnován následující materiál.

Annotation:

Quantitative thermography has been increasingly used in recent years also for microscopic applications requiring a sufficient display of the details of the examined object. It is not only a display with sufficient geometric resolution, but also a sufficiently reliable quantification of the radiation flux emitted by the object and a correct conversion to temperatures. This area has some limits and specifics to which the following material is devoted.

1. Úvod

Pojem mikroskopická termografie (nebo mikrotermografie) není standardizován a je zřejmě zapotřebí jej blíže vysvětlit, respektive objasnit jeho chápání autory. Jedná se o geometrickou rozlišovací schopnost v jednotkách mm až μm , přičemž jsou zdánlivé teploty objektu vizualizovány (kvalitativní termografie) anebo vypočítávány pro každý pixel termogramu (kvantitativní termografie). Byť se může zdát, že se jedná v porovnání

¹ Ing. Václav Straka

"TMV SS" spol. s r.o.

Studánková 395, 149 00 Praha 4 - Újezd

tel.: +420 272 942 720, fax: +420 272 942 722, e-mail: vaclav.straka@tmvss.cz, <https://www.tmvss.cz/>

² Ing. Jiří Svoboda

e-mail: jiri.svoboda@tmvss.cz

³ Ing. David Kuboš

e-mail: david.kubos@tmvss.cz

⁴ Pavel Petráň

e-mail: pavel.petran@tmvss.cz

⁵ Pavel Zítek

e-mail: pavel.zitek@tmvss.cz

⁶ Bc. Mikoláš Choura

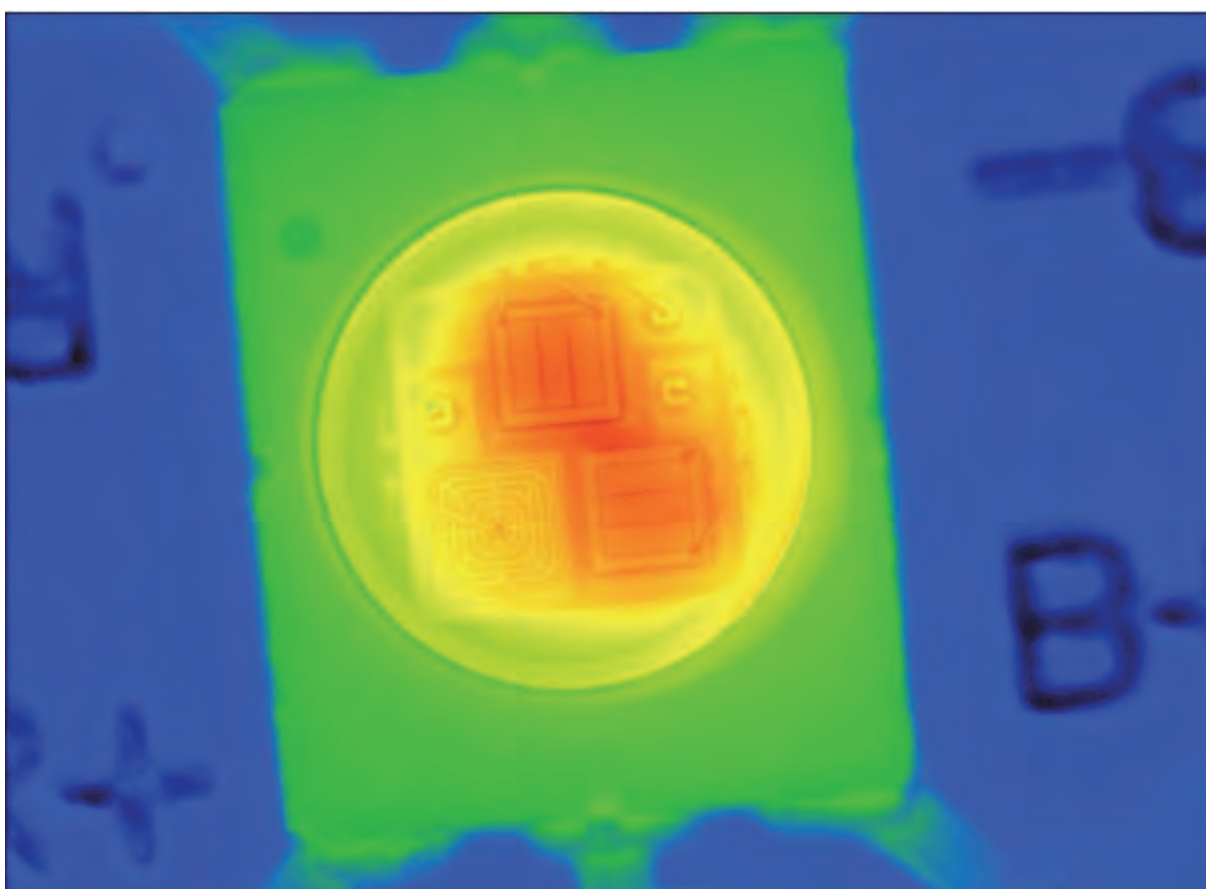
e-mail: mikolas.choura@tmvss.cz

s klasickou termografií primárně právě o minimalizaci velikosti zobrazovaného pixelu, právě s tímto je spjata několik aspektů, které je nutno brát v potaz.

Mezi základní aplikace, kde je mikroskopické termografie využíváno, je možno považovat mikroelektroniku, materiálový výzkum, pokročilé materiály a fyzikální, chemické, medicínské a biologické experimenty. Tento výčet samozřejmě není kompletní, je možno jej pouze považovat za nástin stávajícího využití.

Mikroskopická termografie není limitována pouze na metody „pasivní termografie“ (teplotní pole jsou vyvolána například standardním provozem), ale je s úspěchem využívána i v oblasti tzv. „aktivní termografie“ (řízené excitování vzorku externím zdrojem energie, ať již ve formě pulzu, tak periodicky se opakujícího signálu).

V následujících kapitolách budou zmíněny vybrané aspekty, které je nutno brát v potaz, tak vybrané aplikace.



Obr.1 RGB LED, MWIR kamera 640*512 px, M=1.0×, FOV (9.6 × 7.7) mm, IFOV 15 μm, velikost jednotlivých LED cca 1x1mm

Stejně jako v jiných oblastech je zapotřebí při provádění experimentu brát v potaz požadavky na vypovídající schopnost experimentu, které determinují požadavky na použité vybavení, případně si být jednoznačně vědom parametrů použitého vybavení a jejich případného vlivu na výsledek.

2. Technické parametry vybavení a jejich vliv

Před počátkem vlastního měření je zapotřebí vytvořit odhad požadavků vlastního experimentu a vyhodnotit, zda-li uvažované technické vybavení je dostatečně vhodné, případně vybrat vhodné vybavení. Kvalita pořízených dat významně ovlivňuje následné vyhodnocení, proto je zapotřebí vzít tyto parametry do úvahy. V potaz je vhodné vzít zejména parametry uvedené v následujících podkapitolách.

2.1. Spektrální rozsah

Spektrální rozsah má vliv nejenom z hlediska množství energie emitovaného objektem (vliv emisivity a Wienův zákon posuvu), ale též z hlediska případné propustnosti měřeného objektu. Neexistuje univerzální rada, jaké pásmo je nejvhodnější. Vždy záleží na konkrétním experimentu a objektu. Obecně jsou v oblasti termografie rozlišována 3 pásma s následujícími přibližnými rozsahy - SWIR $0,8 \div 2 \mu\text{m}$, MWIR $2 \div 5 \mu\text{m}$ a LWIR $8 \div 14 \mu\text{m}$

2.2. Technologie detektoru

Ačkoliv termogram vypadá ve finále podobně, technologie detektoru je často limitující z hlediska dané aplikace. Obzvláště u RD a NDT aplikací je zapotřebí chování detektoru vzít v potaz. Obecně můžeme rozdělit detektory do dvou základních skupin, a to tepelné (mikrobolometry, někdy také označované jako nechlazené) a fotonové (též označované jako chlazené). Za první vlastnost je možno považovat způsob vyčítání detektoru - zatímco fotonové detektory je možno vyčíst najednou (snapshot), tepelné detektory jsou vyčítány metodou „line-by-line“, tedy po jednotlivých řádcích či skupinách řádků. Výsledkem vyčítání metodou „line by line“ může být nejen deformace obrazu, ale též fakt nejednotného systémového času jednotlivých částí termogramu, což ve výsledku například limituje použití Fourierovy transformace.

Stejně tak je třeba vzít v potaz triggování / synchronizaci kamery - přesnou synchronizaci umožňují pouze kamery s fotonovými detektory, nikoliv kamery s detektory tepelnými.

2.3. Teplotní rozlišení

Jedná se o schopnost detektoru / kamery rozlišit rozdíly zdánlivých teplot sledovaného objektu. Obvykle je tento parametr označován jako NETD (Noise equivalent temperature difference) a jeho hodnota je uváděna v mK při vztažené teplotě 25 nebo 30 °C. Zatímco nejlepší tepelné detektory dosahují hodnot v rozmezí $30 \div 35 \text{ mK}$ (detektory - pro reálné hodnoty je zapotřebí připočíst šum produkovaný též kamerou jako takovou a optikou), u fotonových detektorů je tato hodnota v závislosti na kvalitě detektoru na úrovni až 10 mK. Horší teplotní rozlišení tepelných detektorů často výrobci kompenzují vyhlazováním šumu, nicméně je možno říci, že obecně kamery s fotonovými detektory jsou výrazně citlivější. Pro RD aplikace jsou obvykle doporučovány kamery s fotonovými detektory.

2.4. Geometrické rozlišení detektoru

Tepelné radiometrické detektory mohou mít různý počet pixelů, obvykle se setkáme s rozlišeními od $120 \times 80 \text{ px}$ až po $1024 \times 768 \text{ px}$ (aktuálně nejvyšší standardně dostupné rozlišení radiometrických mikrobolometrických detektorů). Fotonové radiometrické

detektory se standardně vyskytují v rozlišení od úrovně 640*512 px až po 1920*1536 px). Tento parametr je vysoce důležitý z hlediska požadavků na zobrazení dané plochy s dostatečným geometrickým rozlišením (IFOV). Je třeba rozlišovat mezi fyzickým rozlišením detektoru a rozlišením termogramu. Existují způsoby pro navýšení rozlišení termogramu. Některé jsou však pro mikroskopické aplikace zcela nevhodné a je potřeba být obeznámen se způsobem navýšení rozlišení. U mikroskopických aplikací je jediným korektním způsobem optomechanický rozklad obrazu umožňující navýšit rozlišení termogramu až na 4-násobek. Postupy prezentované jako „využití mikrootřesů zeměkoule“ či jiné, jsou pouze matematickou interpolací mezilehlých virtuálních pixelů a nejsou korektně aplikovatelné.

2.5. Fyzická velikost jednoho pixelu.

Byť tento parametr nevypadá podstatně, je důležité jej znát z hlediska definice schopnosti zobrazení detailu. Obvykle bývá ve specifikacích označen jako „pixel pitch“. Nejedná se o faktickou velikost jednoho pixelu detektoru, ale o vzdálenost středů dvou sousedících pixelů. Význam tohoto parametru je ve vztahu k použité optice - v oblasti mikroskopických aplikací se IFOV neuvádí v úhlových jednotkách (mRad), ale jako fyzická velikost zobrazeného pixelu na předmětu - obvykle v μm . Důvodem je minimální hloubka ostrosti při mikroskopickém zobrazení a prakticky fixní pracovní vzdálenost. Tyto objektivy jsou obvykle definovány jako „x0,5“, „x1“ nebo až „x8“. Tuto číselnou hodnotu můžeme považovat za jmenovatele ve zlomku, kde čitatelem je „pixel pitch“. Jako příklad můžeme například zvolit detektor s pixel pitch 17 μm a použitý objektiv „x0,5“. fyzická velikost zobrazovaného pixelu je pak 34 μm . Tyto aspekty budou dále zmíněny v jedné z následujících kapitol

2.6. Integrační čas / časová konstanta detektoru

U tepelných detektorů mluvíme o časové konstantě detektoru, která se pohybuje v rozmezí 6 ÷ 10 ms (obvyklé hodnoty, mohou se v závislosti na výrobci lišit. U detektorů fotonových hovoříme o integračním čase, který je závislý, kromě parametrů detektoru, i na hustotě radiačního toku emitovaného objektem, použitých teplotních a spektrálních filtrech a dalších parametrech. U fotonových detektorů se pohybuje z hlediska integračních časů obvykle v jednotkách až stovkách μs , tedy hodnotách až o několik řádů lepších než u detektorů tepelných. Je zapotřebí si uvědomit, že u fotonových detektorů, na rozdíl od detektorů tepelných, je možno integrační čas řídit. Toto je extrémně důležité u měření dynamických scén, ať již z hlediska teplotního, tak kinematického.

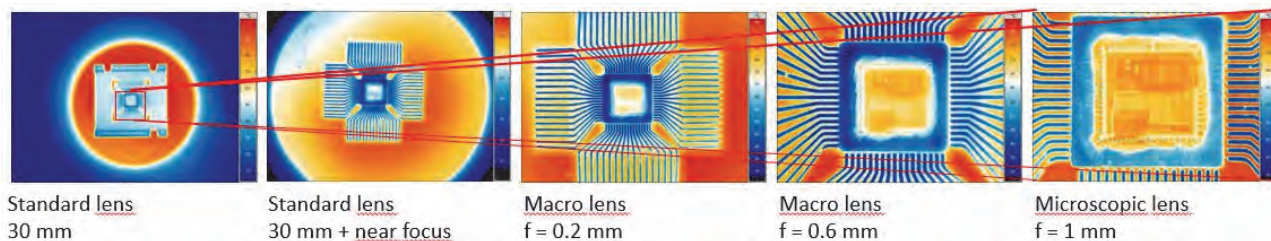
2.7. Vzorkovací frekvence záznamu

Vzorkovací frekvenci je potřeba chápat odlišně u tepelných (mikrobolometrických) detektorů, oproti detektorů fotonovým. Zatímco u kamer s tepelnými detektory lze za mezní frekvenci považovat hodnotu 100 ÷ 120 Hz (nad tuto frekvenci je nejistota kvantifikace teplot vysoká a případné jevy lze považovat za indikaci teplotního trendu, nikoliv spolehlivě vypočtené teploty), tak u kamer s fotonovým detektorem běžně dosahujeme vzorkovací frekvence až 100 kHz, v závislosti na kameře, sledovaném jevu a velikosti sledované oblasti

Parametry uvedené v předchozích kapitolách je nutno znát s ohledem na vypovídací schopnost výsledku měření, neboť jej mohou ovlivňovat a výrazně limitovat.

3. Optický systém

Pokud budeme uvažovat výhradně optické rozlišení (a pomineme nic nepřinášející digitální zoom či matematickou interpolaci termogramu) je nutno využívat dedikované prostředky. Cílem je detailní zobrazení objektu, přičemž fyzická velikost pixelu termogramu je dána aplikací jako takovou. Optický systém tedy volíme s ohledem na naše očekávání.



Obr.2 Zobrazení komponentu s různými objektivy

Zobrazení detailu nám umožňuje nejen zobrazení detailu s dostatečnou vypovídající schopností, ale též korektní výpočet teplot jednotlivých bodů termogramu. Jedná se o identickou problematiku jako v případě standardních objektivů ve vztahu k IFOV.

Z technického hlediska máme k dispozici 3 různá technická řešení, či jejich kombinace (seřazeno dle technické úrovně):

- rozšiřující kroužky,
- makroskopické předsádky,
- mikroskopické objektivy.

3.1. Rozšiřující kroužky

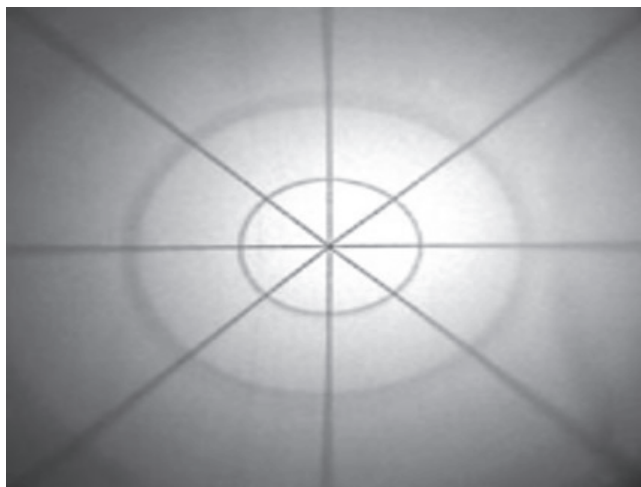
Instalují se mezi kameru a objektiv (případně kameru a objektiv s nasazenou makropředsádkou). Jedná se o kroužky o tloušťkách v řádech jednotek mm.



Obr.3 Rozšiřující kroužky

Instalace těchto kroužků umožňuje zkrácení minimální ostřicí vzdálenosti a tím i zvětšení zobrazovaného pixelu na objektu. Jedná se o cenově vysoce efektivní řešení a současně flexibilní, neboť kroužky je možno vrstvit. A tím i měnit velikost zobrazovaného pixelu. V potaz je však nutno vzít fenomén tzv. „vinětování“ (vignetting), který se projevuje

rozostřením obrazu s narůstající tendencí od středu k okrajům zorného pole, jako je možno vidět na obrázku číslo 4



Obr.4 Ukázka tzv. vinětování

Kromě estetického vlivu je potřeba si uvědomit, že tzv. vinětování je ve své podstatě rozostřením obrazu směrem k okrajům a tvarová deformace. V oblasti kvantitativní termografie platí, že nedostatečné zaostření způsobuje nekorektní kvantifikaci teplot a tím i zmenšení použitelného zorného pole (v důsledku zmenšení geometrického rozlišení detektoru). Toto chování je možno kvantifikovat například pomocí tzv. Prewittova operátoru.

Obecně lze použití rozšiřujících kroužků hodnotit jako levné řešení, které však není vhodné pro pokročilé nebo RD aplikace. Pouze jako nouzový postup v případě potřeby, který značně limituje výsledné použití termogramu.

3.2. Makropředsádky

Nasazují se na standardní objektiv a obvykle dosahují zvětšení až do hodnot $\times 0,5$, tzn. dvojnásobku pixel pitch. Jedná se o poměrně vhodné řešení v případě, že uživatel nemá příliš velké nároky na aplikaci (zvětšení). Kvalita termogramu je obvykle poměrně dobrá, stejně tak přesnost měření a naprosto minimální vinětace. Příklad je na obrázku 5.



Obr.5 Makro předsádka

Řešení pomocí makropředsádek lze hodnotit jako akceptovatelnou vstupní úroveň do mikroskopických aplikací, samozřejmě po zhodnocení limitů tohoto přístupu.

3.3. Mikroskopické objektivy

Mikroskopické objektivy jsou jednoznačně vrcholným řešením v této oblasti. Pokud budeme předpokládat, že se jedná o kvalitní objektivy, tak umožňují v dnešní době zobrazení detailů menších, než $2\text{ }\mu\text{m}$. Bývají označovány opět jako poměr vůči pixel pitch, tudíž jejich zobrazovací schopnost je třeba vyhodnocovat právě na základě znalosti obou parametrů, nebo na základě uváděného IFOV. IFOV (a stejně tak FOV) se v této oblasti neuvádí v úhlových jednotkách, ale přímo jako fyzický rozměr pixelu obrazu, nebo celého zorného pole, a to v μm (IFOV) nebo mm (FOV). Toto je možné díky pevné pracovní vzdálenosti mezi objektivem a sledovaným objektem, respektive malou hloubkou ostrosti mikroskopických objektivů. Proto je třeba věnovat pozornost i pracovní vzdálenost, označované například jako WD. Příklady je možno vidět na obrázku číslo 6.



Obr.6 Příklady mikroskopických objektivů

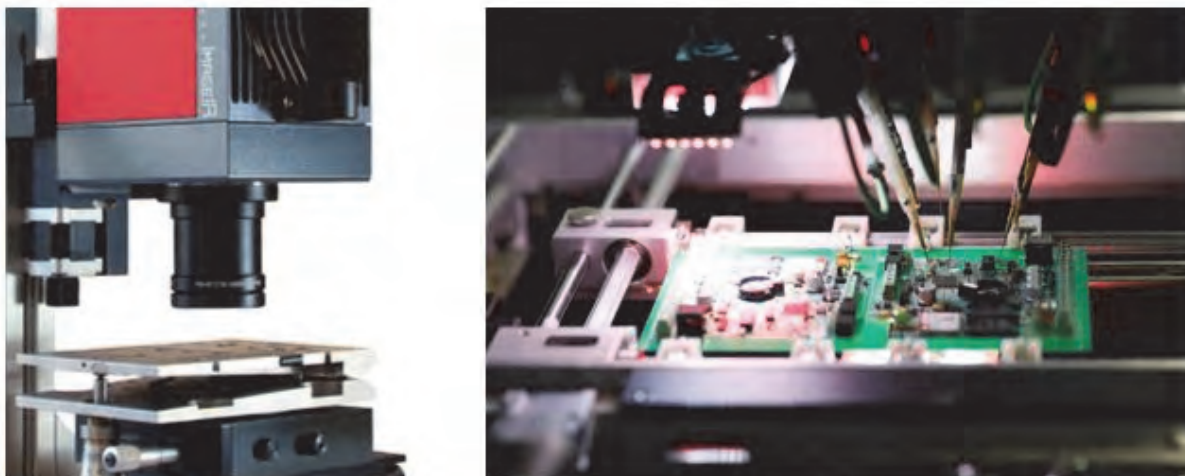
Pokud bychom zohlednili pixel pitch, můžeme vidět typické hodnoty FOV a IFOV. Jako příklad jsou použity kamery s rozdílným geometrickým rozlišením detektoru a různou velikostí pixel pitch (v tomto případě se jedná o kamery s fotonovými detektory). Pro ukázkou jsou v tabulce i hodnoty pro řešení pomocí makropředsádek.

	(640 × 512) IR pixels @ 15 μm pitch		(1,280 × 1,024) IR pixels @ 10 μm pitch	
	FOV	IFOV	FOV	IFOV
Close-up 300 mm	58 mm × 46 mm	90 μm	77 mm × 61 mm	60 μm
Close-up 500 mm	48 mm × 38 mm	75 μm	64 mm × 51 mm	50 μm
M = 1.0x, WD40, WD 200, WD 300	9.6 mm × 7.7 mm	15 μm	13 mm × 10 mm	10 μm
M = 3.0x, WD22	3.2 mm × 2.6 mm	5 μm	4.3 mm × 3.3 mm	3.3 μm
M = 8.0x, WD14	1.2 mm × 0.96 mm	2 μm	1.6 mm × 1.28mm	1.3 μm

Obr.7 Velikosti FOV a IFOV při různých kombinacích mikroskopických objektivů a detektorů

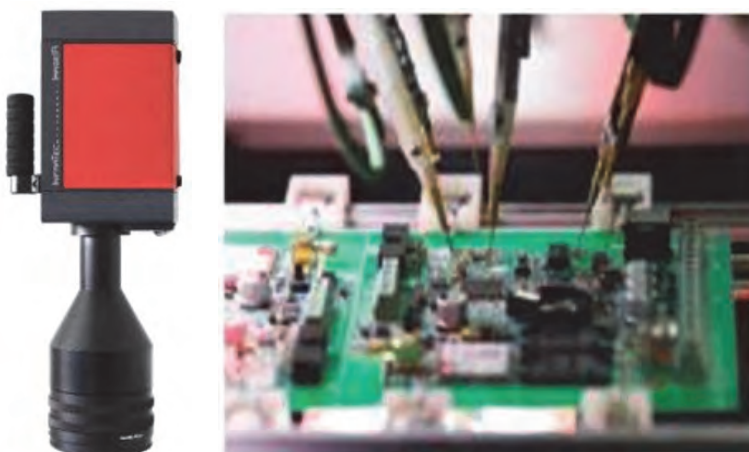
Jak je možno vidět, u mikroskopických objektivů s nejlepším zvětšením je potřeba počítat s malými pracovními vzdálenostmi mezi objektem a objektivem a to v řádech malých jednotek centimetrů. Tento aspekt není u mnohých aplikací na překážku, nicméně

existují aplikace, kde by byla větší pracovní vzdálenost žádoucí. Jako příklad můžeme uvést elektronické prvky, které je potřeba nakontaktovat, případně vzorky v klimatických komorách či jiné aplikace vyžadující zvětšenou pracovní vzdálenost a současně velmi dobré zobrazení detailu. Příklad je uveden na obrázku 8.



Obr.8 Příklady pracovních vzdáleností

V takových případech se jako řešení jeví speciální mikroskopické objektivy s prodlouženou pracovní vzdáleností. Příklady jsou uvedeny na obrázku 7 v části zvýrazněné červenou barvou. Je tedy možno dosáhnout zobrazení jednoho pixelu o velikosti až do 10 μm při pracovní vzdálenosti 200 nebo 300 mm. Příklad je uveden na obrázku 9.



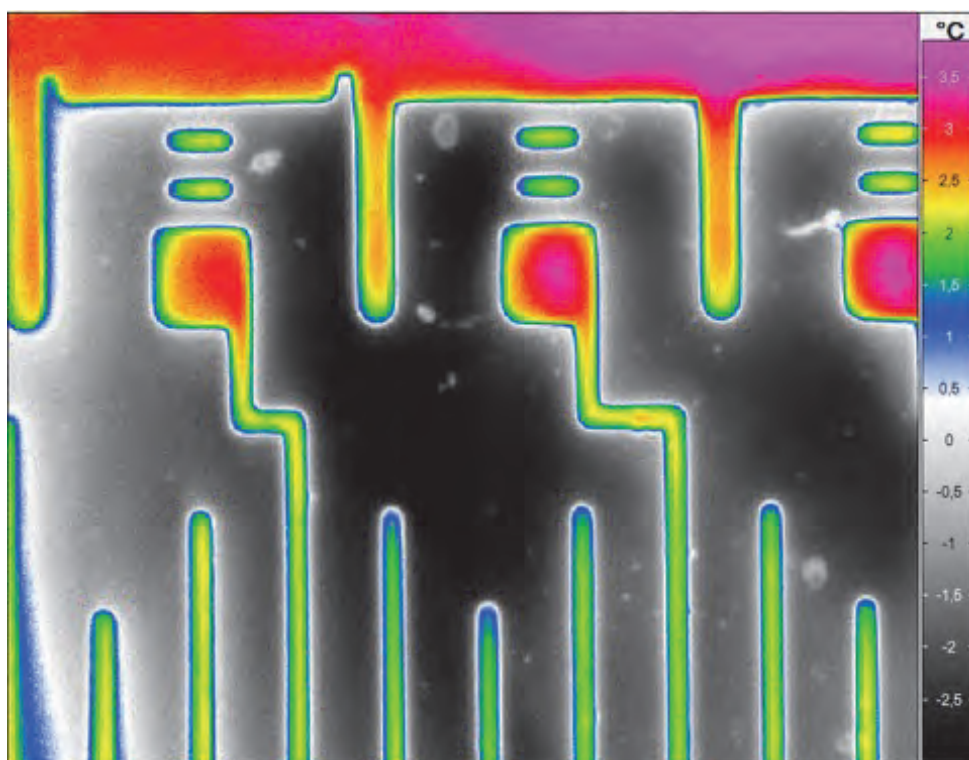
Obr.9 Příklad použití mikroskopického objektivu s prodlouženou pracovní vzdáleností

Na obrázku 9 je možno vidět též příklad, kdy členitost objektu neumožňuje korektní zaostření všech prvků v zorném poli vzhledem k malé hloubce ostroty mikroskopických objektivů. Jak již bylo zmíněno, korektní zaostření je jedním z klíčových parametrů následné kvantifikace zdánlivých teplot. Nejedná se tedy pouze o vizuelní aspekty, ale

aspekty vztahující se k přesnosti měření a následné interpretaci. Problematice měření objektů s členitostí přesahující hloubku ostrosti je vyčleněna kapitola 4.

Ačkoliv některé parametry, jako například pracovní vzdálenost, mohou vypadat nepodstatně, je zapotřebí je vzít do úvahy právě vzhledem k povaze experimentu či aplikace

Pokud je tedy vybavení zvoleno vhodně, můžeme pracovat s termogramy s vysokým rozlišením a korektně je analyzovat. Jako příklad můžeme uvést termogram na obrázku 10. Jedná se o pasivně nasnímaný SMD rezistor kamerou s detektorem 1280*1024 px s velikostí jednoho pixelu cca 1,3 μm . Stupnice zdánlivých teplot zobrazuje odchylky od vztažné teploty.

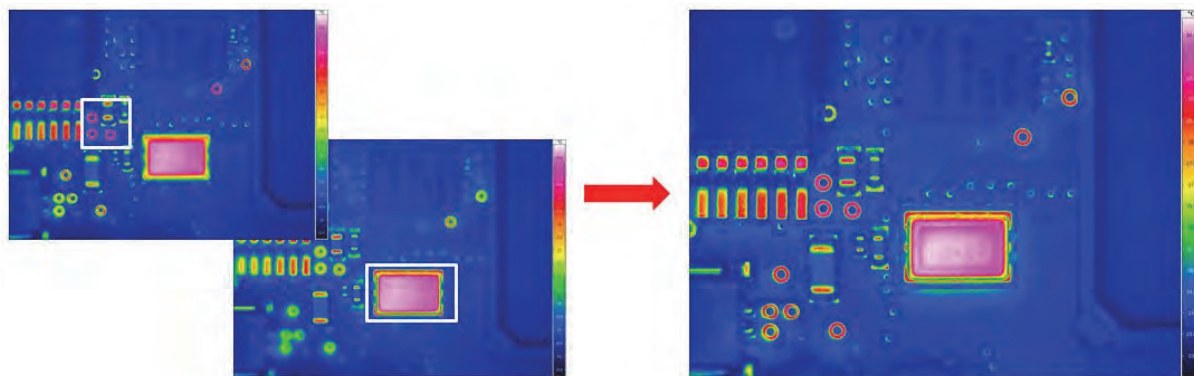


Obr.10 SMD rezistor, objektiv Mx8, detektor 1280x1024 px, velikost jednoho pixelu cca 1,3 μm , pasivní termografie

4. Měření členitých objektů

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, jednou z vlastností mikroskopických optických systémů je snížená hloubka ostrosti. Jedná se o parametr ovlivněný poměry mezi velikostí detektoru, světelností optiky a dalších parametrů termografické sestavy. Pro správnou kvantifikaci je zapotřebí mít k dispozici správně zaostřený termogram, což však členitost snímaného objektu nemusí umožňovat v případě jednoho termogramu.

Řešením se jeví postup složení jednotlivých korektně zaostřených termogramů do termogramu finálního. Toto je prováděno automatizovaným algoritmem, který vybere z jednotlivých termogramů korektně zaostřené části a složí je do jednoho. Podmínkou je buď automatizované ostření kamerou (pro kombinaci objektivu s makropředsádkou či řízená změna vzdálenosti mezi snímaným objektem a kamerou pomocí motorizovaného stativu řízeného vyhodnocovacím software. Příklad složení termogramu je na obrázku 11.



Obr.11 Příklad složení termogramu z jednotlivých korektně zaostřených termogramů

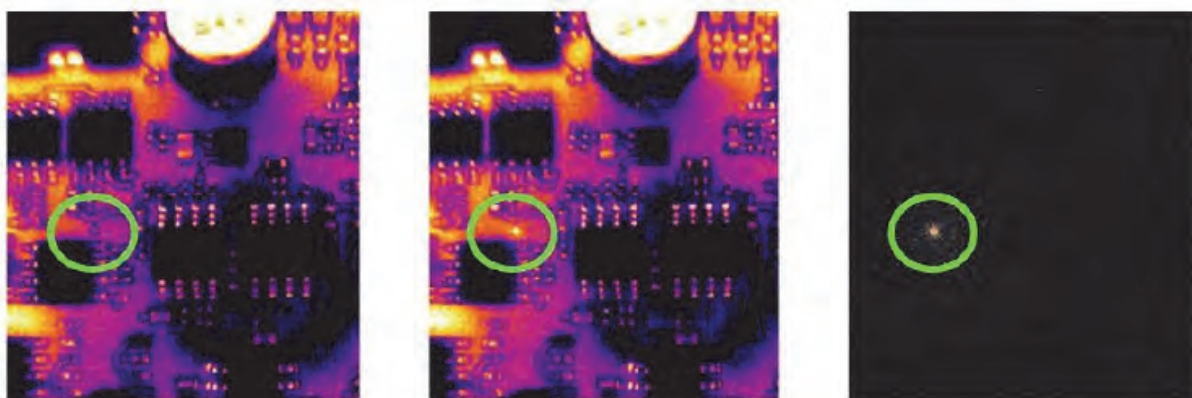
Vzhledem k faktu, že se jedná o termogramy pořízené s určitým časovým postupem je potřeba vzít do úvahy případnou teplotní dynamiku scény, stejně tak je zapotřebí vzít tento fakt do úvahy při použití Fourierovy transformace.

5. Aplikace

Mikroskopické aplikace termografie zahrnují velké spektrum oblastí, ať se již jedná o elektroniku, biologii, medicínu, materiálový výzkum či další oblasti. V následujících podkapitolách jsou uvedeny příklady, nikoliv kompletní výčet aplikací.

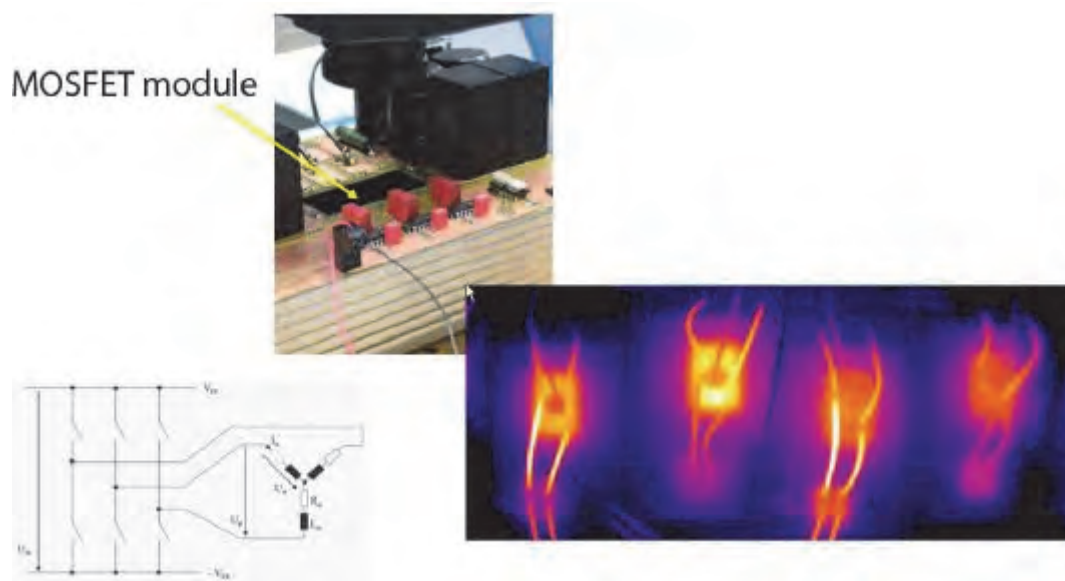
5.1. Mikroelektronika MOSFET a NiCr odpory [1]

Při tomto experimentu jsou elektrické "zkratové proudy" selektivně injektovány do zkoušených sestav. To může vést ke zvýšeným tokům proudu ve vadných oblastech, což v některých případech vyvolává změny teploty, které lze zjistit pomocí termografie. Vzhledem k možnosti vyhodnocení diferenciálního obrazu lze podezřelý bod přesně lokalizovat v reálném čase.



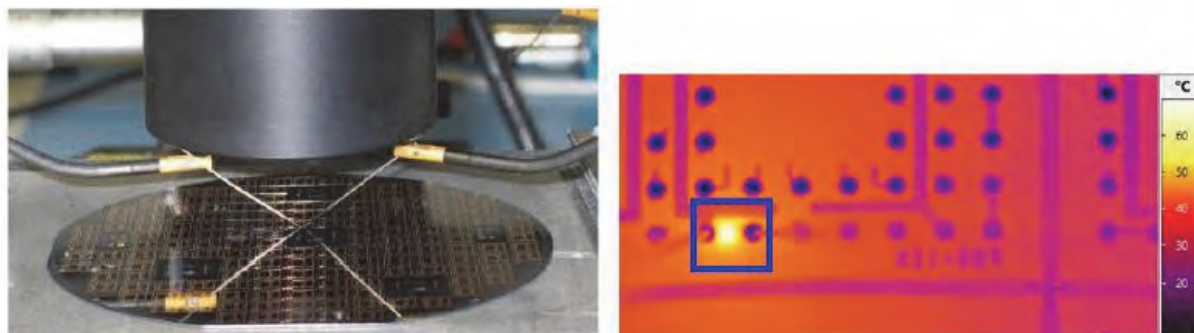
Obr.12 Zkrat na PCB, využití rozdílového termogramu, proudový pulz 300 mA

Například při aplikaci výkonových MOSFETů ve 3-fázovém invertorovém provozu lze také velmi dobře zobrazit a monitorovat.



Obr.13 MOSFET modul

S pomocí mikroskopických čoček s vysokým rozlišením $M=3\times$, je možné charakterizovat integrované pasivní komponenty na úrovni waferů. V následující aplikaci byly analyzovány nikl-chromové rezistory jako funkce jejich ztrátového výkonu.



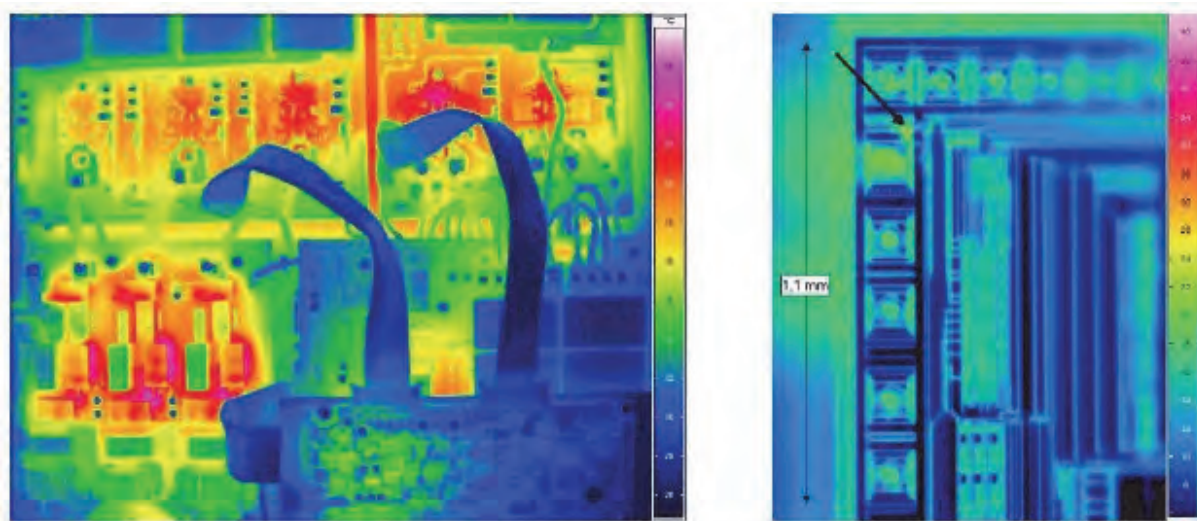
Obr.14 NiCr rezistory na wafer, objektiv Mx3, detector 640x515 px, zorné pole zúženo

5.2. Střídače [2]

Analýza elektronických součástek, je jednou z aktivit ISIT. Mimo jiné pro tyto aplikace využívá termokameru s NETD 20 mK která umožňuje bezpečnou identifikaci jakékoliv, i jen pouhého vznikajícího tepelného problému. Tak se lze v rané fázi vyhnout vývojovým selháním. Používáním detektoru s 640 x 512 IR pixely s roztečí 15 μm a vysoce výkonným 3x mikroskopickým objektivem lze dosáhnout geometrického rozlišení pouze 5 μm . Zároveň zorné pole zobrazuje plochu 3,2 x 2,6 mm^2 , což je vhodné pro mnoho mikroelektronických aplikací. Další, snadno vyměnitelné objektivy s řadou

ohniskových vzdáleností umožňují ISIT dále využívat flexibilitu jejich infračervené kamery v široké škále aplikací.

Následující příklad zobrazuje detekci závady na střídači



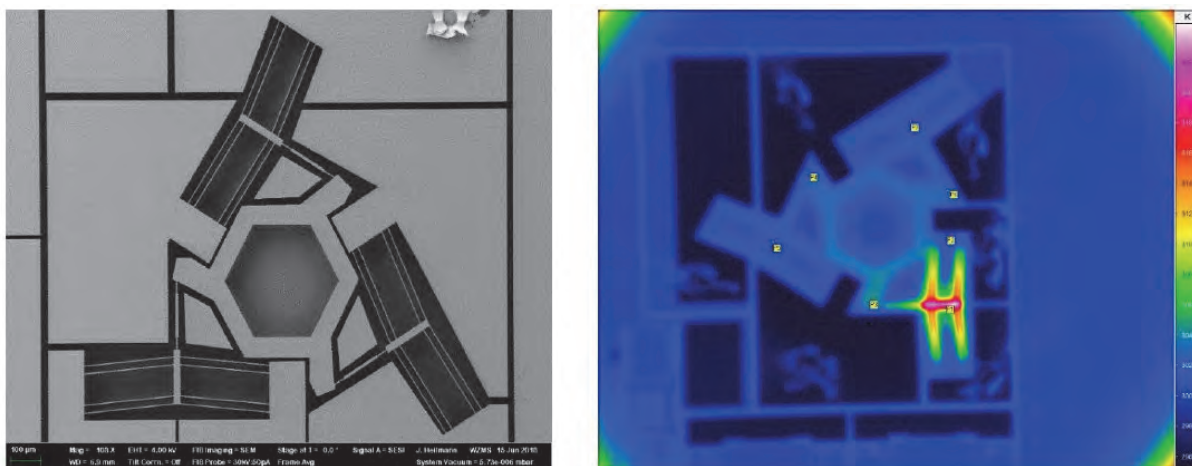
Obr.15 Závada AD převodníku na střídači

5.3. MEMS [3]

Mikroelektromechanické systémy (MEMS) nabízejí širokou škálu možných aplikací v oblasti nanotechnologií. Reálnými příklady jsou rozpoznávání polohy mobilních telefonů a použití v airbagech, digitálních fotoaparátech nebo kardiostimulátorech. Jiné aplikace najdeme především v oblasti miniaturizovaných lékařských diagnostických přístrojích. Rostoucí nároky na miniaturizaci ovlivňují jak systémová řešení potřebná pro tyto, tak i pro senzory a ovládací prvky, které mají být vyvinuty.

Skupina mikrosystémů a biomedicínského inženýrství na Technické univerzitě Chemnitz pracuje na aktuátorech na bázi MEMS, které mají sloužit jako řídicí platforma pro nanokomponenty o velikosti pouze několik mikrometrů. Podobně jako u běžných elektromechanických polohovacích systémů se třemi stupni volnosti, je cílem umožnit vysokou přesnost horizontálního nebo vertikálního pohybu nanokomponent.

Prototypy akčních členů již byly vyvinuty v Chemnitz University of Technology a umožňují ovládání pohybu s přesností až $2\text{ }\mu\text{m}$ a $0,3^\circ$. Dosažení takové přesnosti vyžaduje přesnou analýzu parametrů materiálu na použitých pohonech. U termopohonů je nejdůležitější faktor co nejpřesnější měření teploty. Vzhledem k velmi malému rozměru a mechanickým vlastnostem objektů, je nutné využití těch nejsložitějších termokamer a objektivů. Pro měření je využívána termokamera s rozlišením detektoru $1\,280 \times 1\,024$ IR pixelů a mikroskopický objektiv Mx8 pro dosažení rozlišení v μm rozsah (cca $1,3\text{ }\mu\text{m/pixel}$) současně s širokým zorným polem pro zachycení periferních komponent pohonů.



Obr.16 MEMS, Mx8

5.4. PCB [4]

Jako jeden z největších dodavatelů automobilových komponentů na světě přikládá Delphi zásadní význam kvalitě svých produktů. Ve Wiehlu, kde se nachází laboratorní závod společnosti Delphi „Test & Validation Services“, se termografie používá pro design a validaci produktu jako součást zajištění kvality. Tím je vytvořen stabilní hardwarový základ pro integraci nových technologií do motorových vozidel, které opět představují významný příspěvek k bezpečnosti provozu. Aby byly splněny vysoké nároky na hardware, např. pojistky, konektory a desky plošných spojů, Delphi pracuje s účinnými a přesnými termografickými testovacími postupy.

Na obrázku je vidět skrytý hotspot, který byl detekován pomocí termografie. Pro zvýšení spolehlivosti v provozu obvodová část byla revidována. Obrázek 2 ukazuje rozložení teploty pojistkové skříňky. Na základě výsledků tepelných testů nyní Delphi těží ze snížení doby vývoje, protože hardware je optimálně navržen již v prvním procesu návrhu. To opět vede k vysokým standardům kvality a zároveň optimalizaci nákladů.



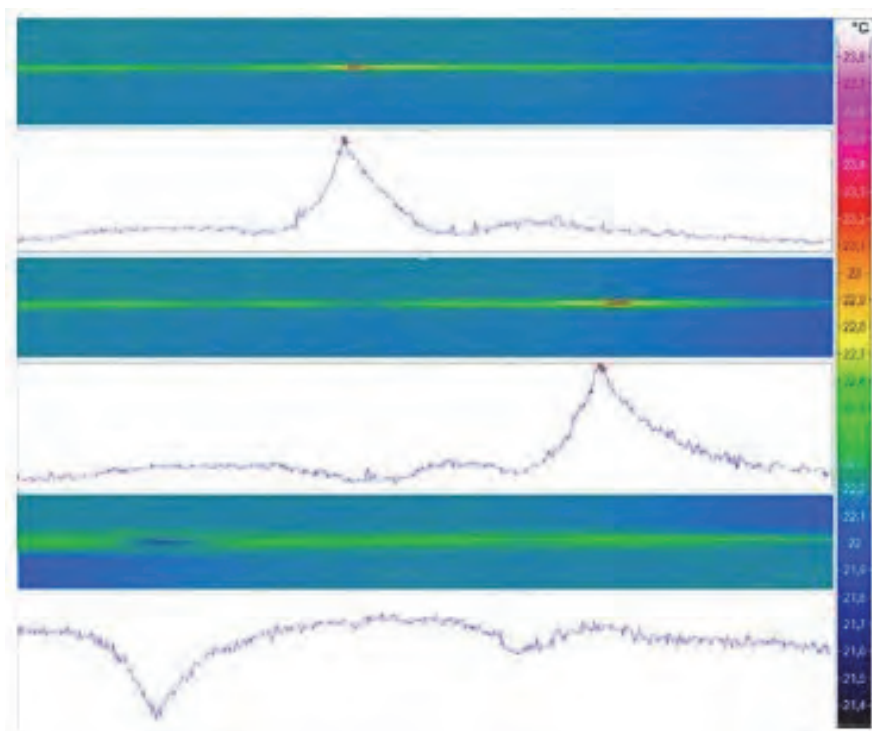
Obr.17 Fuse blok PCB, Mx5

5.5. Únavové zkoušky materiálů [5]

V posledních několika desetiletích výzkumníci stále více pracovali na alternativních chladičích technologiích, které nepoužívají chladiva obsahující fluorované uhlovodíky. Technologie jako ferroelastické chlazení slibují vysokou účinnost, efektivnější využití zdrojů a snížení emisí skleníkových plynů. Tato forma chlazení využívá dráty z pseudoelastické slitiny s tvarovou pamětí na bázi nikl/titan (NiTi). Mechanické zatížení NiTi drátů způsobuje velké, reverzibilní deformace v důsledku namáháním indukované martenzitické transformace. Vzniká martenzitická struktura a tepelná energie je přenášena do okolí. Po odstranění zátěže se stresem indukovaná martenzitická struktura mění zpět na původní austenit. K tomu je třeba využít tepelnou energii z okolí.

Pro dosažení maximálního potenciálu úspor ferroelastického chlazení je nutné celý proces deformace optimálně regulovat. Výzkumníci chtějí nezávisle ovládat parametry, jako je frekvence nebo fázový posun mezi mechanickým namáháním a přenosem tepla. Navíc chtějí měřit výsledný chladič výkon pro konkrétní materiál a konkrétní geometrii zařízení. Za tímto účelem vyvinuli pánové Seelecke a Schmidt platformu pro analýzu dat.

Termografická kamera je vybavena mikroskopickým objektivem Mx1 a detekuje drát, jehož průměr je pouze přibližně 150 μm . Přesné termografické měření teploty geometrickým rozlišením 15 μm . Tímto způsobem mohou vědci zpětně sledovat ferroelastické chlazení velmi přesně. Díky detektoru kamery (1 280 x 1 024) mohou vědci ze Saarbrückenu sledovat dlouhé části drobného drátu a zaznamenávat strukturální změny. Vysoká frekvence záznamu jim také umožňuje sledovat i krátkodobé změny teploty.



Obr.18 NiTi 150 μm - Mx1

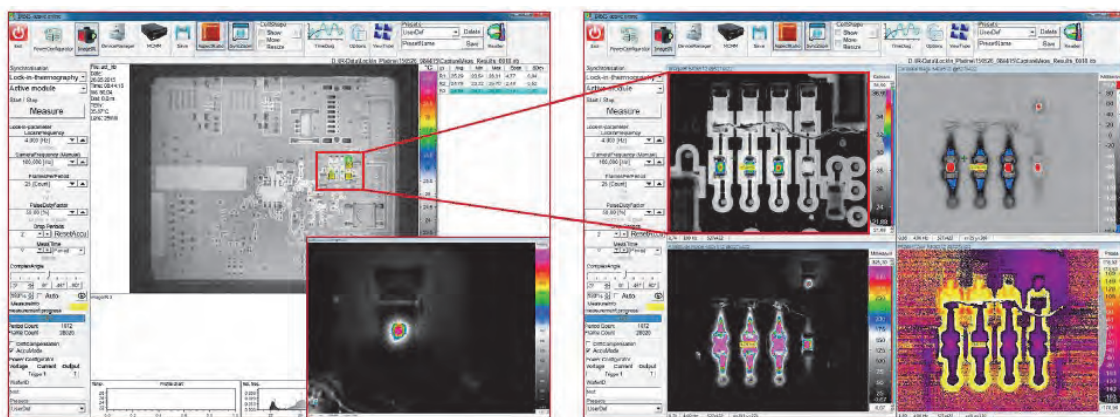
6. Metody aktivní termografie v s mikroskopickým zobrazením

Za metody aktivní termografie jsou považovány postupy, kdy je energie různých forem dodávána testovanému objektu ať již ve formě pulzu (PPT - pulse phase thermography) nebo ve formě periodicky se opakujícího signálu nebo energie, přičemž snímání je synchronizováno s tímto excitačním signálem (lock-in). detailnímu popisu metod se autoři věnovali i v jiných materiálech, případně moho připravit dedikovanou přednášku na toto téma.

Aktivní termografie jako taková se nezabývá primárně měřením absolutních teplot, ale zobrazení teplotních gradientů jako funkce extice externím zdrojem energie. Díky SW zpracování, ne možno zobrazit teplotní detaily v řádech jednotek mK až stovek μK ($0,001 \div 0,0001 \text{ } ^\circ\text{C}$).

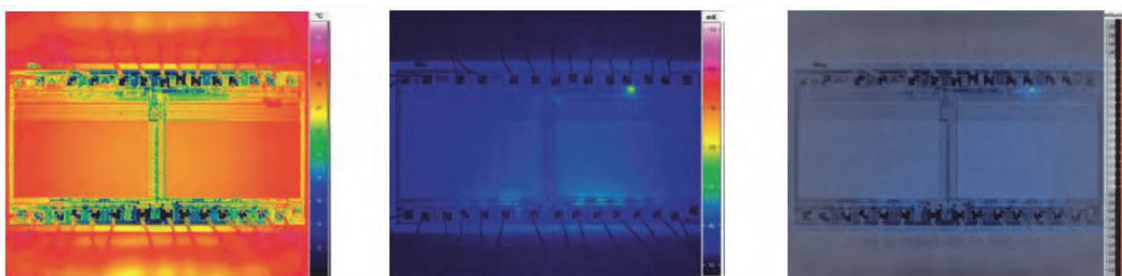
Tyto postupy jsou aplikovatelné i v oblasti mikroskopické termografie. Jeden z příkladů byl uveden již v kapitole 5.5.

V případě Lock-In termografie je výsledek prezentován ve formě tzv. amplitudového, fázového a komplexního obrazu. Tato zobrazení detekují případné defekty či nehomogenity výrazně citlivěji, než klasické "pasivní" termografické postupy. Příklad je možno vidět na obrázku 19.



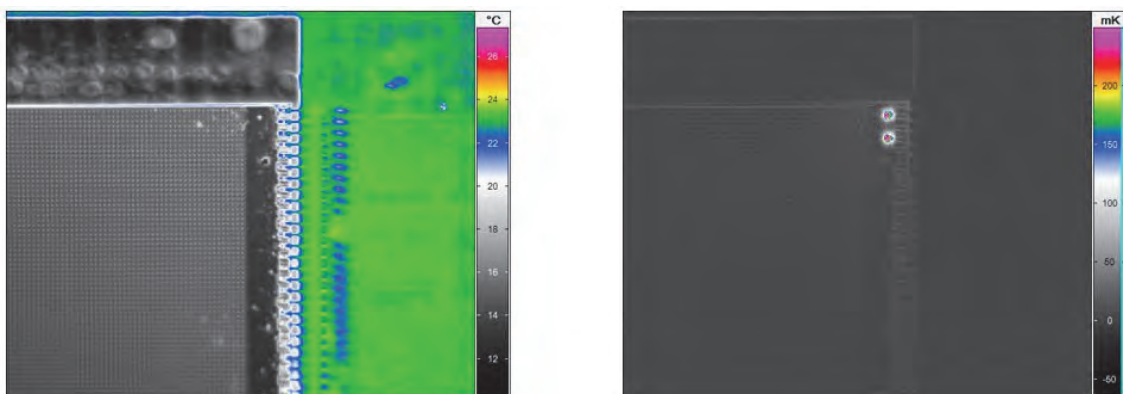
Obr.19 Lock-In - příklady zobrazení výsledku

Dalším příkladem může být následná ukázka na obrázku 20. Jedná se o mikročip, kde se defekt projevuje teplotním rozdílem cca 1 mK. Pro porovnání je jako výchozí ukázán klasický termogram bez excitace.



Obr.20 Mikročip, klasický termogram, amplitudový obraz a komplexní obraz

Obdobný příklad je uveden i na obrázku 21. Při klasickém zobrazení není defekt viditelný, nicméně metodami aktiuvní termografie je snadno lokalizovatelný.



Obr.21 Lock in mikročip, detector 640x512 px, Mx1, velikost pixelu 15 μm

7. Závěr

Mikroskopické aplikace termografie nabízejí velmi široké pole využití, jak v oblasti výzkumu tak případných automatizovaných aplikací při výrobě. Jsou využitelné jak v režimu "pasivní termografie" tak v oblasti termografie "aktivní". Tento materiál neměl ambici být detailním a komplexním přehledem mikroskopických aplikací, ale náznakem možností této oblasti s popisem některých limitujících faktorů.

K této oblasti je zapotřebí přistupovat se znalostí problematiky konstrukce a vlastní jak termografických kamer, tak jejich optických systémů.

Autoři vycházeli při psaní tohoto materiálu jak ze svých vlastních praktických zkušeností, tak využili externí materiály o některých aplikacích. Nejlepším postupem je však vždy konzultace záměru a předpokládaných experimentů, případně praktické předvedení schopnosti uvažovaných systémů. Zkušenost autorů ukazuje, že někdy jsou deklarovány vlastnosti, které nejsou reálné a vedou ke zklamání konečného uživatele či nemožnosti provádět určité experiment s dostatečnou vypovídající schopností.

Literatura

- [1] Thermography on the Trail of the Fault, Brandenburg University of Technology Cottbus- Senftenberg (BTU); Institute for Electrical Systems & Energy Logistics, www.b-tu.de/fg-schaltungstechnik, prof. Dr.-Ing. Ralph Schacht
- [2] Fraunhofer Institute for Silicon Technology (ISIT), 25524 Itzehoe, www.isit.fraunhofer.de/ , Mr. Sebastian Puls
- [3] Thermal Micro Actuators for Nanotechnologies, Chemnitz University of Technology, Professorship of Microsystems and Biomedical Engineering, www.tu-chemnitz.de/etit/microsys/index.php ,Dr. Sebastian Voigt
- [4] Thermography in Electronics Development, Delphi Deutschland GmbH Test & Validation Services, www.delphi.com
- [5] Nickel-titanium Wires in Tension Test, Saarland University, Zentrum für Mechatronik u. Automatisierungstechnik, www.zema.de
- [6] Interní materiály InfraTec, www.infratec.de
- [7] Interní materiály TMV SS, www.tmvss.cz

DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTOROVÝCH PRŮCHODEK POMOCÍ NAPĚTÍ O SNÍŽENÉ FREKVENCI

DIAGNOSTICS OF TRANSFORMER BUSHINGS USING VOLTAGE WITH REDUCED FREQUENCY

Václav STRAKA, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ¹

Pavel ZÍTEK, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ²

Antonín KRŇOUL, "TMV SS" spol. s r.o., Praha ³

Anotace:

Transformátorové průchodky bývají považovány za jedno z kritických součástí výkonových transformátorů. Pravidelnou diagnostikou je možno detekovat defekty a tím i včas přijmout vhodná nápravná opatření. Jednou ze standardně používaných metod je měření kapacity a ztrátového činitele $\tan \delta$ (respektive jejich výpočet). Tyto metody jsou uvedeny jak ve standardech, tak referenční hodnoty jsou uváděny přímo výrobcí, včetně hodnot limitních. V poslední době je však možno tyto testy provádět i napětím o snížené frekvenci, což přináší nejen vyšší citlivost při detekci rozvíjejících se poruch tak do budoucna i snížené nároky na výkon testovacích přístrojů.

Annotation:

Transformer bushings are considered one of the critical components of power transformers. With regular diagnostics, it is possible to detect defects and thus take appropriate corrective measures in time. One of the standard methods used is the measurement of the capacity and the dissipation factor $\tan \delta$ (respectively their calculation). These methods are listed in the standards, and the reference values are given directly by the manufacturer, including limit values. Recently, however, it is possible to perform these tests with a voltage with reduced frequency, which brings not only higher sensitivity in the detection of developing faults, but also reduced demands on the performance of testing devices in the future.

1. Úvod

Jedním z nejdůležitějších prvků nadřazené elektrizační soustavy a rozvodných elektrických sítí je výkonový transformátor. Jeho funkcí je transformovat napětí na požadovanou hodnotu potřebnou k přenosu elektrického výkonu. Je tedy důležitým článkem spojení mezi výrobou a spotřebou elektrické energie.

¹ Ing. Václav Straka

"TMV SS" spol. s r.o.

Studánková 395, 149 00 Praha 4 - Újezd

tel.: +420 272 942 720, fax: +420 272 942 722, e-mail: vaclav.straka@tmvss.cz, <https://www.tmvss.cz/>

² Pavel Zítek

e-mail: pavel.zitek@tmvss.cz

³ Ing. Antonín Krňoul

e-mail: antonin.krňoul@tmvss.cz

Poruchou transformátoru může dojít k výpadku elektrické energie určité oblasti zahrnující osídlené aglomerace a průmyslové zóny. Přerušení dodávky elektrické energie způsobuje nemalé finanční ztráty nejen distribučním společnostem, ale také velkoodběratelům zastavením výrobního procesu. Proto je nutné předcházet takovýmto situacím pravidelnou kontrolou a údržbou transformátoru.

Frekvenční diagnostika transformátoru se jeví být vhodným prostředkem pro detekci různých vlivů a jevů v transformátoru.

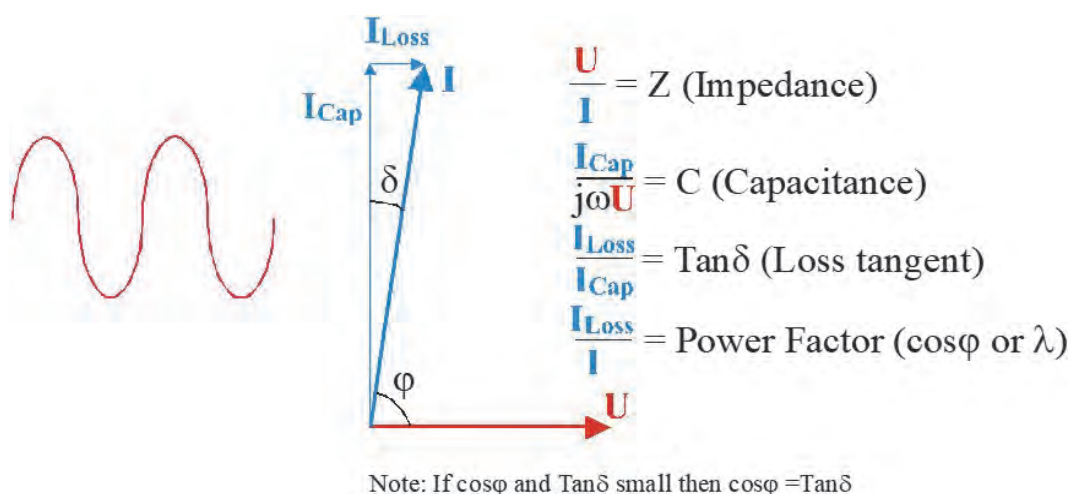
Nízkofrekvenční diagnostika (dielektrická spektroskopie ve frekvenční doméně) je metoda určená primárně pro detekci a měření vlhkosti přímo v papírové izolaci a papírových bariérách výkonových transformátorů bez ohledu na teplotu stroje či okolí.

Vysokofrekvenční diagnostika je určena na detekci mechanických změn v uspořádání transformátoru. Tato metoda je schopna postihnout změny jak v oblasti vinutí, tak i magnetického obvodu a připojení na přepínač odboček.

Tento materiál bude primárně diagnostice transformátorových průchodek napětím o snížené frekvenci a součástí budou též aplikační příklady.

2. Kapacita a ztrátový činitel $\tan \delta$

Kapacita a ztrátový činitel $\tan \delta$ jsou často používanými parametry užívanými pro hodnocení stavu izolačních systémů, nejen prvků výkonových transformátorů. Ačkoliv se často zmiňuje „měření“ těchto parametrů, jedná se o parametry vypočítané z komplexních hodnot napětí a proudu. Grafické zobrazení na obrázku 1.

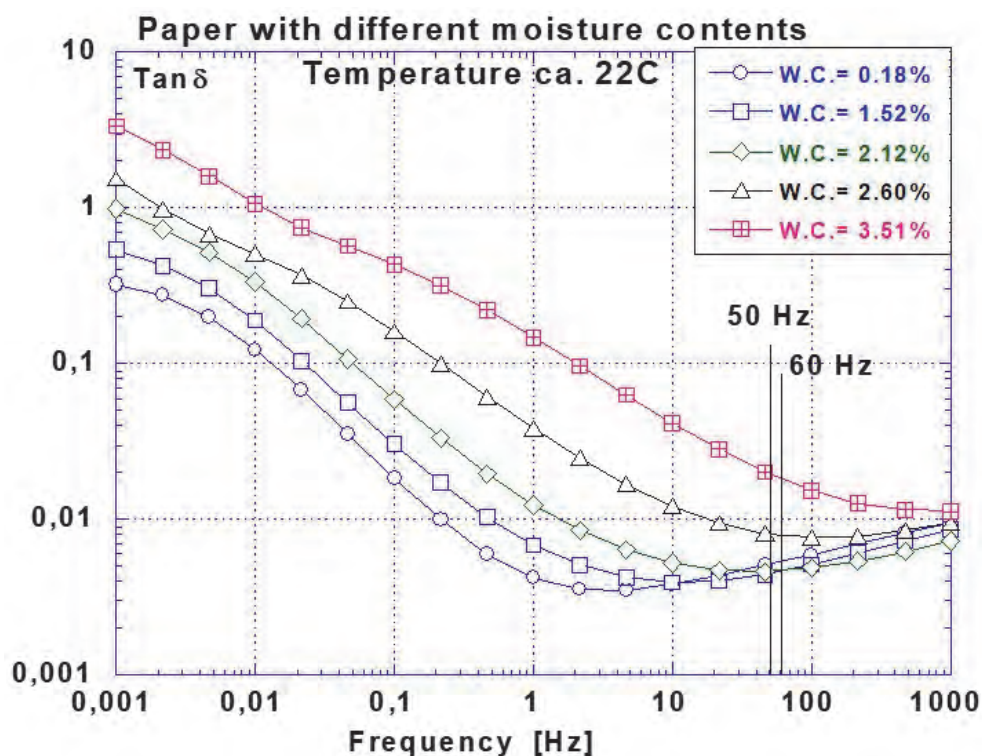


Obr.1 Výpočet kapacity a $\tan \delta$

Je též zobrazen způsob výpočtu tzv „power factor“. Jedná se o způsob výpočtu používaný hlavně na amerických kontinentech, nejedná se o jinou terminologii pro identický parametr, i když vypovídající hodnota je obdobná.

Při terénních měřeních se obvykle využívá měření při frekvenci blízké hodnotě síťové frekvenci, tedy 50 nebo 60 Hz. Je nutno říci, že limitní hodnoty jsou definovány při vztažené teplotě. Důvodem je teplotní závislost $\tan \delta$. Problematice teplotní závislosti a jejího využití bude dedikována separátní kapitola.

Pokud bychom se zaměřili na možnost diagnostiky snížených izolačních schopností prvku, mohli bychom je demonstrovat na obrázku 2

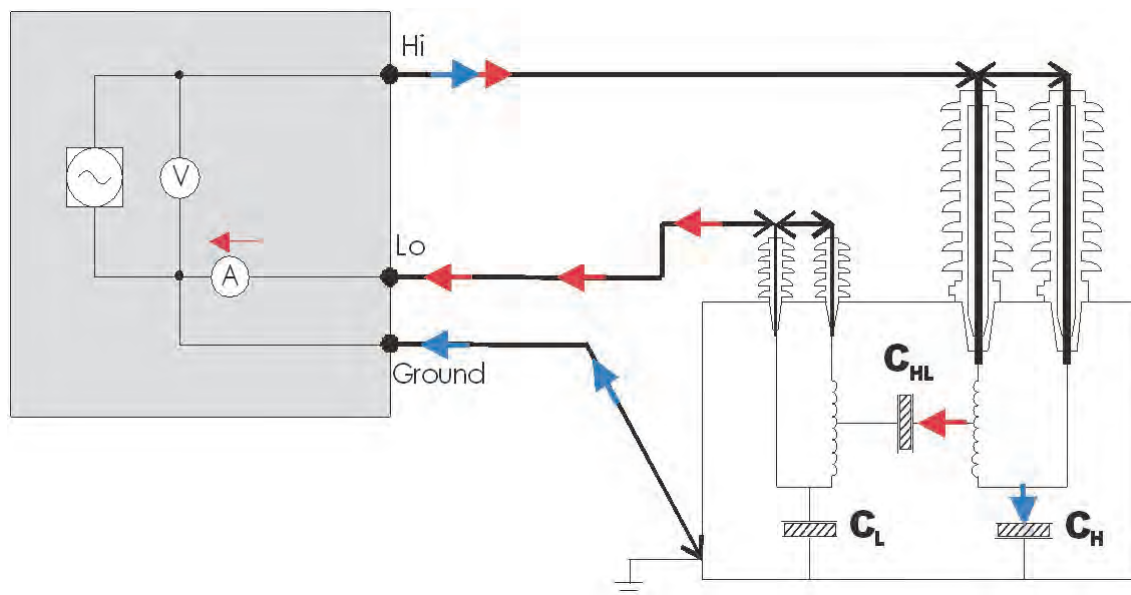


Obr.2 Závislost tg δ na obsahu vlhkosti

Na obrázku 2 je možno vidět závislost parametru tg δ na obsahu vlhkosti, a to v rozsahu až do 4% (hmotnostních). Grafická závislost je rozšířena i o frekvenční závislost tohoto parametru. Tato závislost bude využita v následující části materiálu.

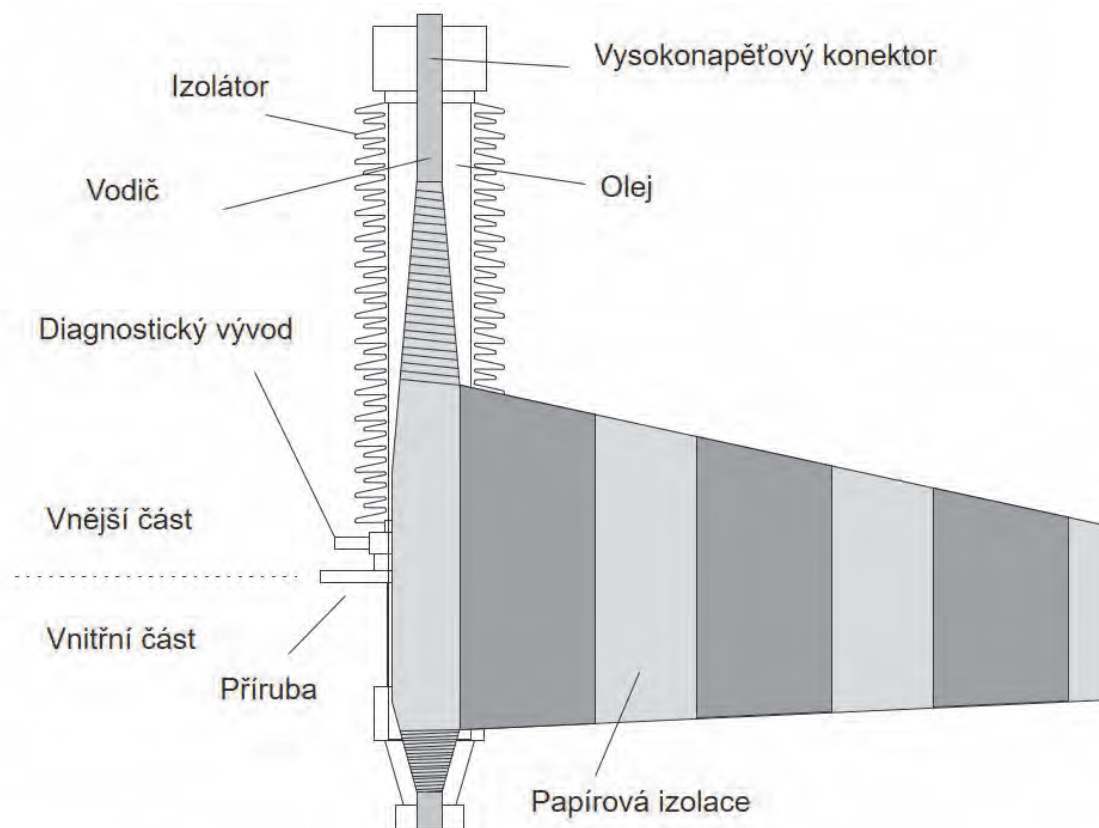
Vlastní měření je v rámci diagnostiky obvykle prováděno generováním vn napětí na příslušné frekvenci, přičemž je měřen svodový proud. Oba parametry jsou měřeny jako komplexní a následně je vypočtena kapacita a ztrátový činitel.

Způsoby zapojení jsou definovány standardy a obvykle jsou označovány jako zapojení GST nebo UST s dodatky guard, ground atd. Ve své podstatě se vždy jedná o měření parametrů kapacity, jak je zobrazeno na obrázku 3, včetně obvyklých zapojení. Jako příklad je naznačeno dvouvinuťové trafo, v případě transformátorů s vícero vinutími by došlo k navýšení počtu různých zapojení včetně separátního měření na průchodkách (pokud to průchodky konstrukčně umožňují).



Obr.3 Obvyklé zapojení testů

Pokud bychom se podívali na konstrukční uspořádání průchodky, mohli bychom jej zjednodušeně zobrazit jako na obrázku 4.



Obr.4 Příklad konstrukčního uspořádání průchodky

Průchodka, sloužící k bezpečnému prostupu napětí skrz stěnu na zemním potenciálu, může mít různé materiálové složení, nicméně principiálně se výrazně svojí funkcí neliší. Můžeme se setkat s například následujícími označeními:

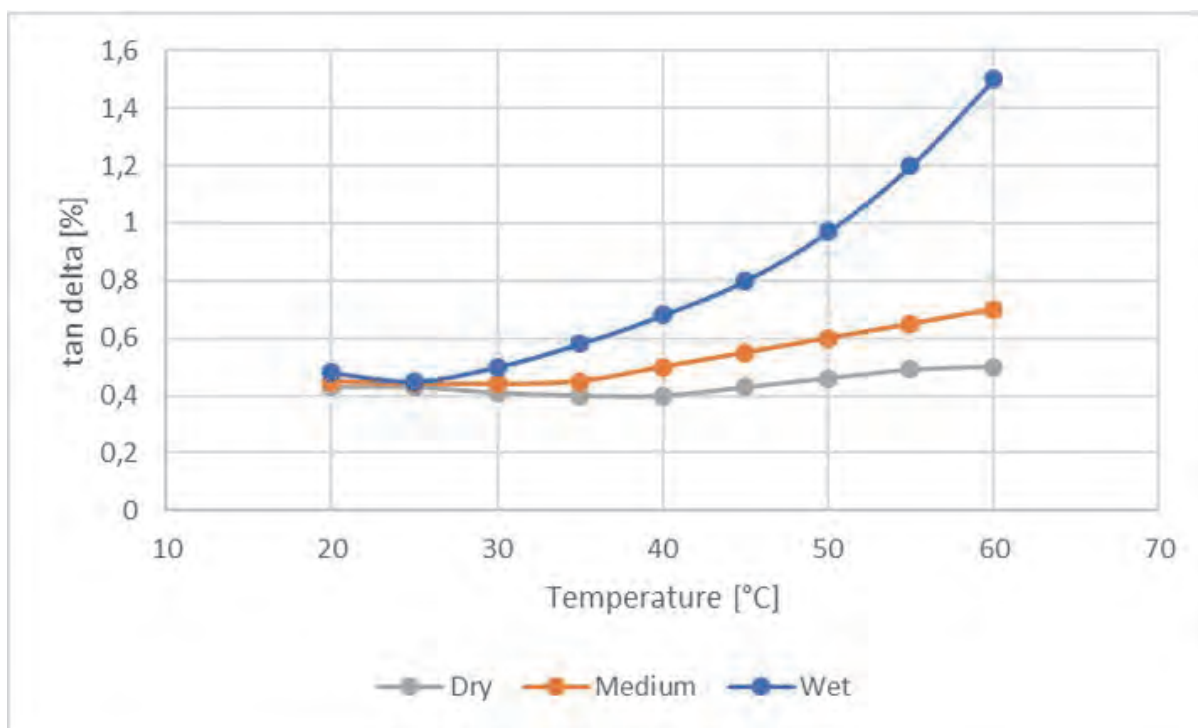
- RBP - Resin Bonded Paper
- OIP - Oil Impregnated Paper
- RIP - Resin Impregnated Paper
- RIS - Resin Impregnated Synthetic
- RIF® - Resin Impregnated Fiberglass

Výrobci nebo provozovatelé mají obvykle definovány limity pro kapacitu a tg, případně se odkazují na mezinárodní standardy IEC a IEEE, či materiály CIGRE (zdroje jsou uvedeny v rámci seznamu literatury).

Z hlediska diagnostiky je konstrukčně zásadní, zda-li má průchodka měřicí vývod (obvykle propojení s poslední vrstvou). Měřicí vývody nalezneme na absolutní většině zvn průchodek 420 a 220 kV), velké části vvn průchodek (110 kV) a v některých případech na vn průchodkách. V případě, že měřicí vývod není součástí průchodky, je zapotřebí měření průchodky nahradit měřením průchodky společně s příslušným vinutím.

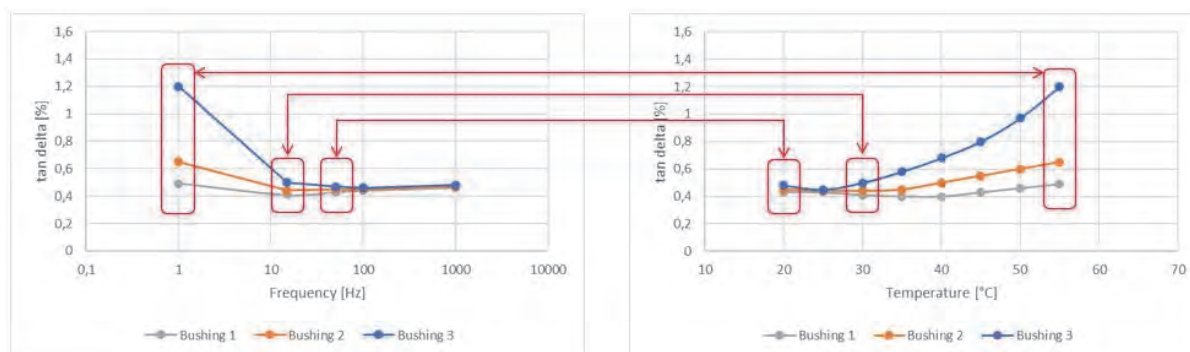
Měření by mělo být prováděno vždy při vztažné teplotě. V terénu toto není možno zaručit, v praxi jsou obvykle pro měření na odlišných teplotách využívány korekční faktory. Tento přístup je sice zavedený, nicméně je prokázáno, že korekční faktory definované standardy nejsou spolehlivým řešením vzhledem k individuální charakteristice průchodek, která se mění v průběhu životnosti. Jako jediné spolehlivé řešení se jeví použití metody individuálních korekčních faktorů, které jsou získány vždy před vlastním měřením a jsou tudíž vždy validní.

Důvodem pro měření při definované vztažné teplotě je teplotní závislost tg δ , která je zobrazena na obrázku 5. Uvedeny jsou jako příklady nenavlhlý izolační systém, středně navlhlý, a s navlhnutím odpovídajícím konci životnosti izolačního systému.



Obr.5 Teplotní závislost tg delta

Teplotní závislost je ve své podstatě možno považovat za převrácenou teplotní závislost. Pokud změnu teploty prvku nahradíme změnou frekvence, dostaneme identický charakter odezvy inverzního charakteru, jak je naznačeno na obrázku 6.



Obr.6 Vztah mezi teplotní a frekvenční závislostí

Tuto vlastnost je možno s úspěchem využít nejen pro teplotní korekci naměřených dat, ale i pro poměrně citlivou a jednoznačnou detekci zhoršujících se izolačních vlastností prvků, které se projevují na nižších frekvencích (nebo vyšších teplotách) mnohem výrazněji, než při vztažné teplotě a frekvencích blízkých síťové frekvenci.

Tento jev je již zohledněn například materiálech CIGRE - Cigre TB 445 NB DFR, a to také pro hodnoty se zvýšenou i sníženou frekvencí. Hodnoty jsou uvedeny na následujícím obrázku 7.

	RIP		OIP		RBP	
	Resin impregnated		Oil impregnated		Resin bonded paper	
Fraquency	new	aged	new	aged	new	aged
15Hz	<0.6%	<0.7%	<0.5%	<0.7%	<0.7%	<1.5%
50/60Hz	<0.5%	<0.5%	<0.4%	<0.5%	<0.6%	<1%
400Hz	<0.6%	<0.7%	<0.5%	<0.7%	<0.7%	<1.5%
at 20°C						

Table 40: Indicative DF/PF Limit Values for Condenser Bushings
(Source - “New Diagnostic for High Voltage Bushings”)

Obr.7 Referenční hodnoty Cigre TB 445 NB DFR

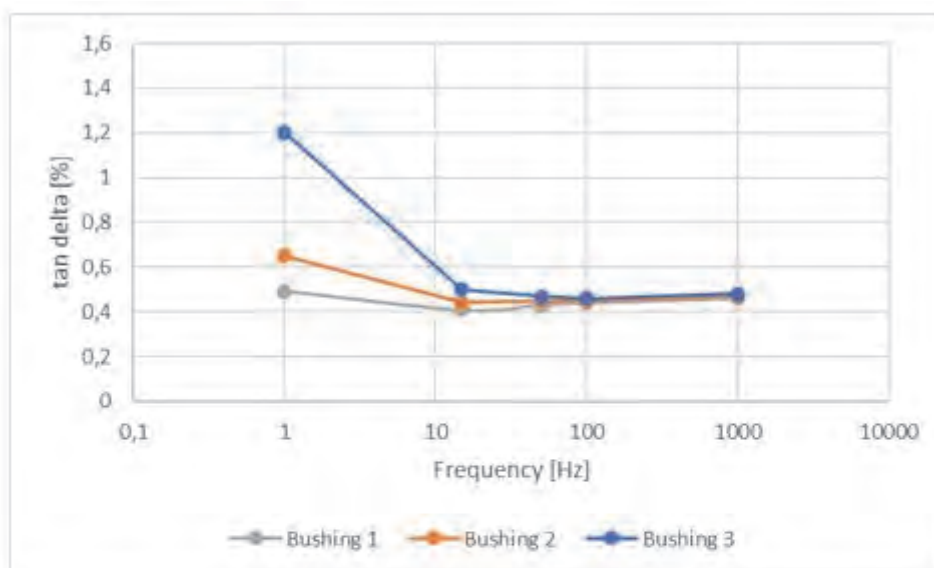
Jako snížená frekvence je uváděna hodnota 15 Hz, nicméně měření je možno i při frekvenci 1 Hz, jak je uvedeno na příkladu v následující tabulce na obrázku 8.

Analysis results		
%DF @ 50 Hz & 20°C	%DF @ 15 Hz & 20°C	%DF @ 1 Hz & 20°C
< 0,50 % OK	< 0,50 % OK	< 0,70 % OK
0,50 - 0,70 % Deteriorated	0,50 - 0,70 % Deteriorated	0,70 - 1,0 % Deteriorated
0,70 - 1,0 % Investigate	0,70 - 1,0 % Investigate	1,0 - 2,0 % Investigate
> 1,0 % Bad	> 1,0 % Bad	> 2,0 % Bad

Obr.8 IDAX 1 Hz - příklad limitních hodnot pro sníženou frekvenci

Pokud bychom porovnali vypovídající schopnost měření na nízké frekvenci 1 Hz s limity uvedenými v materiálu CIGRE, jsou rozdíly výrazně dynamičtější a lépe detekovatelné. Viz příklad na obrázku 9.

Jako příklad jsou uvedeny hodnoty pro 3 identické průchodky. Zatímco na frekvenci 50 Hz je možno hodnotit všechny 3 průchodky jako vyhovující se zcela minimálními rozdíly mezi hodnotami, při hodnotě 15 Hz je průchodka 3 hodnocena jako podezřelá, tak při hodnotě 1 Hz je průchodka č.3 zcela mimo akceptovatelné limity.

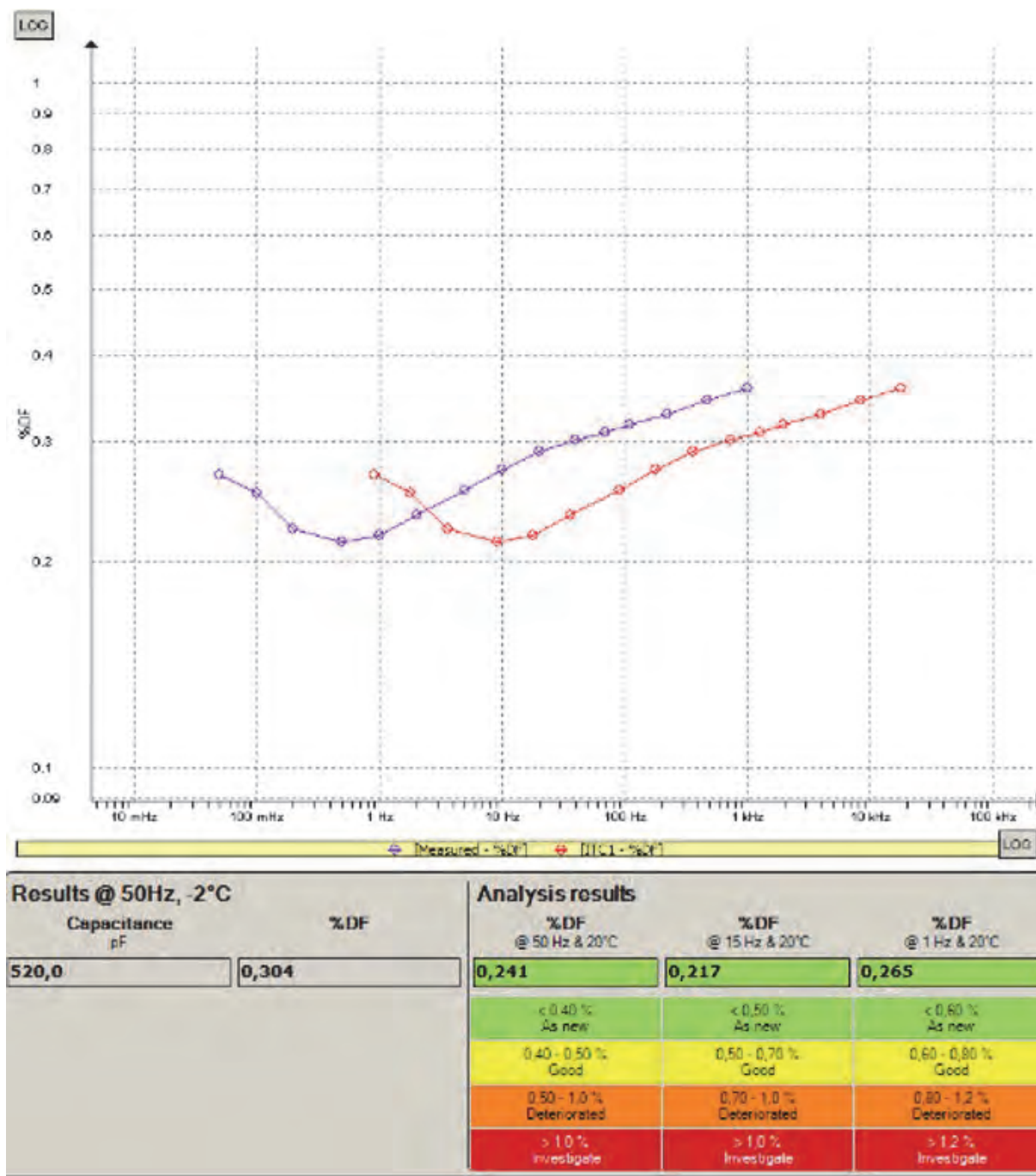


	%DF @ 50 Hz & 20 °C	%DF @ 15 Hz & 20 °C	%DF @ 1 Hz & 20 °C	Condition
Bushing 1	0,43	0,41	0,49	Dry
Bushing 2	0,45	0,44	0,65	Medium
Bushing 3	0,47	0,5	1,2	Wet

Obr.9 Porovnání 50, 15 a 1 Hz hodnot

I v případě, že by průchodky nebyly měřeny při vztažné teplotě, je možno výsledky, díky individuální teplotní korekci založené na frekvenční odezvě, možno správně korigovat, jako je uvedeno na obrázku 10. Pokud by byly použity korekční faktory uváděné ve standardech, mohlo by dojít k chybným závěrům. Obecně je možno hodnotit používání statických korekčních faktorů jako přežitě a zanášející nejistotu do korigovaných hodnot.

Fialová křivka zobrazuje naměřené hodnoty, zatímco červená teplotně kompenzované na základě frekvenční odezvy.



Obr.10 Teplotní kompenzace za použití frekvenční odezvy

3. Aplikační příklady

Jako první příklad můžeme využít zestárlou průchodka VVN. Je možno vidět, že zatímco frekvence 505 Hz nevykazuje odchylky v hodnotách, při hodnotě síťové frekvence je průchodka hodnocena jako podezřelá, tak při hodnotě testovacího napětí 1 Hz je průchodka hodnocena jako jednoznačně mimo akceptovatelné limity.

Tento případ je specifický v tom, že průchodky byly starší konstrukce a neobsahovaly měřicí vývody - proto byly měřeny současně s příslušným vinutím v dané fázi.

Bushing C1 Test										Test Mode:									
			60Hz											1Hz			505Hz		
Test No.	NB DFR	Dsg.	Test Mode	TEST kV	Capacitance		Equivalent @ 10 kV		POWER FACTOR %			Δ %PF @ 20°C	%VDF	POWER FACTOR %			POWER FACTOR %		
					C (pF)	Δ pF	mA	Watts	Measured	@ 20°C	IR			Measured	@ 20°C	IR	Measured	@ 20°C	
11	✖	H1	UST-R	10.0	265.5		1.00	0.0262	0.26	0.27	G			0.39	0.29	G	0.28	0.33	
12	✖	H2	UST-R	10.0	267.3		1.00	0.0282	0.28	0.29	G			0.64	0.40	G	0.31	0.35	
13	✖	H3	UST-R	10.0	266.5		1.00	0.1102	1.10	0.65	A			14.4	7.92	I	0.43	0.49	
14	✖	N/A	UST-R	10.0															
15	✖	H3	UST-R	10.0	231.9		0.87	0.0207	0.24	0.35	G			0.26	0.24	G	1.10	1.22	
16	✖	H3	UST-R	10.0	231.8		0.87	0.0193	0.22	0.22	G			0.24	0.22	G	0.28	0.31	

Obr.11 VVN průchodka data 1

Stav průchodek a jejich stářích je možno odvodit také z obrázku 12.



Obr.12 VVN průchodka

Jako další příklad je možno poukázat na obdobný případ vvn průchodek. Hodnoty jsou uvedeny na obrázku 13.

Connection Diagram			60Hz											1Hz		
Test No.	NB DFR	Dsg.	Test Mode	TEST kV	Capacitance		Equivalent @ 10 kV		POWER FACTOR %			Δ %PF @ 20°C	%VDF	POWER FACTOR %		
					C (pF)	Δ pF	mA	Watts	Measured	@ 20°C	IR			Measured		
11	✗	H1	UST-R	10.0	419.8	10.2	1.58	0.0977	0.62	0.52	G	0.00	0.05	0.37		
12	✗	H2	UST-R	10.0	423.4	10.6	1.60	0.0978	0.61	0.52	G	0.00	0.05	0.29		
13	✗	H3	UST-R	10.0	424.8	12.2	1.60	0.0968	0.61	0.52	G	0.00	0.05	0.31		
14	✗	X1	UST-R	10.0	262.4	2.6	0.99	0.0241	0.24	0.23	G	0.04	0.04	0.24		
15	✗	X2	UST-R	10.0	261.7	2.3	0.99	0.0246	0.25	0.24	G	0.02	0.04	0.27		
16	✗	X3	UST-R	10.0	260.9	3.1	0.98	0.0313	0.32	0.30	G	0.04	0.04	1.85		

Obr.13 VVN průchodka data 2

Ačkoliv hodnoty při síťové frekvenci jsou v akceptovatelných limitech, měření při 1 Hz signalizuje zásadní problém.

4. Závěr

Standardy poměrně dobře popisují metodiku měření při frekvenci napětí blízké frekvenci síťové, a pro tato měření jsou dlouhodobě uvedeny limitní hodnoty, jako mnohem výhodnější se jeví současné měření při frekvenci 1 Hz. Je pravdou, že se jedná o měření nad rámec standardního rozsahu, nicméně využívá identického zapojení, jako měření standardizovaná. Z hlediska časové náročnosti u průchodek dvouvinutového trafa můžeme počítat s prodloužením doby měření cca o 1 minutu. Tento časový nárůst je možno hodnotit jako zcela zanedbatelný. Na druhou stranu je vypovídající schopnost o stavu izolačního systému výrazně vyšší v porovnání se stávajícími postupy. Z hlediska nároků na přístrojové vybavení - obě měření, jak na frekvenci síťové, tak se sníženou frekvencí, je možno provádět jedním přístrojem, tudíž nevznikají nároky na nutnost investice do dvou sad přístrojového vybavení.

Na toto téma pořádali autoři webinář, který zahrnoval hlubší popis teoretického pozadí metod, stejně tak širší spektrum aplikačních případů. V případě zájmu je možno poskytnout záznam tohoto webináře.

Literatura

- [1] W. A2.34, "Guide for transformer maintenance," Cigre, 2011
- [2] IEEE C57.19.01-2017 - IEEE Standard for Performance Characteristics and Dimensions for Power Transformer and Reactor Bushings
- [3] IEC 60137:2017 - Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V
- [4] IEEE C57.152-2013 - IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors
- [5] IEEE C57.19.100-2012 - IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings
- [6] IEEE C57.12.90-2015 - IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers

- [7] Dr. P. Werelius, Dr. D. Robalino, J. Cheng and M. Ohlen, "Dielectric Frequency Response Measurements and Dissipation Factor Temperature Dependence," 2012
- [8] Dr. D. Robalino, "Accurate Temperature Correction of Dissipation Factor Data for Oil-Impregnated Paper Insulation Bushings: Field Experience," 2011

KVALITNÍ DIAGNOSTIKA JE ÚSPĚŠNÁ CESTA KE SNÍŽENÍ NÁKLADŮ ZA DRAHÉ ENERGIE

Štěpán SVOBODA, SpektraVision s.r.o., Nupaky ¹

Anotace:

V poslední době hýbe naši společnost několik zásadních témat, které se dotýkají nás všech. K nejcitlivějším patří neustálý růst i nestabilita cen energií, které jsou ovlivňovány jak „zelenou politikou“ EU, tak nestabilitou na trhu se zemním plynem i ropou v souvislosti s ruskou válečnou agresí na Ukrajině. Růst cen energií na úrovni spotřebitele nelze ovlivnit, ale ovlivnit lze náklady na ně, a to efektivní úsporou a vyhledáváním ztrát. Tento článek je právě zaměřen na efektivní diagnostické termokamery a přístroje, které pomáhají efektivně snižovat energetické ztráty v průmyslových provozech či umožňují detekci úniku stlačeného vzduchu a celé řady skleníkových plynů.

1. Úvod

V současnosti asi neexistuje 100% recept na rychlé řešení problémů spojených s růstem cen energií, nicméně kde panuje shoda oborů napříč je ve snižování energetické náročnosti, energetických ztrát a zamezení úniků skleníkových plynů. Ke snížení energetických ztrát a nákladů a ochraně klimatu lze jít mnoha cestami a budoucnost ukáže, které byly správné a které ne. Tento článek je právě zaměřen na efektivní diagnostické přístroje, které pomáhají efektivně snižovat energetické ztráty v průmyslových provozech či umožňují detekci úniku stlačeného vzduchu a celé řady skleníkových plynů.

2. Termokamery FLIR pomáhají ke snížení energetických ztrát

Efektivním a rychlým nástrojem pro snížení energetických ztrát v celé řadě průmyslových odvětví se dlouhodobě používají termokamery FLIR. Výrobce Teledyne FLIR (Švédsko, USA) je největší a nejstarší světový výrobce termokamer a dalších přístrojů, jehož historie sahá až do roku 1958 a díky vlastnímu vývoji a drtivě většině výroby vlastních komponent, nabízí bezkonkurenční kvalitu, nejmodernějších technologie a unikátní patentované měřicí funkce.

Bohužel, za poslední měsíce se na trhu objevily některé čínské výrobky, které se snaží napodobit termokamery FLIR jak designem (černá barva, uspořádání tlačítek atd.) tak i neoprávněně kopírovanými patentovanými funkcemi (např. prolnutí snímků MSX). Je však na zákazníkovi, zda se rozhodne za své peníze podpořit parazitování na designu a vývoji originálního výrobce a podstoupí možné riziko spojené s bezpečností dat i nejasné kvality a podpory od prodejce těchto čínských výrobků. Ale měl by rovněž zvážit, zda nákupem nepřispěje svými prostředky (vlastníkem je čínský komunistický stát) také k potlačování demokratických principů a lidských práv, a to nejen v Číně, ale vzhledem k vzájemné propojenosti i dalších autoritářských režimů (Rusko, Severní Korea atd.) i jinde ve světě.

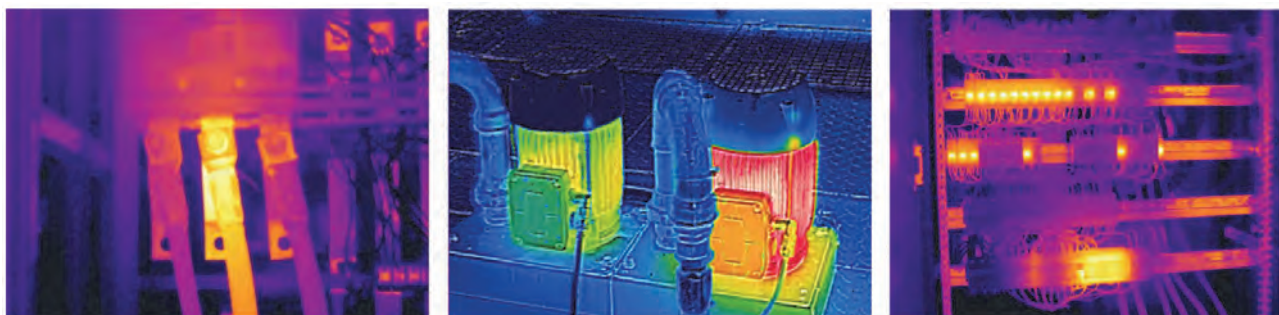
¹ Ing. Štěpán Svoboda
SpektraVision s.r.o.
Kruhová 128, 251 01 Nupaky
tel.: +420 312 310 258, mobil: +420 608 600 647, e-mail: stepan.svoboda@spektravision.cz

Při nákupu termokamery FLIR však obdrží zákazník kvalitní přístroj s jistotou, že mu výrobce Teledyne FLIR i jeho autorizovaný distributor bude dlouhodobě poskytovat servis, náhradní díly, plnou podporu a praxí prokázanou životnost.



Obr.1 Vybrané termokamery FLIR [1]

Termokamery FLIR nacházejí uplatnění zejména v odvětvích, jako jsou elektroenergetika (kontrola rozvodů, elektrických strojů a zařízení, FVE), strojírenství a mechanika (tepelné namáhání strojů a zařízení), výrobní procesy (kontrola a regulace teplot a zpracování materiálu), hutnictví (kontrola teploty taveniny) i stavebnictví (detekce tepelných mostů, vlhkostí atd.) a také detekci a zobrazení úniků celé řady plynů (včetně metanu a CO₂) a těkavých látek.



Obr.2 Příklady využití ručních termokamer v průmyslu [1]

Pravidelná či nepřetržitá kontrola termokamerami FLIR tak umožňuje včas odhalit problémová místa a snížit výdaje za energie, zabránit provozním ztrátám a materiálním škodám a zvýšit bezpečnost provozovaných zařízení.

3. Ruční a přenosné termokamery FLIR pro pochůzkovou kontrolu

Pro účely rychlé a spolehlivé diagnostiky prováděné ruční termokamerou jsou určeny termokamery FLIR Exx (E54, E76, E86 a E96), které disponují speciálními funkcemi usnadňující měření. Disponují rozlišením až 640 x 480 bodů, citlivostí až 0,03 °C, teplotním rozsahem až do +1500 °C, široké škále objektivů s automatickým ostřením nebo dálkoměrem pro přesné měření vzdálenosti či GPS pro uložení souřadnic místa měření. Termokamery FLIR Exx jsou vybavené přehledným 4" dotykovým displejem s českým menu a díky kompaktnímu a odolnému provedení, jsou ideálním diagnostickým nástrojem pro pochůzková měření a kontrolu elektrických rozvodů, strojů a zařízení či pro kontrolu teplot při výrobě.



Obr.3 Ruční termokamera FLIR E86 při kontrole rozváděče [1]

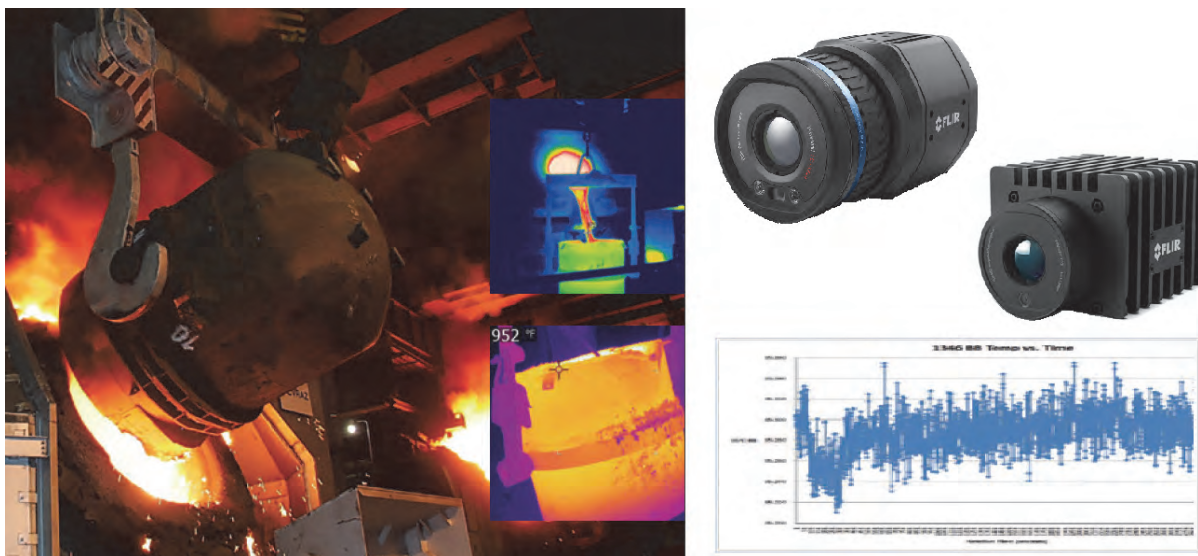
Pro profesionální měření v terénu jsou ideální přenosné termokamery FLIR T840 a T865 s rozlišením až 640 x 480 bodů (s UltraMax 1280 x 960 bodů) a citlivostí až 0,03 °C, které jsou vybaveny rovněž přehledným 4" dotykovým LCD s českým prostředím, ale také vysoce kontrastním hledáčkem umožňující venkovní měření při jakýchkoli světelných podmínkách. Doplnují oblíbené termokamery FLIR řady T530 a T540, které hledáček nemají. Nejvyšší řadu pak uzavírá špičková termokamera FLIR T1020 s rozlišením snímače 1024 x 768 bodů (s UltraMax 2048 x 1536 bodů), která je vhodná zejména pro energetické distribuční a přenosové společnosti při měření na velkou vzdálenost. Termokamery FLIR řady T mají otočnou snímací část v širokém úhlu usnadňující měření ze všech pozic i těžko přístupných objektů a jsou nejlepší volbou pro profesionální termodiagnostiku v elektroenergetice, průmyslu i stavebnictví.



Obr.4 Přenosná termokamera FLIR T865 při kontrole v rozvodně [1]

4. Stacionární termokamery FLIR = 24/7 kontrola teplot

Pro účely měření, kdy se vyžaduje trvalé měření, jak v rámci detekce zvýšené teploty osob, ale také pro kontrolu strojů, zařízení nebo výrobních procesů, jsou ideální stacionární termokamery FLIR řady A, které umožňují 24/7 provoz, on-line obraz a záznam povrchových teplot. Výhodou termokamer FLIR řady A je jejich kompaktní rozměr a univerzálnost použití.



Obr.5 Stacionární termokamery FLIR pro on-line kontrolu i záznam teplot [1]

Stacionární termokamery FLIR řady A nabízejí kompaktní rozměry, vysoké rozlišení až 640 x 480 bodů, možnost měření teplot až do +2000 °C a umožňují dálkový přístup díky běžným rozhraním a protokolům (RTSP, GigE, MODBUS TCP, Multicast, ONVIF-S a další). Díky tomu je možné jejich začlenění do nadstavbového (např. Genetec) či vlastního kamerového systému nebo postavit vlastní na komponentech FLIR. Termokamery FLIR řady A disponují rovněž vestavěným web rozhraním a jejich kompletní správa a provoz s přenosem obrazu může být přes standardní web prohlížeč v PC / tabletu bez dalšího SW. Termokamery FLIR mohou být vybaveny vizuální kamerou s funkcí prolnutí obrazů (MSX) a přenášet on-line jak IR tak vizuální obraz současně. Vestavěný WiFi vysílač navíc umožňuje přenášet obraz i ovládat termokamery bezdrátově, což je výhodné v případě dočasného použití v daném místě, kde není kabelový rozvod LAN. Vysoké krytí IP66 nabízí použití těchto termokamer ve venkovních či průmyslových náročných podmínkách pro zajištění spolehlivého provozu výrobních i skladovacích průmyslových objektů a také jako prvek spolehlivých protipožárních systémů.

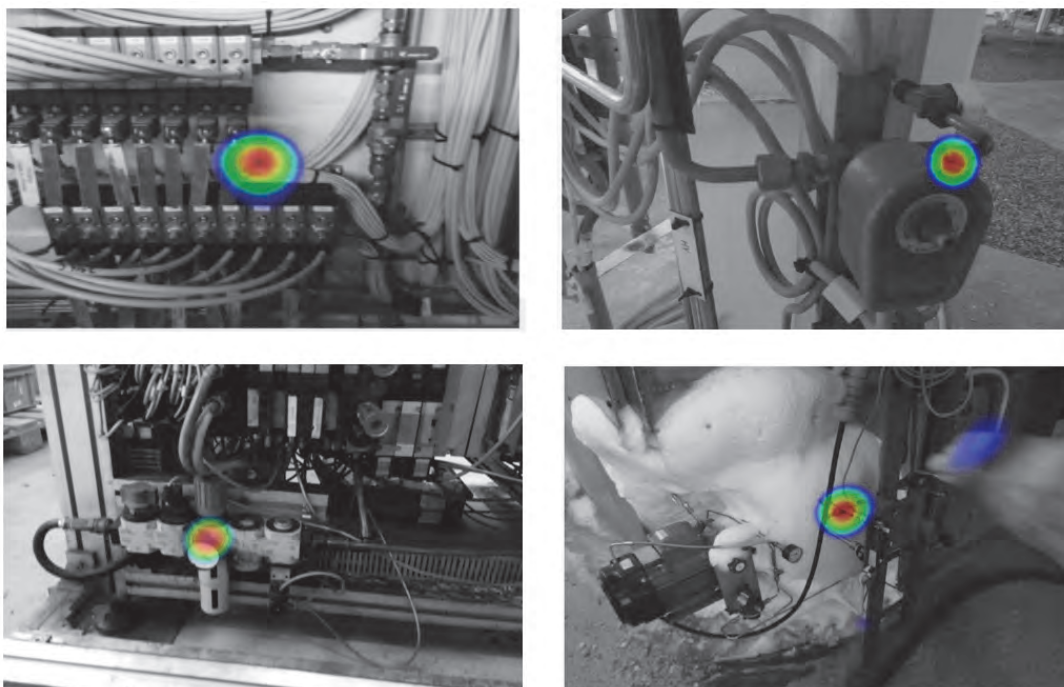
5. Únik stlačeného vzduchu = energetické ztráty

Dalším efektivním přístrojem pro snižování energetických ztrát je speciální akustická kamera FLIR Si124. Stlačený vzduch je vyráběn kompresory, které spotřebovávají stále dražší elektrickou energii. V případě úniků stlačeného vzduchu, který je používán v drtivé většině provozů, pak dochází k zbytečným nákladům. Kamera FLIR 124 využívá 124 vysoce citlivých vestavěných směrových mikrofونů s digitální kamerou s vysokým rozlišením, a to vše v kompaktním provedení s držením v jedné ruce, což zvyšuje bezpečnost a nezatěžuje obsluhu jako „dvojruční“ přístroje.



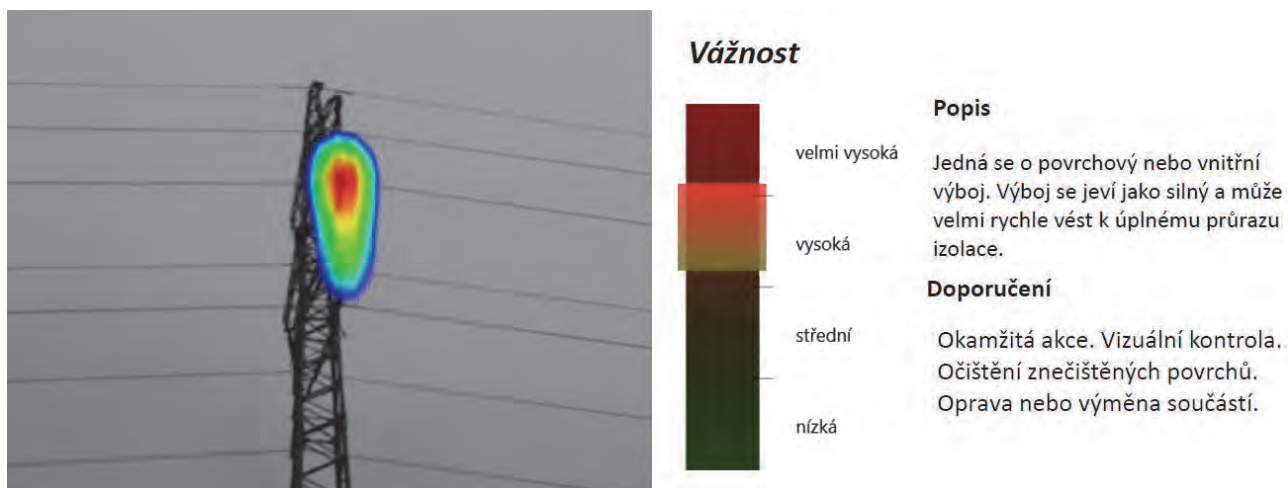
Obr.6 Akustická kamera FLIR Si124 FLIR při kontrole rozvodů stl. vzduchu [1]

Kamera umožňuje rychlou a snadnou lokalizaci úniků stlačeného vzduchu / plynů, které se při expanzi v místě úniku projevují turbulentním prouděním v ultrazvukových frekvencích, které nejsou lidským uchem zachytitelné. Pro akustickou kameru FLIR Si124 s rozsahem až do 65 kHz však ano a zobrazí dané místo s vysokou přesností. Kamera má české menu a umožňuje kvantifikovat velikost daného úniku jak v objemových jednotkách, tak také jako odhadované roční ztráty v dané měně. Zprávu z měření je možné provést v SW FLIR Thermal Studio (kompatibilní s termokamerami FLIR) s vyobrazením nalezených úniků a množstvím s přepočtem na roční náklady / ztráty. Záleží na velikosti nalezených úniků, ale z praxe víme, že návratnost tohoto unikátního zařízení je skutečně velmi rychlá.



Obr.7 Ukázka nalezeného úniku stlačeného vzduchu [1]

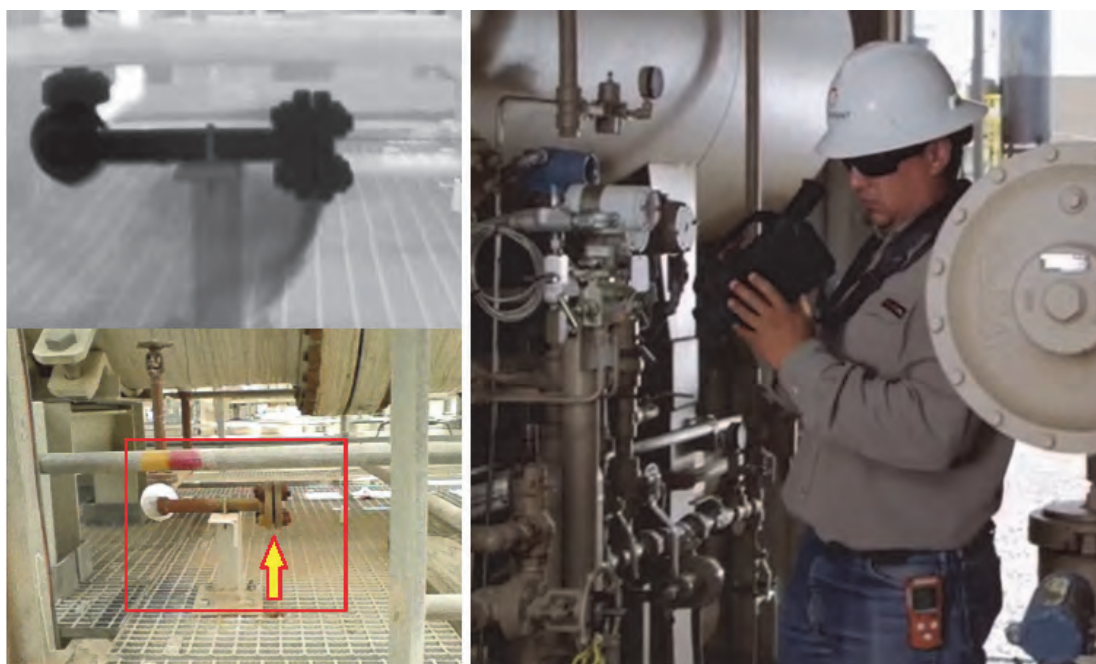
Akustická kamera FLIR Si124 má ještě další režim, a to vyhledávání částečných výbojů. Kamerou lze detekovat a vyhodnotit na vzdálenost různé typy částečných výbojů a stanovit tak potenciální nebezpečnost nalezeného jevu, který může vést až k porušení izolačních vlastností a následně k elektrickému výboji / zkratu.



Obr.8 Nález částečné výboje na izolátoru vedení 110 kV (zdroje rušení) a vyhodnocení v programu FLIR Thermal Studio [1]

6. Lokalizace a vizualizace úniku plynu = zvýšení bezpečnosti a snížení emisí

Normovanou a uznávanou metodou detekce a vizualizace úniku celé řady plynů a těkavých látek jsou speciální termokamery FLIR řady GF (OGI). Termokamery FLIR řady GF obsahují speciální technologii snímače, umožňující jak bezkontaktní měření teplot, tak také zobrazení celé řady plynů, včetně plynů z různých chemických / uhlovodíkových sloučenin a zobrazit tyto plyny jako mrak. Termokamery FLIR GF mají speciální režim, který zajišťuje zobrazení i velmi malých úniků a díky této schopnosti je možné nalézt a zobrazit přesné místo úniku, což napomáhá k rychlé opravě či výměně vadné části plynovodu / zařízení a snížení rizika.



Obr.9 Ukázka nálezu úniku plynu termokamerou FLIR GF320 / GFx320 [1]

Termokamery FLIR GF umožňují záznam ve formátu videa, které je právě důležité pro vizualizaci chování plynu a možností tvorby přehledné zprávy s popisem místa a stavu kontrolovaného objektu. Ve spolupráci se speciálním FW v kameře a externím kvantifikátorem QL320 umožňují některé typy termokamera FLIR GF i kvantifikaci úniků plynů v jednotkách g/h nebo l/min. Díky svým vlastnostem jsou tyto termokamery FLIR GF využívány celou řadou podniků z oblasti petrochemie a přepravy či skladování a distribuci zemního plynu.



Obr.10 Kvantifikace úniku zemního plynu termokamerou FLIR GFx320 a QL320 [1]

7. Závěr

Pravidelná kontrola strojů a zařízení termokamerami a přístroji FLIR napomáhá k odhalení opotřebení i ztrát energií. Termokamery i přístroje FLIR jsou celosvětově nejvíce rozšířeny nejen díky nejdelší historii výrobce, ale hlavně díky unikátním funkcím, vysoké kvalitě a odolnosti, která přináší uživatelům spokojenost a návratnost investice. Vysoká technická úroveň termokamer a přístrojů FLIR není ale vše, co je potřebné k dosažení kvalitních výsledků v diagnostice. Je to i kvalitní zaškolení a trvalá podpora uživatelů.

Literatura

[1] Obrázky Teledyne FLIR a SpektraVision s.r.o.

NORMATIVNÍ ÚPRAVA USTAVOVÁNÍ ROTAČNÍCH STROJŮ NA OBZORU?

SHAFT ALIGNMENT TECHNICAL STANDARD COMING?

Marek ŠEREMETA, LAMI KAPPA, spol. s r.o., Teplice ¹

Anotace:

Text je věnován technické normě ANSI/ASA S2.75-2017 - Part 1, která je platná v USA a určitým způsobem upravuje pravidla a postupy v oblasti ustavování rotačních strojů. Cílem článku je upozornit na některé zajímavé, podstatné a osvědčené postupy, nikoliv - vzhledem k jejímu rozsahu - detailně informovat o celém obsahu normy.

Annotation:

The article focuses on the technical standard ANSI/ASA S2.75-2017 - Part 1 approved in the USA that regulates to the certain extend the procedures related to the shaft alignment of the rotating machinery. The aim of the article is to highlight some interesting, important and proven practical steps, not to describe - due to its scope - the complete standard in detail.



AMERICAN NATIONAL STANDARD

Shaft Alignment Methodology, Part 1: General Principles, Methods, Practices, and Tolerances



Na rozdíl od vibrodiagnostiky, vyvažování, termodiagnostiky nebo tribodiagnostiky je zatím oblast ustavování/souososti rotačních strojů mimo pozornost normotvůrců. Literatura na toto téma existuje, výukové materiály také, stejně tak obecné doporučené tolerance pro ustavení rotačních strojů z dílny výrobců laserových přístrojů. Dokonce také

¹ Mgr. Marek Šeremeta
LAMI KAPPA, spol. s r.o.
Vladislavova 3142, 415 01 Teplice
tel.: +420 417 534 542, mobil: +420 602 624 925, e-mail: marek.seremeta@lamikappa.cz

některé výrobní firmy mají své vnitropodnikové předpisy věnované problematice ustavování. Avšak obecná evropská/česká technická norma věnovaná ustavování rotačních strojů zatím vytvořena nebyla.

Nicméně před několika lety byla v USA přijata norma ANSI/ASA S2.75-2017-Part 1, která se obecně věnuje právě problematice ustavování a může nám v Evropě sloužit jako zdroj inspirace pro řešení běžných problémů při ustavování, jako možnost porovnání našich a zámořských osvědčených postupů, případně jako potvrzení toho, že pracovníci údržby řeší tady i tam v oblasti souososti rotačních strojů podobné věci.

Poznámka:

Informace uvedené dále v tomto článku jsou čistě informativní, nekladou si nárok na úplnost a přesnost a jejich výběr je - vzhledem k rozsahu normy - subjektivním rozhodnutím autora. Níže uvedené postupy a doporučení nelze automaticky aplikovat na všechny případy ustavování, vždy se musí postupovat s přihlédnutím ke konkrétním okolnostem (bezpečnostním, technickým, časovým, finančním a dalším) a podle nejlepších dostupných technik.

1. Základní informace o normě ANSI/ASA S2.75-2017-Part 1

- vydána Acoustics Society of America (Committee S2 - Mechanical vibration and shock) prostřednictvím American Institute of Physics po schválení American National Standards Institute,
- z roku 2017,
- nezávazná (také v USA),
- nemá ekvivalent v ISO normách (alespoň zatím - viz dále),
- není k dispozici v českém jazyce,
- norma bere v úvahu ustavování nejen pomocí laserových systémů (nejrozšířenější), ale také jinými metodami (číselníkové indikátory, průměrná pravítka atd.).

2. Technická působnost normy

- norma se vztahuje na ustavování dvou horizontálních strojů s celkem 4 ložisky a dvěma rotujícími hřídeli,
- norma se nevztahuje na vertikální stroje, soustrojí 3 a více strojů, velké a hmotné stroje s významným průhybem hřídele, stroje s kardanem, stroje se třemi ložisky (diesel gensety), na stroje s tuhou spojkou a na ustavování otvorů,
- principy této normy mohou být (ve smyslu „dobrovolně“ a „možná“) použity i na výše uvedené konfigurace.

3. Obecná doporučení

- tam, kde to dává smysl, by mělo být měřeno:
 - a) rovinnost a vodorovnost základu/frémy,
 - b) házivost hřídele a spojky,
 - c) pnutí potrubí a kabelů,

- d) volná patka,
 - e) rozdíl vzájemné polohy os rotace hřídelů strojů v klidu a za provozních podmínek (offline to running machinery movement - OLTR),
 - f) souosost os rotací hřídelů strojů,
- doporučuje se ustavovat všechny rotační stroje,
 - stroje nově instalované stroje s výkonem přes 3,75 kW musí být odpovídajícím způsobem ustaveny,
 - po každém povolení kotevních šroubů by mělo být ustavení přeměřeno před spuštěním stroje,
 - při nadměrném opotřebení nebo vibracích stroje by nesouosost měla být zvažována jako příčina nebo jedna z příčin,
 - opotřebení nebo závady na stroji by měly být opraveny před jeho ustavováním,
 - vibrace přenášené na ustavovaný stroj mohou mít negativní vliv na měření.

4. Doporučení týkající se přímo měření

- ideálně by se mělo měřit s oběma hřídeli otočnými a rozpojenou spojkou. Jako druhé v pořadí preferencí jsou dva otočné hřídele se spojenou spojkou. Jako třetí v pořadí je jen jeden otočný hřídel. Jako nejméně žádoucí jsou oba hřídele neotočné,
- měření by mělo být opakovatelné. Opakovatelnost by měla být kontrolována u výchozího a koncového měření,
- u výchozího měření při větší nesouososti je žádoucí odchylka méně než 10%. Následující měření by měla mít opakovatelnost okolo 0,03 mm,
- během koncového měření by opakovatelnost měla být lepší než 0,03 mm,
- stroj a měřicí systém může během prvního měření vykazovat určitou hysterezi. Proto se doporučuje nebrat první měření v úvahu,
- spojení hřídelů při velké nesouososti může způsobit jinou než správnou pozici hřídele v (kluzném) ložisku nebo ohnutí hřídele (u valivých ložisek) nebo nežádoucí axiální pohyb hřídele(ů).

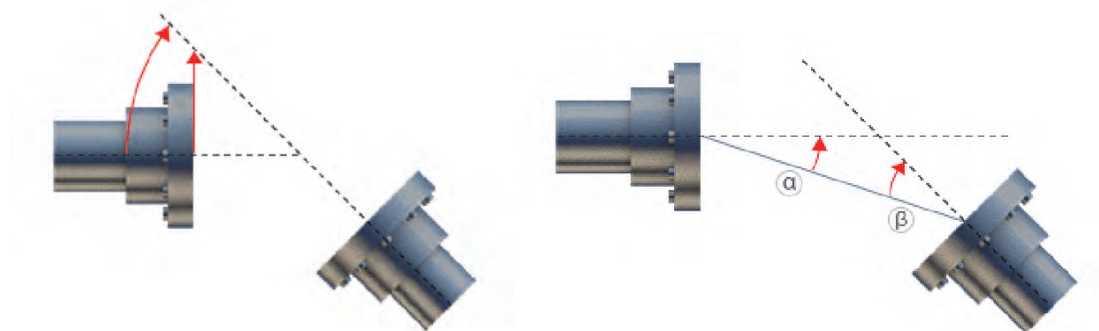
5. Doporučení týkající se pohybu se strojem při nastavování požadované souososti

- velikost plochy použitých podložek by neměla být menší než je 80% plochy patky, pod kterou mají být umístěny,
- pod patku by se nemělo vkládat více než 5 podložek (bez započtení podložek pro korekci volné patky). Ne více než jedna z těchto podložek by měla být tenčí než 0,08 mm. Součet tloušťky tří nejtenčích podložek by měl být minimálně 0,25 mm,
- test na volnou patku by měl být proveden na začátku a také na konci ustavování. Tolerance pro volnou patku je 50 μ m (tedy 0,05 mm),
- doporučená praxe při utahování kotevních šroubů je sledovat, zda-li má utahování vliv na polohu hřídele,
- pokud ano, tak se má utahovat vždy ve stejném pořadí, stejnou osobou, křížem, se stejnou silou,

- tam kde je specifikován určitý moment, tak se má utahovat na tento moment,
- omezení pohybu stroje na kotevních šroubech nebo na základu - preferovaným řešením je pohyb obou strojů,
- pouze pokud pohybem žádným strojem nelze vyřešit, tak by se mělo přistoupit na zvětšení děr, podtočení šroubů, úpravy frémy apod.,
- provádění a měření pohybu strojem - zvedací anebo odtlačné šrouby jsou možné. Pro měření pohybu lze použít číselníkové indikátory nebo laserový systém,
- odtlačné šrouby by měly být po utažení kotevních šroubů povoleny,
- axiální mezera na spojce - musí být nastavena podle pokynů výrobce spojky a výrobce stroje podle toho, co je více limitující,
- správná velikost axiální mezery má být ověřena na konci ustavování.

6. Tolerance pro ustavení

- tolerance pro ustavení - jsou zpracovány pro krátkou pružnou spojku ve formátu radiál/úhel a pro vloženou hřídel ve formátu úhel A/B,



- tolerance jsou definovány ve třech stupních kvality (minimální, standardní, přesné),
- při posuzování ustavení podle tolerancí musí být vzat v úvahu případný vzájemný pohyb strojů za klidu vs za provozu (OLTR hodnoty).

7. Dokumentace ustavení

Dokumentace - konečný stav by měl být dokumentován ve formě trvalého záznamu (protokolu), který by měl obsahovat (tam, kde je to přiměřené) následující údaje:

- a) identifikaci stroje a místa
- b) datum
- c) přístroj a metodu použitou při ustavování
- d) osobu, která ustavení provedla
- e) požadované tolerance
- f) OLTR data
- g) rovinnost a vodorovnost základu / frémy
- h) házivost hřídele anebo spojky

- i) pnutí potrubí / kabelu / stroje
- j) výsledky měření volné patky
- k) výchozí (ne)ustavení
- l) konečné ustavení
- m) konečnou axiální mezeru
- n) údaje z vizuální prohlídky stroje
- o) prohlášení o souladu s touto normou

8. Vybavení používané pro ustavování

- u číselníkových úchylkoměrů, spároměrek a průměrných pravítek nemusí být pravidelně kontrolována jejich přesnost. Úchylkoměry by nicméně měly pracovat volně,
- mikrometry a odpichy vyžadují pravidelnou kontrolu,
- lasery, elektronické a optické systémy musí být periodicky ověřovány vůči referenčnímu standardu podle doporučení výrobce.

9. Doplnující informace

- normu ANSI/ASA S2.75-2017-Part 1 lze zakoupit přes internet,
- aktuální cena činí 150,00 USD, tzn. cca 3.750,00 Kč,
- norma nesmí být reprodukována bez předchozího písemného souhlasu vydavatele,
- norma ANSI/ASA S2.75-2017-Part 1 byla revidována v roce 2020,
- existují také Část 2 (Part 2) této normy - Terminologie ustavování (anglická) z roku 2017 (revize 2020) a Část 3 (Part 3) - Ustavování vertikálních strojů z roku 2021 (publikováno 2022).

10. Závěr

Jak bylo řečeno v úvodu tohoto článku, tak norma ANSI/ASA S2.75-2017-Part 1 je nezávazná i v zemi svého původu a tedy pro nás v Evropě může sloužit jen jako čistě informativní zdroj. Nicméně podle kuloárně dostupných a neověřených informací se zvažuje její transpozice v určitém rozsahu do oblasti ISO norem. Předpokládaný časový horizont je v řádu několika let.

Literatura

- [1] Norma ANSI/ASA S2.75-2017-Part 1 (2017), originální znění v anglickém jazyce
- [2] Materiály LAMI KAPPA

TERMOGRAFIE V DIAGNOSTICE A ÚDRŽBĚ ZAŘÍZENÍ V ENERGETICKÉM PRŮMYSLU

Michal ŠVANTNER, Západočeská univerzita v Plzni, NTC ¹

Milan HONNER, Západočeská univerzita v Plzni, NTC ²

Anotace:

Termografie je metoda s velkým potenciálem pro diagnostiku, údržbu, monitoring nebo nedestruktivní testování energetických zařízení. K jejím hlavním přednostem patří její bezkontaktní a nedestruktivní charakter, možnost plošného testování a možnost kontroly nepřístupných nebo pohyblivých součástí. Příspěvek vychází z dlouholetých zkušeností a spoluprací pracoviště ZČU-NTC s partnery v energetickém průmyslu a zabývá se možnostmi termografických metod pro různé aplikace, např. diagnostika rotorů přečerpávacích elektráren, využití termografie pro testy únavových vlastností, zjišťování korozního poškození potrubních systémů v elektrárnách, prediktivní diagnostika poškození cyklicky namáhaných součástí nebo diagnostika v solárních technologiích. V příspěvku jsou představeny aplikace, termografické metody i potenciál pro jejich budoucí využití.

¹ Ing. Michal Švantner, Ph.D.

Západočeská univerzita v Plzni, Nové technologie - výzkumné centrum
Univerzitní 8, 301 00 Plzeň

tel.: +420 377 634 721, mobil: +420 737 914 978, e-mail: msvantne@ntc.zcu.cz, <https://irt.zcu.cz/cs/>

² prof. Ing. Milan Honner, Ph.D.

tel.: +420 377 634 720, mobil: +420 606 522 406, e-mail: honner@ntc.zcu.cz

ZDROJE VIBRACÍ PŘEVODOVKY LYŽAŘSKÉHO VLEKU

VIBRATION SOURCES OF THE SKI LIFT GEARBOX

Elias TOMEH, Technická univerzita v Liberci, FS ¹

Anotace:

Článek popisuje výsledky spojené s aplikací vibrační diagnostiky na převodové ústrojí lyžařského vleku. Zahrnuje měření a analýzu frekvenčních spekter vibrací. K posouzení technického stavu převodovky lyžařského vleku byly použity metody vibrodiagnostiky a optického zhodnocení poškození součástí.

Jedná se o moderní způsob identifikace kvality provozně technického stavu, spolehlivosti a životnosti součástí převodovky (např. rotorů, ozubených kol, ložisek), aby nedošlo k případné havárii lyžařského vleku.

Annotation:

The article describes the results associated with the application of vibration diagnostics on the transmission gear of a ski lift. It includes the measurement and analysis of vibration frequency spectra. The methods of vibrodiagnostics and optical evaluation of component damage were used to assess the technical condition of the ski lift gearbox.

This is a modern way of identify the quality of the operational technical condition, reliability and service life of gearbox components (e.g. rotors, gears, bearings) to avoid a possible accident of the ski lift.

1. Úvod

Provoz všech rotačních strojů je provázen vibrací. Na základě analýzy vibračních spekter lze získat cenné informace o provozním stavu převodovky lyžařského vleku. Také je kladen nejvýznamnější důraz na jakost, spolehlivost a životnosti jednotlivých součástí převodovky lyžařského vleku.

Převodovka je vyrobená fy.Leitner, s převodovým poměrem 1:131. Rok výroby 1989. Elektromotor pohonu sedačkové lanovky je tři fázový elektromotor o příkonu 200 kW, osazeném ložisky 6319 na volném konci a NU319 na hnacím konci rotoru. Na obr.1 je znázorněna část pro pohon lanovky a lanovnice lanové dráhy. Pro měření vibrací převodového soustrojí lanovky byl použit jednokanálový analyzátor vibrací a snímač zrychlení, který byl upevněn na vybraných měřicích místech převodovky magnetem, a to jak v horizontálním, tak ve vertikálním směru.

Pro hodnocení vibrací byla použita frekvenční analýza, obálková analýza (ENV) a metoda Spectral Emission Energy (SEE) pro každý měřicí místo. Na obr.2 jsou místa měření vibračních spekter převodového soustrojí lanovky. Přehled osazení převodovky, typy valivých ložisek a počty zubů ozubených kol jsou znázorněny také na obr.2.

¹ doc. Dr. Ing. Elias Tomeh

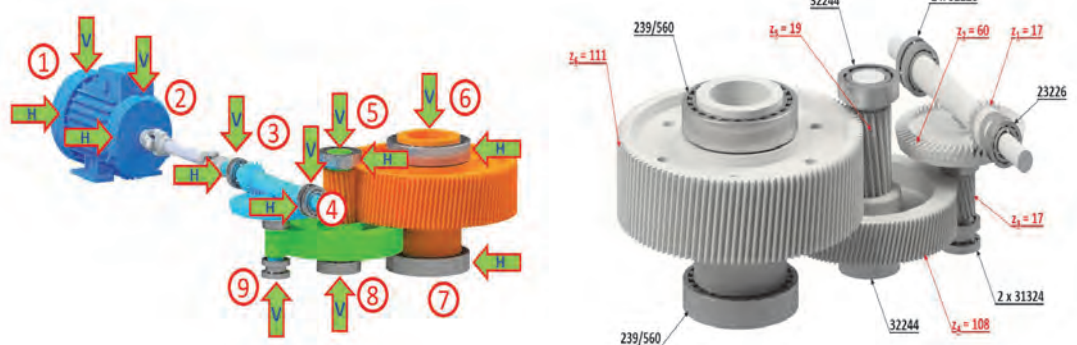
Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů

Studentská 2, 460 17 Liberec 1

tel.: +420 485 353 439, mobil: +420 603 938 429, e-mail: elias.tomeh@tul.cz



Obr.1 Část pro pohon lanovky a lanovnice lanové dráhy



Obr.2 Místa měření vibračních spekter převodového soustrojí lanovky, typy valivých ložisek a počtu zubů ozubených kol převodovky

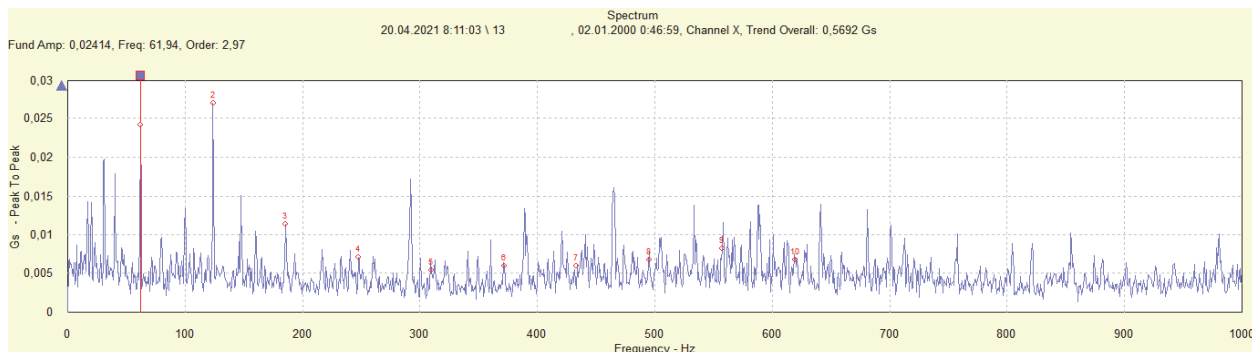
2. Výsledky měření

V tab.1. jsou výsledky výpočtů frekvencí hlavních zdrojů buzení převodového soustrojí lanovky fy. Leitner.

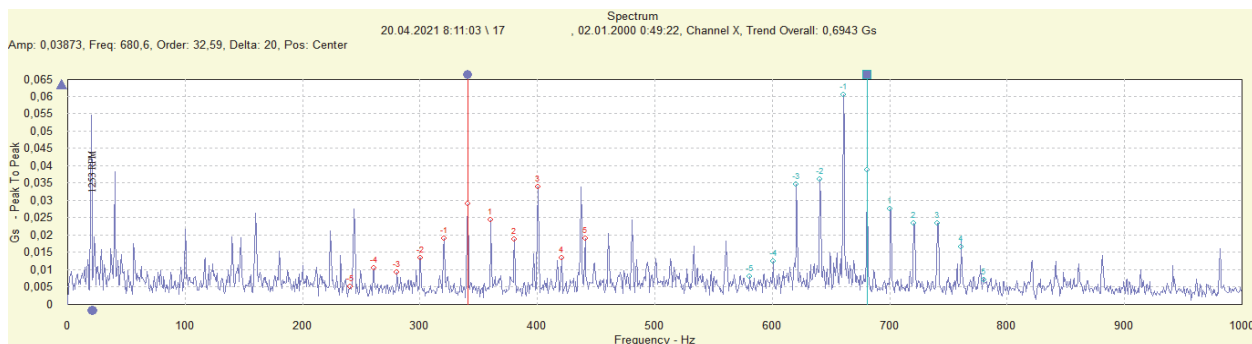
Tab.1 Výpočet frekvencí hlavních zdrojů buzení převodového soustrojí lanovky

Rotorová frekvence		Zubová frekvence		RPM 1202
f_{R1} [Hz]	20,0	f_{z1} [Hz]	340	
f_{R2} [Hz]	5,67	f_{z2} [Hz]	96,4	
f_{R3} [Hz]	0,89	f_{z3} [Hz]	16,9	
f_{R4} [Hz]	0,15			
Ložisko	f_i [Hz]	f_o [Hz]	f_{vt} [Hz]	f_k [Hz]
23226	215,8	164,7	142,7	8,7
32228	227,4	172,6	137,6	8,6
32244	9,0	6,8	6,1	0,4
239/560	2,7	3,1	2,2	0,07
31324	52,5	38,1	30,5	2,4

Na základě vypočítané frekvencí hlavních zdrojů buzení lanovky (viz tab.1) jsou na základě naměřených spekter vibrací identifikovány a vyhodnocovány poškození jednotlivých částí lanovky. Některá vybraná spektra jsou znázorněná na obr.3 až obr.12.



Obr.3 Spektrum ENV převodovky v místě 1V bez zatížení. Začátek poškození vnějšího kroužku ložiska 6319C3. Doporučuji opakovat měření před sezonou.



Obr.4 Spektrum ENV převodovky v místě 3V bez zatížení. Potvrzení vzniku modulace kolem první a druhé harmonické složky zubové frekvence $f_{z1} = 340$ Hz s více stupňovou modulací s rozdílem $f_{R1} = 20$ Hz. Značné opotřebení soukolí K1-K2. Postranní složky ke složkám o záběrových frekvencích jako důsledek proměnlivého zatížení nebo otáček.

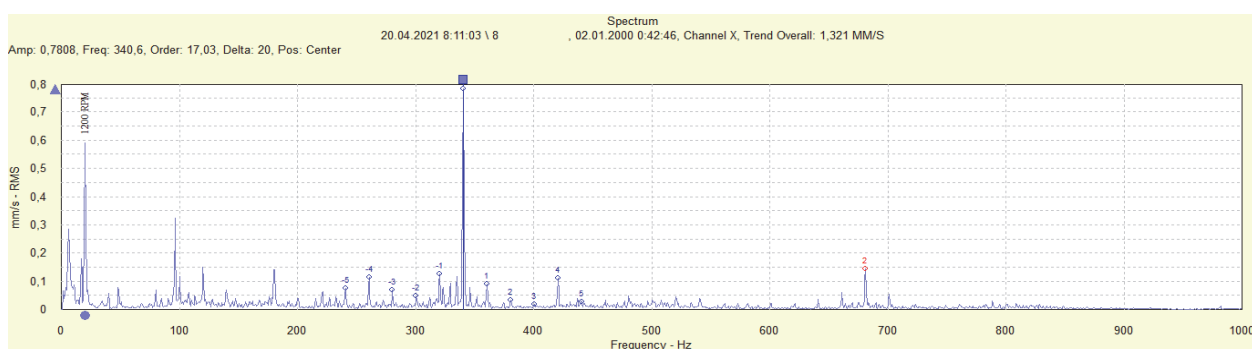
3. Optické hodnocení stavu součástí

Stav ozubení a dostupných součástí byl zdokumentován a zhodnocen. Byly pořízeny fotografie jak v normálním měřítku, tak makroskopické fotografie dokumentující povrch.

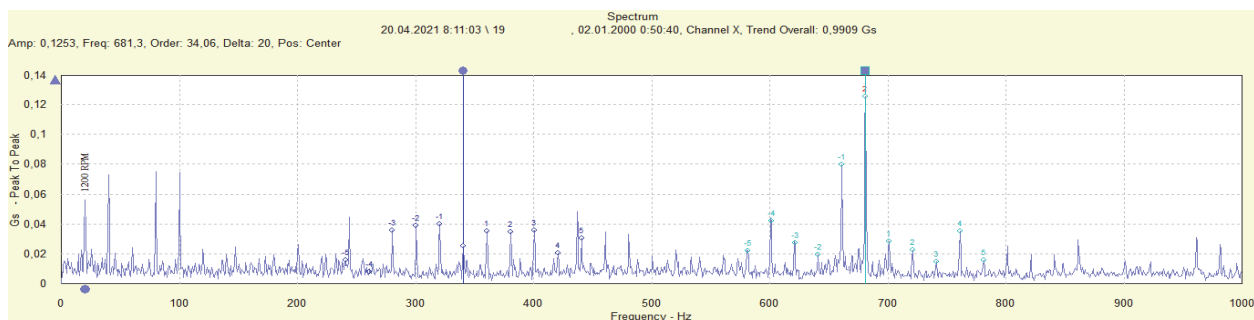


Obr.5 Poškození talířového kola - makrofotografie.

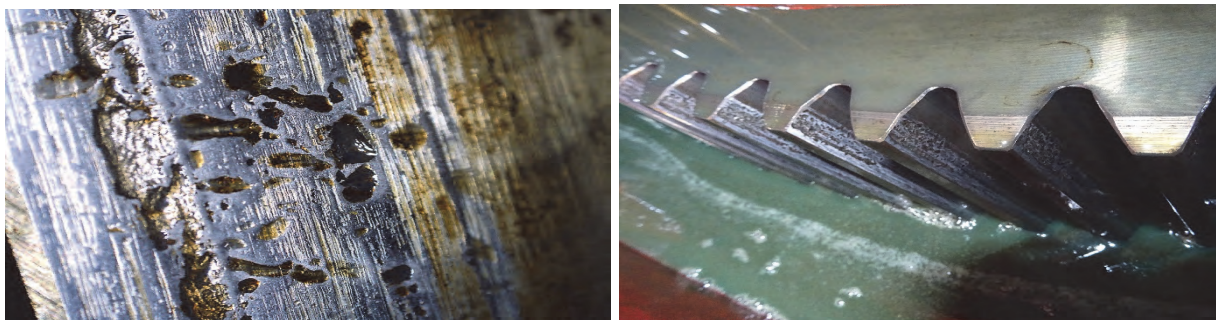
Jedná se o pastorek a talířové kolo, převod na vstupu převodovky. Celkový pohled na převod je zachycen na obr.5. Na ozubení kuželového převodu je patrné značné opotřebení únavou cyklickým zatěžováním povrchu, v jehož důsledku dochází k odlupování vrchních vrstev materiálu boků zubů a dochází ke vzniku důlků- pittingu. Stav boků zubů talířového kola je zachycen na obr.5, poškození je velmi dobře patrné i bez zvětšení. V důsledku vzniku důlků a nerovností povrchů vznikají vruby, v nichž může dojít k nukleaci trhlin. Trhliny se mohou dále šířit do materiálu zubů, až do chvíle kdy dojde k jeho ulomení. Makrofotografie únavového opotřebení povrchu zubů jsou na obr.5, dobře patrný je typický lom po odtržení povrchové vrstvy materiálu.



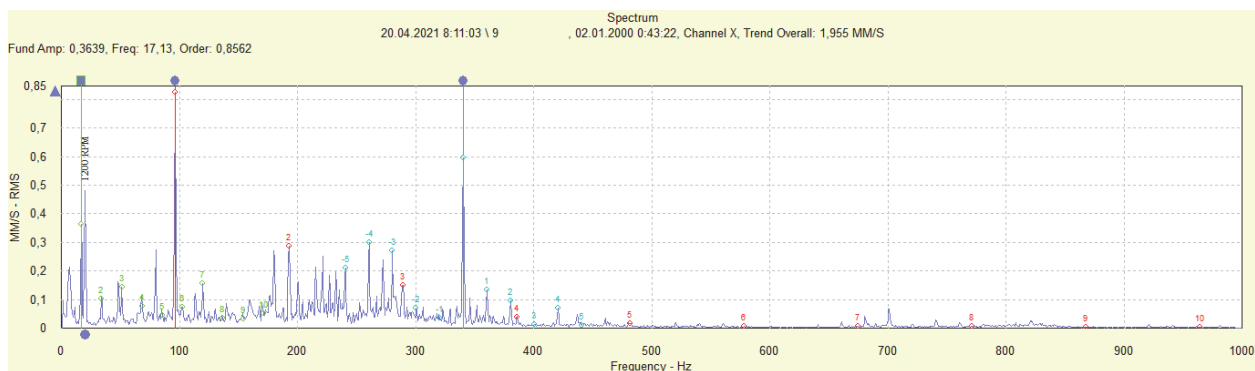
Obr.6 Spektrum rychlosti vibrací převodovky v místě 4H bez zatížení. Vznik harmonických složek zubové frekvence $f_{z1} = 340$ Hz a kolem ní modulace s více stupňovou modulací s rozdílem $f_{R1} = 20$ Hz. Značné opotřebení soukolí K3-K4 a vyšší stadia únava materiálu.



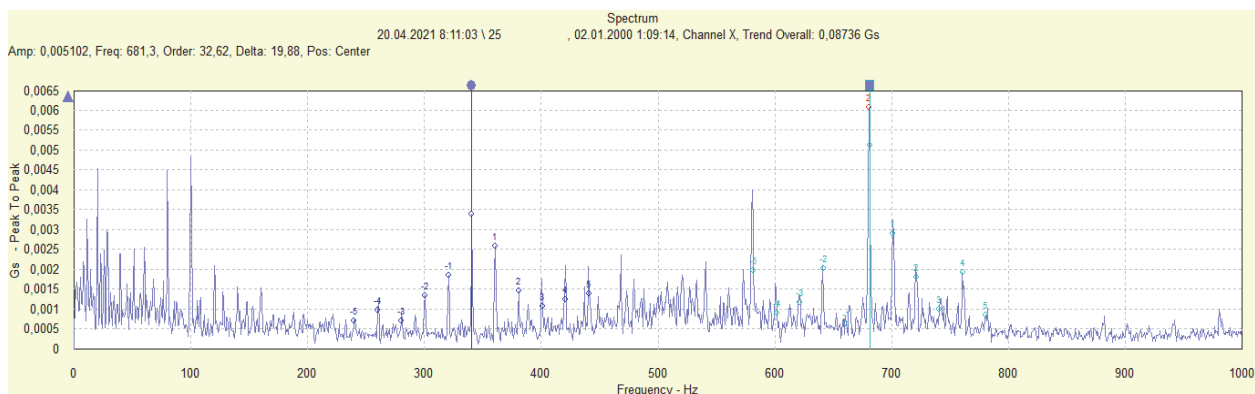
Obr.7 Spektrum ENV převodovky v místě 4V bez zatížení. Potvrzení vzniku modulace kolem první a druhé harmonické složky zubové frekvence $f_{z1} = 340$ Hz s více stupňovou modulací s rozdílem $f_{R1} = 20$ Hz. Druhá harmonická složka zubové frekvence je výrazně velká, což svědčí o další závadě týkající se nesouososti soukolí. Ve spektru vibrací došlo ke zvýšení harmonických složek záběrové zubové frekvence, tj. znak opotřebení boků zubů. Potvrzené opotřebení soukolí a vyšší stadia únava materiálu soukolí K3-K4 metodou obálkové analýzy. Postranní složky ke složkám záběrových frekvencí jako důsledek proměnlivého zatížení nebo otáček.



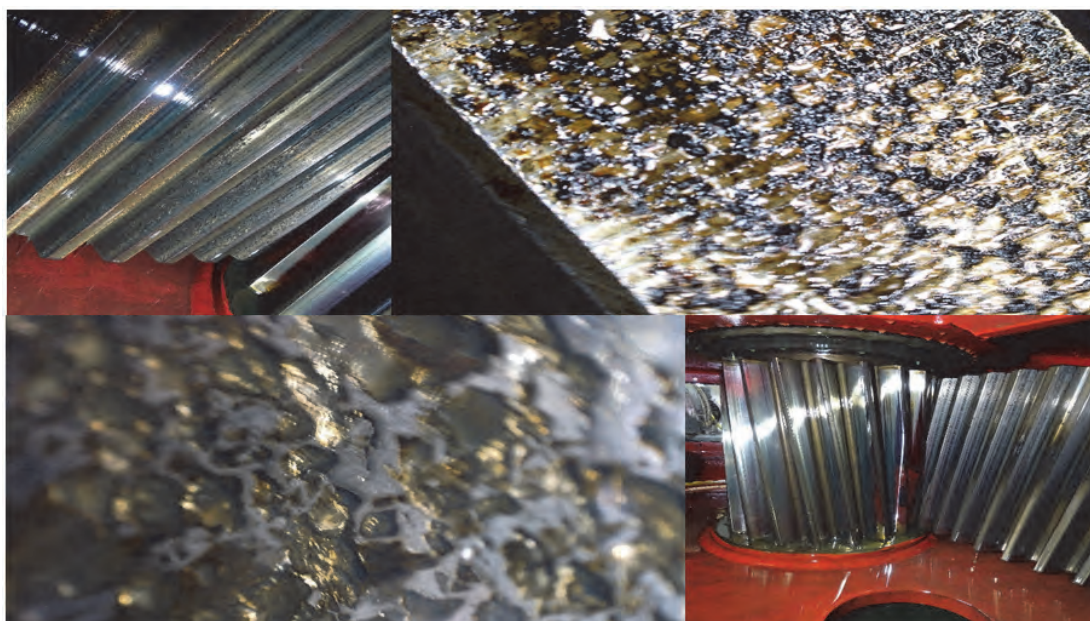
Obr.8 Poškození boků zubů kola K4- makrofotografie. Stav soukolí K3-K4 je podobný jako předchozího. Na povrchu zubů kola K4 je znatelné opotřebení únavou a povrch je pokryt dulkou po odpadlých částech materiálu.



Obr.9 Spektrum rychlosti vibrací převodovky v místě 5V bez zatížení. Vznik zubové frekvence $f_{z1} = 340$ Hz (modulace s víceústupňovou modulací s rozdílem $f_{R1} = 20$ Hz), $f_{z2} = 96,4$ Hz (harmonické složky) a $f_{z3} = 16,9$ Hz (harmonické složky). Značné opotřebení soukolí a vyšší stadia únavy materiálu soukolí K5-K6. Postranní složky ke složkám záběrových frekvencí jako důsledek proměnlivého zatížení nebo otáček.

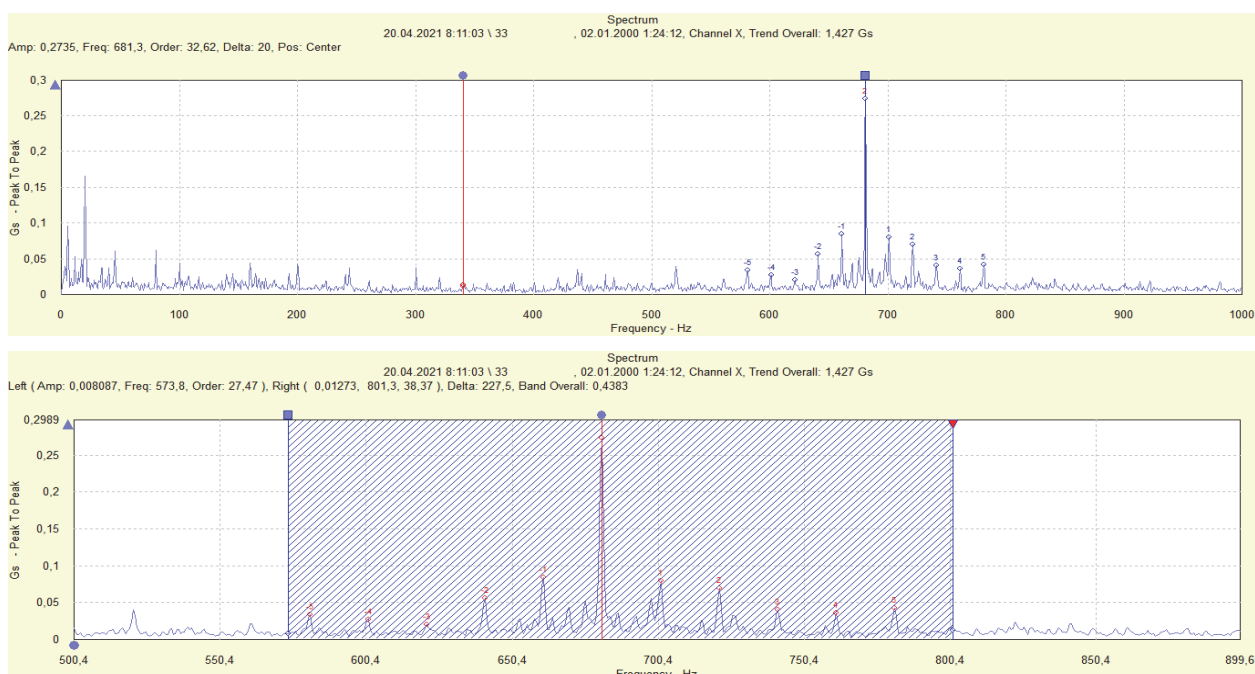


Obr.10 Spektrum ENV převodovky v místě 7H bez zatížení. Ve spektru vibrací došlo ke zvýšení harmonických složek záběrové zubové frekvence tj. znak opotřebení boků zubů. Značné opotřebení soukolí a vyšší stadia únavy materiálu soukolí K5-K6. Postranní složky ke složkám o záběrových frekvencích jako důsledek proměnlivého zatížení nebo otáček.



Obr.11 Čelní soukolí K5-K6. Koroze a pitting kola K6, makrosnímek koroze kola K6 a pitting kola K6- makrosnímek.

Na boku zubů kola K6 je opět vidět poškození únavou povrchu a odlupování jeho částí, poškození je vzhledem k nerovnoměrnosti záběru v některých částech zubů (po šířce zubu směrem k čelní rovině) markantnější a více rozsáhlé. Poškození a makrosnímkou je vidět na obr.11. Kolo K6 je poškozeno korozí na hlavách zubů, patrné z obr.11.



Obr.12 Spektrum ENV převodovky a jeho zoom v místě 9H bez zatížení. Ve spektru vibrací došlo ke zvýšení harmonických složek záběrové zubové frekvence, tj. znak opotřebení boků zubů. Vysoká efektivní hodnota zrychlení = 1,427 Gs. Vznik modulace kolem druhé harmonické složky zubové frekvence 681,3 ukazující opotřebení boků zubů.

4. Závěr

V tomto článku je zhodnocen stávající technický stav převodového ústrojí lanové dráhy. Zhodnocení bylo provedeno s využitím nástrojů vibrodiagnostiky a optického zhodnocení poškození součástí. Měření vibračních spekter probíhalo v režimu odezvy nezatíženého soukolí proto, aby bylo možné diagnostikovat pitting a drobné tvarové odchylky, které jsou způsobené únavou povrchu ozubení. Odezvy těchto vad by při provozním zatížení byly překryty odezvou kolísání tuhosti záběru, způsobenou vlivem deformace zubů, ke které dochází periodicky dle zubové frekvence soukolí.

Popsaná poškození způsobují zvýšenou hlučnost a vibrace, což znamená zvýšený nežádoucí vliv na okolí. Poškození také zhoršují účinnost celého pohonu, tedy lze předpokládat zvýšenou energetickou náročnost při provozu.

Literatura

- [1] Norma ČSN - ISO 208 16 - 3: Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech.
- [2] Tomeh, E. Diagnostic Methodology of Rolling Element and Journal Bearings. Skripta TU Liberec, Technická univerzita v Liberci 2007. ISBN: 978-80-7372-278-4.
- [3] Tomeh, E.: Technická diagnostika, vibrační diagnostika strojů a zařízení. Skripta TU Liberec, Technická univerzita v Liberci 2015. ISBN: 978-80-7494-174-0.

OPOTREBOVANIE FUNKČNÝCH ČASTÍ VSTREKOVACIEHO SYSTÉMU NAFTOVÉHO MOTORA

WEAR OF FUNCTIONAL PARTS OF THE DIESEL ENGINE INJECTION SYSTEM

Zoltán ZÁLEŽÁK, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF ¹

Rastislav BERNÁT, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF ²

Norbert KECSKÉS, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, FEM ³

Jozef ŽARNOVSKÝ, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF ⁴

Roman GÁLIK, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF ⁵

Anotácia:

V poslednom období prešli tieto naftové motory značnou modernizáciou, a to hlavne v časti vysokotlakových vstrekovacích systémov a rovnako vzrástli aj nároky na kvalitu používaného paliva. Príspevok podrobne popisuje detailnú diagnostiku vstrekovacieho systému Common Rail a jeho vstrekočav, ktoré boli prevádzkované na rozdielne druhy motorovej nafty a posudzuje, aký vplyv má použité palivo na vstrekovacie jednotky motorového vozidla. Ďalej popisuje odporúčania, ktoré môžu zvýšiť životnosť a znížiť poruchovosť vstrekočav a vstrekovacích systémov, čím sa znížia následné náklady na údržbu a opravu motorových vozidiel. Dosiahnuté výsledky odhalili, že použité palivo a jeho kvalita majú zásadný vplyv na stav a životnosť vstrekočav a častí vstrekovacieho systému naftového motora.

Annotation:

Recently, these engines have undergone considerable modernization, especially in the area of high-pressure injection systems and demands on fuel quality have also increased. The paper describes the detailed diagnostics of the Common Rail injection system and its injectors, which were operated on different types of diesel fuel and assesses the effect of fuel on the injection units of a motor vehicle. Further, it describes recommendations how to increase service life and reduce the failure rate of injectors and injection systems in order to eliminate subsequent costs of maintaining and repairing motor vehicles. The obtained results revealed that the quality of fuel has a fundamental

¹ Ing. Zoltán Zálezák, PhD.

Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Technická fakulta

Ústav konštruovania a strojárskych technológií

Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra, Slovenská republika

tel.: +421 37 641 5796, +421 37 641 5686, e-mail: zoltan.zalezak@uniag.sk

² Ing. Rastislav Bernát, PhD.

tel.: +421 37 641 5796, +421 37 641 5688, e-mail: rastislav.bernat@uniag.sk

³ Mgr. Norbert Kecskés, PhD.

Fakulta ekonomiky a manažmentu, Ústav štatistiky, operačného výskumu a matematiky

tel.: +421 37 641 4634, e-mail: norbert.kecskes@uniag.sk

⁴ doc. Ing. Jozef Žarnovský, PhD.

tel.: +421 37 641 5784, e-mail: jozef.zarnovsky@uniag.sk

⁵ prof. Ing. Roman Gálik, PhD.

Ústav poľnohospodárskej techniky, dopravy a bioenergetiky

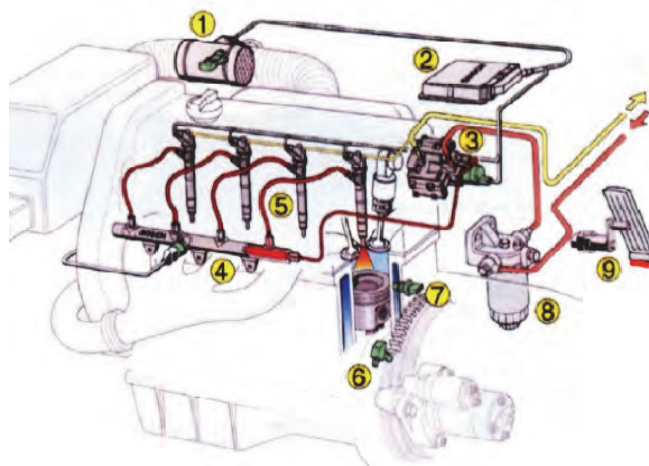
tel.: +421 37 641 5400, +421 37 641 4307, e-mail: roman.galik@uniag.sk

influence on conditions and service life of the injectors and parts of the injection system of diesel engines.

1. Úvod

Naftové motory v dnešnej dobe patria k najviac využívanými pohonnými jednotkami v kategórii úžitkových vozidiel a poľnohospodárskych strojov a nemalé zastúpenie majú aj v osobných automobiloch. Neustály vývoj týchto motorov priniesol zníženie spotreby paliva a zvýšenie výkonu samotného motora. Veľké zmeny nastali aj pri neustálom zlepšovaní a modernizácii vstrekovacích systémoch paliva, kde sú kladené prísne podmienky na presnosť výroby vstrekovacích zariadení, hlavne pri častiach pracujúcich s vysokým tlakom. Medzi tieto zariadenia patrí aj vstrekovacie čerpadlo, ktoré dokáže vytvoriť tlak až do 250 MPa [1].

Naftové motory používajú ako palivo motorovú naftu. Ide o palivo pre naftové motory, ktoré využívajú vnútorné spaľovanie. K výraznému zlepšeniu životného prostredia prispieva okrem prevádzky aj kvalita nafty. Cetánové číslo vyjadruje mieru spaľovacích vlastností motorovej nafty, ktorá sa zisťuje porovnaním referenčných palív v normalizovanej motorovej skúške (STN EN ISO 5165). V súčasnosti sú požiadavky na motorovú naftu neustále sprísňované podľa legislatívy danej krajiny a výrobcov motorov. Výrobcovia motorovej nafty sa snažia zvýšiť jej kvalitu pridávaním prísad do nafty, ktoré sa nazývajú aditíva, čím dokážu zvýšiť kvalitu motorovej nafty a jej úžitkové vlastnosti. Najčastejšie sú to prísady do motorovej nafty pre použitie v zimnom období, ktoré zabezpečujú jej dobrú tekutosť, a tým spoľahlivosť prevádzky v zimnom období. Výnimočne sa používajú aj prísady na zvýšenie cetánového čísla, resp. katalyzátory horenia [2].



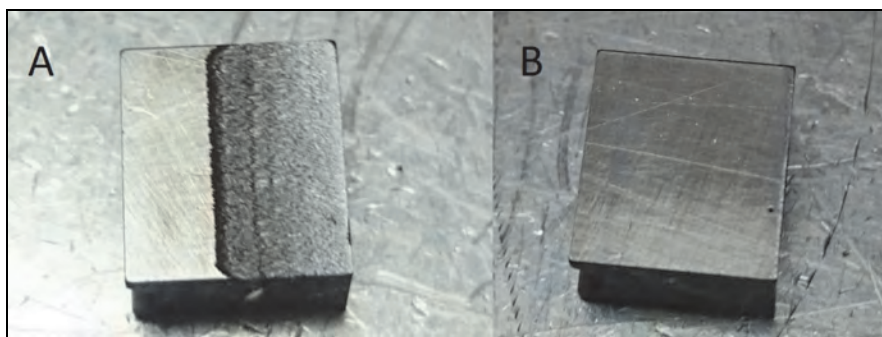
Obr.1 Schéma vstrekovacieho systému s tlakovým zásobníkom CR [1]

- 1 - snímač hmotnosti vzduchu, 2 - riadiaca jednotka motora, 3 - vysokotlakové čerpadlo, 4 - vysokotlakový zásobník, 5 - vstrekovače, 6 - snímač otáčok motora, 7 - snímač teploty chladiacej kvapaliny, 8 - palivový filter, 9 - snímač polohy akceleračtoru

2. Materiál a metódy

Jednotlivé diagnostiky vstrekovacieho systému Common Rail a jeho vstrekočtov boli vykonávané na dvoch vybraných motorových vozidlách s naftovými motormi. Prvé vozidlo Ford Focus s objemom motora 1,8 TDCi s počtom najazdených kilometrov 150 000 km prevádzkované výlučne neprémiovým palivom. Hlavné parametre motora predstavujú jeho zdvihový objem 1753 cm³ o výkone 74 kW a priame vstrekovanie paliva Common Rail so systémom riadenia motora Delphi ECU.

Pri zvážení jednotlivých meraní sa vykonala demontáž vstrekovacieho čerpadla z motora a následne sa pristúpilo k detailnému preskúmaniu opotrebenia jeho hlavných funkčných častí. Na obrázku 2 je vidieť opotrebenie vnútorných častí lopatkového čerpadla, ktoré mohlo byť zapríčinené dlhodobým používaním paliva s nízkou mazivostnou schopnosťou. Nedostatočná mazivosť paliva môže mať za následok vytvorenia opotrebenia na trecích plochách, ktoré má následne vplyv na tlakové parametre v prvom stupni vstrekovacieho čerpadla.



Obr.2 Porovnanie vplyvu kvality paliva na segmenty lopatkového čerpadla

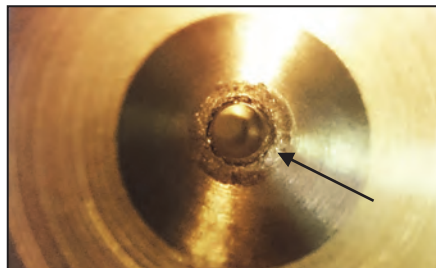
A - opotrebovaný segment; B - nový segment

Ďalšou sledovanou časťou demontovaného vstrekovacieho čerpadla je jeho piestik, ktorý slúži na dávkovanie paliva v závislosti od jeho rýchlosti. Na obrázku 3 je možné vidieť opotrebovanú časť povrchu piestika. Príčinou takéhoto javu môže zapríčiniť dlhodobé používanie menej kvalitného paliva, ktoré dokáže takto vybrúsiť povrch miniatúrnej súčiastky vstrekovacieho čerpadla.



Obr.3 Detail povrchu piestika

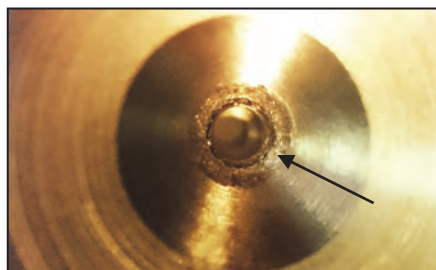
Následnej vizuálnej kontrole vstrekača skúmaného vstrekovacieho systému Common Rail predchádzala jeho samotná demontáž. Po vizuálnej kontrole nasledovala analýza opotrebenia vnútorných mechanických častí pod mikroskopom, konkrétne sedla ventilu vstrekača, čo je možné detailne vidieť na obrázku 4. Pozícia označená šípkou naznačuje známky poškodenia a degradácie materiálu.



Obr.4 Detail sedla ventilu pod mikroskopom

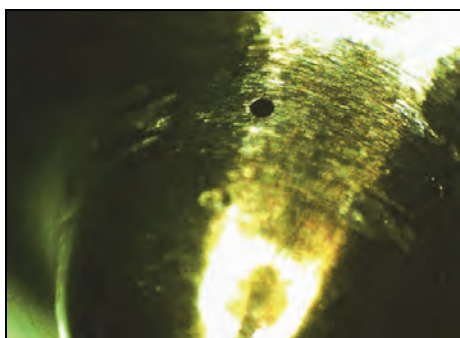
Druhým diagnostikovaným vozidlom bolo Ford Mondeo s objemom motora 1,8 TDCi s počtom najazdených kilometrov 152 000 km prevádzkované výhradne len prémiovým palivom. Hlavné parametre motora predstavujú jeho zdvihový objem 1753 cm³ o výkone 92 kW a priame vstrekovanie paliva Common Rail so systémom riadenia motora Delphi ECU.

Aby bolo možné vykonať jednotlivé analýzy vstrekačov, je ich potrebné demontovať zo spaľovacieho motora. Detailnú diagnostiku vstrekača je možné vykonať demontážou telesa vstrekača na jednotlivé časti. V prvom kroku sa vykonáva vizuálna kontrola jednotlivých komponentov vstrekača a následne sa podrobujú kontrole pod mikroskopom. Na obrázku 5 je možné vidieť pohľad na sedlo ventilu pod mikroskopom, čo je zvýraznené šípkou.

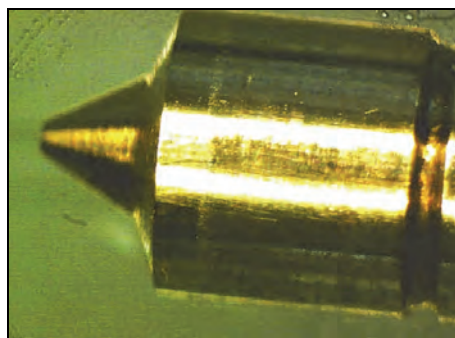


Obr.5 Detail sedla ventilu pod mikroskopom

V druhom kroku sa podrobuje mikroskopickému vizuálnemu skúmaniu vstrekovacia tryska a driek ihly trysky vstrekača (obr.6 a, b). Zobrazenie sedla ventilu pod mikroskopom odhalilo minimálne opotrebenie, čo znamená, že dané motorové vozidlo bolo prevádzkované na pomerne kvalitné palivo. Driek ihly trysky síce nesie drobné známky opotrebenia, avšak z hľadiska funkčnosti ide o bezvýznamné opotrebenie.



a) časť vstrekovacej trysky



b) driel ihly trysky

Obr. 6 Detail vstrekováča pod mikroskopom

Merania vstrekováčov Delphi motorového vozidla Ford Focus a Mondeo sa vykonali na diagnostickom prístroji RABOTTI TEC 200, špeciálne určenom na výkon meraní vstrekovacích systémov Common rail, ktorý dokáže dokonale nasimulovať prevádzku vstrekováčov v praxi a vyhodnotiť ich výsledný stav v protokole. Vykonávanie merania na diagnostickom prístroji je plne automatizované a čerpadlo je poháňané elektromotorom. Počas merania prístroj vyhodnotí na základe výsledných nameraných hodnôt celkový stav vstrekováča. Následne sa výsledné hodnoty ukážu, či je vstrekováč v poriadku, či ho je potrebné opraviť alebo vyradiť z ďalšej prevádzky.

Dosiahnuté výsledky vstrekováčov vozidla Ford Focus sú prehľadne uvedené v tabuľke 1 a výsledné namerané hodnoty vstrekováčov z vozidla Ford Mondeo sú uvedené v tabuľke 2.

Tab.1 Hodnoty vstrekováčov Ford Focus

INJECTOR RESPONSE TIME		----	
INJ.	Delphi EJDR00502Z.inj#	S/N	
Old		New	

Test	Nominal Value	Test Values	Coding Value	Ok
BACKFLOW	9,9 - 50,1 cc/min	201,2 cc/min		T.FAIL
P01 - 1600 bar	43,8 - 57,2	75,2		T.FAIL
P02 - 1600 bar	3,5 - 9,1	13,7		T.FAIL
P03 - 1200 bar	40,2 - 51,0	75,8		T.FAIL
P04 - 1200 bar	1,8 - 8,6	9,6		T.FAIL
P05 - 800 bar	31,6 - 38,8	59,9		T.FAIL
P06 - 800 bar	0,7 - 4,3	2,6		T.OK
P07 □ - 230 bar	10,9 - 18,1	4,6		T.FAIL
P08 □ - 230 bar	0,8 - 4,4	0,0		T.FAIL

Tab.2 Hodnoty vstrekačov Ford Mondeo

INJECTOR RESPONSE TIME		----		
INJ.	Delphi EJDR00502Z.inj#	S/N		
Old	24308B51A9210927	New	EC420D1041870410	
Test	Nominal Value	Test Values	Coding Value	Ok
BACKFLOW	9,9 - 50,1 cc/min	20,9 cc/min		T.OK
P01 □ - 1600 bar	43,8 - 57,2	51,0	0,5	C.OK
P02 □ - 1600 bar	3,5 - 9,1	13,3 - 7,7 - 5,9	-0,4	C.OK
P03 □ - 1200 bar	40,2 - 51,0	43,2 - 44,6	-0,9	C.OK
P04 □ - 1200 bar	1,8 - 8,6	8,0 - 4,0 - 6,1	0,9	C.OK
P05 □ - 800 bar	31,6 - 38,8	34,6	-0,6	C.OK
P06 □ - 800 bar	0,7 - 4,3	5,4 - 2,5	0,0	C.OK
P07 □ - 230 bar	10,9 - 18,1	12,4 - 16,1 - 14,6	0,1	C.OK
P08 □ - 230 bar	0,8 - 4,4	2,1	-0,5	C.OK

Z tabuľky 1 jasne vyplýva, že vybraný vstrekač Delphi motorového vozidla Ford Focus neprešiel testom a diagnostický prístroj to vyhodnotil ako nespoľahlivý a poruchový. Pri tomto vozidle boli ešte ďalšie vstrekače už tiež na hrane poruchového stavu a jeden vstrekač bol bezporuchový.

Vstrekače z vozidla Ford Mondeo na základe dosiahnutých výsledkov boli vyhovujúce a bezporuchové, čo zobrazuje aj tabuľka 2 uvádzajúca meranie na jednom vybranom vstrekači.

3. Záver

V príspevku je poukázané na vplyv používaného paliva na opotrebovanie funkčných častí vstrekovacieho systému naftového motora. Samotná diagnostika vstrekovacieho systému (vstrekovacie čerpadlo, vstrekače) bola vykonávaná na naftovom motore z vozidla Ford Focus, ktoré bolo prevádzkované výlučne neprémiovým palivom. Výsledky získané z častí vstrekovacieho čerpadla poukazujú, že opotrebenie sa najviac prejavilo na vnútorných segmentoch lopatkového čerpadla a na piestiku vysokotlakového čerpadla. Toto opotrebenie mohlo byť zapríčinené nízkou mazivosťou schopnosťou používaného paliva. Následná kontrola vstrekačov pod mikroskopom preukázala, že na sedlách prepúšťacieho ventilu boli zreteľne viditeľné známky opotrebenia. Diagnostika vstrekačov pomocou diagnostického prístroja RABOTTI TEC 200 odhalila poruchu až na troch vstrekačoch motora a na jednom vykázal bezporuchový stav.

Časťami vstrekačov demontovaných z naftového motora Ford Mondeo podrobené diagnostike prostredníctvom mikroskopu boli vstrekovacia tryska a driek ihly trysky vstrekača. Treba však poznamenať, že dané vozidlo bolo prevádzkované výlučne prémiovým palivom. Po detailnom preskúmaní ich povrchu sa na nich neprejavovali známky opotrebenia. Následne sa na vstrekačoch vykonala diagnostika pomocou prístroja Rabotti Tec 200 určeného na diagnostiku vstrekovacích systémov Common Rail. Všetky štyri vstrekače prešli diagnostickým testom s výsledkom vyhovujúcim parametrom predpísaným výrobcom. Dosiahnuté výsledky dokumentujú, že kvalita paliva má zásadný vplyv na poruchovosť a životnosť mechanických častí vstrekačov naftových

motorov. Vozidlo, ktoré jazdilo na prémiové palivá dosiahlo pri diagnostike vstrekovacích systémov výrazne lepšie výsledky ako vozidlo, ktoré jazdilo na neprémiových palivách. Samozrejme je potrebné brať aj do úvahy fakt, že aj keď majú vozidlá najjazdené približne rovnaký počet kilometrov, majitelia sú rôzni, a tým pádom aj majú iný spôsob zaobchádzania s motormi, ako je napríklad správna a včasná údržba, štýl jazdy a v neposlednom rade aj pravidelná výmena čističov paliva.

PodĎakovanie:

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Dopytovo-orientovaný výskum pre udržateľné a inovatívne potraviny, Drive4SIFood 313011V336, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatura:

- [1] Jablonický, J., Tkáč, Z., Tulík, J., Uhrinová, D. a J. Polerecký. Automobilové spaľovacie motory. 1. vyd. Nitra : Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2019. 176 s. ISBN 978-80-552-2015-4.
- [2] Janoško, I., Jablonický, J., Hujo, L., a P. Kuchar. The effect of fuel additive on the selected diesel engine parameters. In Traktori i pogonske mašine. ISSN 0354-9496, 2017, vol. 22, no. 1/2, s. 51-57.
- [3] Pauliček, T., Votava, J. a M. Kotus. Abrasive resistance of filler metals in laboratory conditions. In Journal of Central European Agriculture Online. ISSN 1332-9049, 2014, vol. 15, no. 1, s. 208-213, online (2014). Dostupné na internete: <http://jcea.agr.hr/articles/774371_Abrasive_resistance_of_filler_metals_in_laboratory_conditions_en.pdf>.
- [4] Polerecký, J., Jablonický, J., Tulík, J., Kosiba, J. Zastempowski, M. a M. Simikic. Diagnostics of emission condition of compression ignition engine in utilization of tested substance. In MATEC Web of Conferences. 1. vyd. ISBN 2261-236X. International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles. Paris : EDP Sciences, 2019, 11 s. Dostupné na internete: <<https://doi.org/10.1051/mateconf/201930201022>>.

SHLUKOVÁ ANALÝZA VIBRODIAGNOSTICKÉHO SIGNÁLU

Daniel ZUTH, Vysoké učená technické v Brně, FSI ¹

Anotace:

Příspěvek se zabývá možností využití shlukové analýzy (metoda učení bez učitele) pro vibrodiagnostický signál. Cílem je tedy předvést možnosti této metody na konkrétním příkladu, což jsou reálně naměřená data z vibrodiagnostického modelu.

1. Úvod

V reálném světě existuje velké množství informací (užitečná data) o stavech veličin nebo procesů, které ale nejsou roztržena dle nějakých společných vlastností, například projevy závad, nebo projev konkrétního stavu. Tuto činnost by samozřejmě mohl provést lidský expert, který by data analyzoval a zařadil konkrétní pozorování (měření) do nějaké třídy (skupiny), jako například „Ok stav“, „stav - porucha 1“ atd., avšak tento příspěvek představí možnosti automatizovaného (strojového) roztržení do skupin, bez znalosti konkrétního problému. Jedná se tedy o metodu strojového učení tzv. „učení bez učitele“, tzn., že na rozdíl od klasifikace dat („učení s učitelem“), kde ke každému pozorování je znám i výsledek, u této metody není znám nejen výsledek predikce, ale ani počet tříd, do kterých má být pozorování roztrženo. Tato metoda, kdy vstupem jsou pouze „slepá“ - neoznačená data se nazývá Shluková analýza, někdy tedy z anglického Cluster analysis, také clusterová analýza. Jejím cílem je tedy neznáme data rozřadit do skupin a případné další pozorování také zařadit do příslušné skupiny.

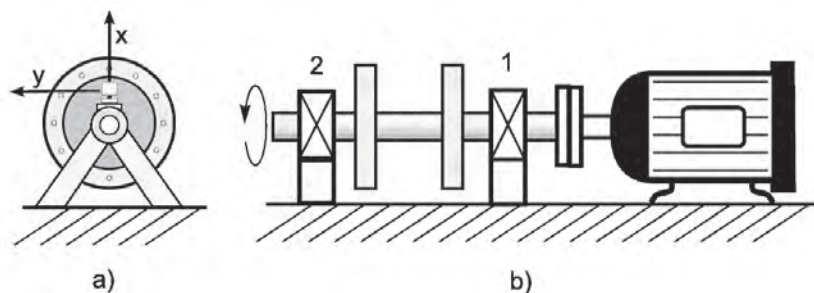
V předchozích článcích byly představeny různé metody pro klasifikaci dat, jako klasické klasifikátory [1] nebo metoda Deep learning (hluboké učení) [2], která zpracovává obrazová data. Stejně jako v předchozích případech se jedná o vibrodiagnostický signál (zrychlení měřené pomocí MEMS akcelerometrů) a vyhodnocovalo se několik stavů, což byly simulované závady rotačních strojů na vibrodiagnostickém modelu. Konkrétně se jednalo o následující stavy:

- T1 - Ok stav
- T2 - Statická nevývaha úroveň 1
- T3 - Dynamická nevývaha úroveň 1
- T4 - Statická nevývaha úroveň 2
- T5 - Dynamická nevývaha úroveň 2

Schematicky je situace popsána v [3.] a pro úplnost i zde na obr.1 a 2.

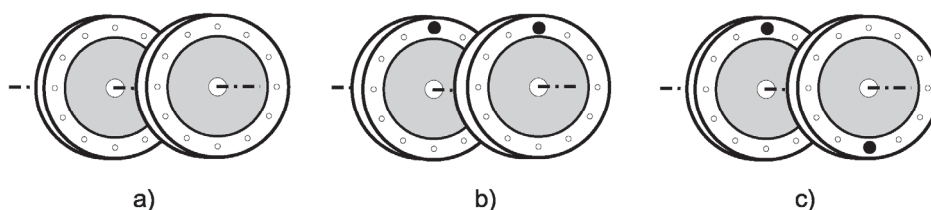
¹ Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

Vysoké učená technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Technická 2896/2, 616 69 Brno
tel.: +420 541 142 101, e-mail: zuth@fme.vutbr.cz



Obr.1 Vibrodiagnostický model

- a) pohled z leva - umístění snímače a směry os
b) přední pohled - znázorněné pozice 1 a 2



Obr.2 Znázornění umístění závaží

- a) bezporuchový stav, b) statická nevývaha, c) dynamická nevývaha

2. Shluková analýza - metody

Samotná shluková analýza vychází z předpokladu, že se nějakým způsobem vyhodnotí podobnost jednotlivých objektů (v tomto případě pozorování - měření) a na základě míry podobnosti shlukuje jednotlivé objekty do skupin - shluků. Základní rozdělení metod pro shlukovou analýzu je na:

- Hierarchické shlukování
- Nehierarchické shlukování

Hierarchické shlukování vychází z principu, že každý prvek je na začátku jedním shlukem a postupně vznikají další podmnožiny, které spojují tyto shluky na základě míry podobnosti, postupuje se tak dlouho dokud nevznikne jediná množina obsahující všechny ostatní podmnožiny. Vznikne tedy systém množin a podmnožin, kdy každý prvek náleží do nějaké množiny i několik podmnožin. Tento systém lze vizualizovat pomocí grafu, který se nazývá dendrogram. Oproti tomu nehierarchické shlukování vytváří systém množin (dle počtu tříd) a přiřadí objekty do dané množiny na základě podobnosti bez dalších podmnožin, nejčastějším zástupcem je algoritmus K-means.

V tomto příspěvku budou konkrétně otestovány tyto základní metody:

- Základní hierarchické shlukování
- Metoda K-means

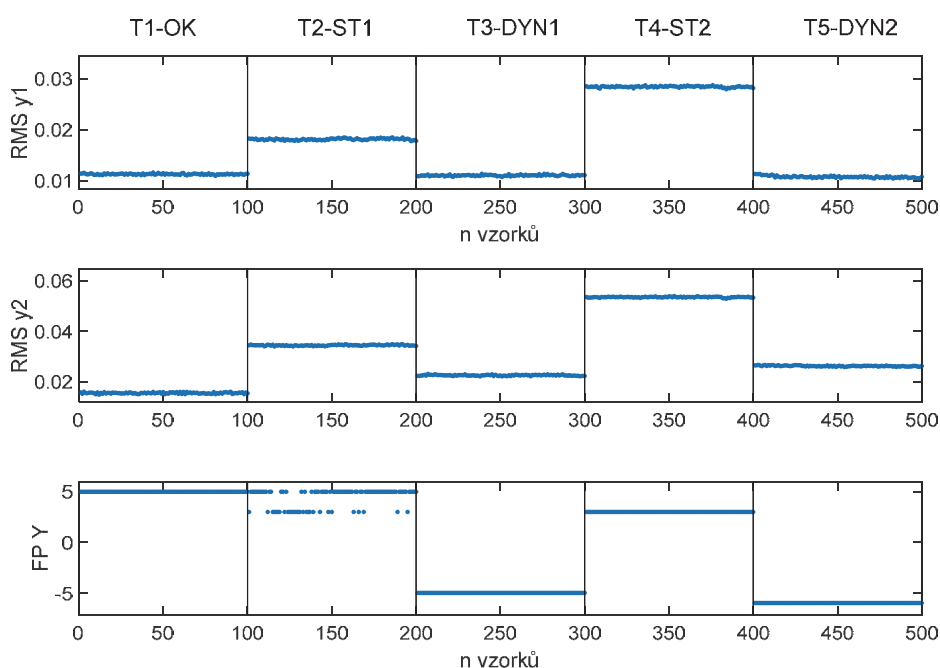
Principy u všech metod jsou podobné. V prvním kroku se musí nějak definovat prostor (v tomto případě 3 parametry = 3 souřadnice) a v něm dle konkrétní metriky (metody výpočtu) určit vzdálenost v prostoru a poté seskupit blízké objekty co nejlépe do shluků. Všechny metody budou předvedeny v prostředí Matlab, nicméně podobných výsledku lze dosáhnout v libovolném programovacím prostředí.

3. Vstupní data

Vstupní data jsou záznamy zrychlení v časové ose, jedno pozorování (měření) je reprezentováno 1000 vzorků s vzorkovací frekvencí 2 kHz, a to v osách x a y a dvou pozicích (stojany ložisek) 1 a 2. Z těchto dat jsou vytvořeny datasety obsahující 3 parametry (prediktory), a to:

- RMS v ose Y na pozici 1
- RMS v ose Y na pozici 2
- Fázový posun Y mezi pozicí 1 a 2

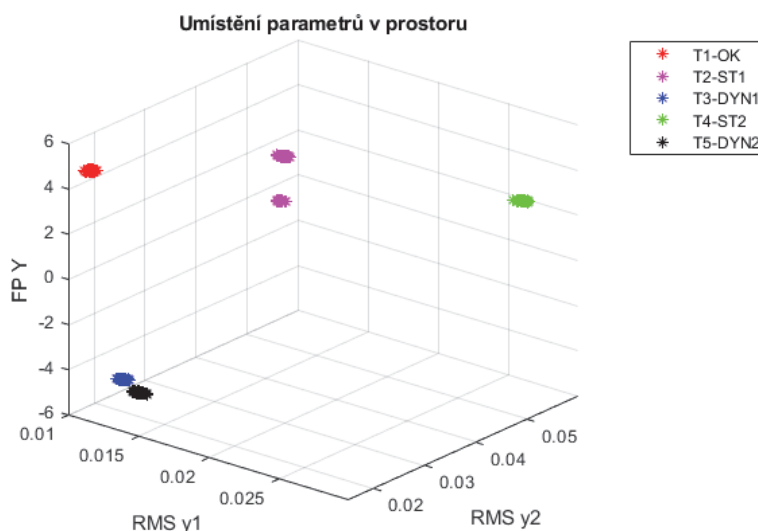
Z principu je možné zadávat více vstupních parametrů, ale 3 parametry lze snadno vizualizovat pomocí 3D grafu. U více parametrů by se pracovalo s vícerozměrným prostorem, což z hlediska výpočtů není problém, ale nelze již snadno problém (a jeho výsledky) vizualizovat. Pro každou třídu bylo použito 100 vzorků, celkem je tedy 500 vzorků.



Obr.3 Analýza variace parametrů pro jednotlivé třídy znázorněné barevnými bloky

V tomto případě je známo, že je předkládáno 5 tříd (viz výše) a proto lze těchto 5 tříd vizualizovat, a to jako variace sledovaných parametrů pro jednotlivé třídy (obr.3) a pak jako 3D prostor (obr.4), kdy každý parametr reprezentuje souřadnice v 3D prostoru, kde jsou patrné shluky, tzn. cílový stav, ke kterému by se měli jednotlivé metody

dopracovat. Z obrázků je patrné, že u parametru fázového posunu docházelo u třídy T2 (statická nevyvaha úrovně 1) k variaci FP mezi 3 a 5, proto tento shluk v prostoru vytváří dva shluky blízko sebe (jeden se Z souřadnicemi 3 a druhý 5), s tímto by mohly mít jednotlivé metody problém.



Obr.4 Ukázka umístění parametrů v prostoru s barevným odlišením jednotlivých tříd T1 až T5

4. Základní hierarchické shlukování

U všech metod je hlavním problémem určit počet tříd, tzn. počet shluků, které hledáme. Jedná se o metodu „učení bez učitele“, takže algoritmu není známo nic o povaze vstupních dat, tudíž ani o počtu tříd které má určit.

Postup je tedy následující:

- Propočítat vzdálenosti mezi jednotlivými body na základě zvolené metriky
- Vytvořit množiny a podmnožiny shluků na základě blízkosti
- Určit počet tříd na základě dendogramu

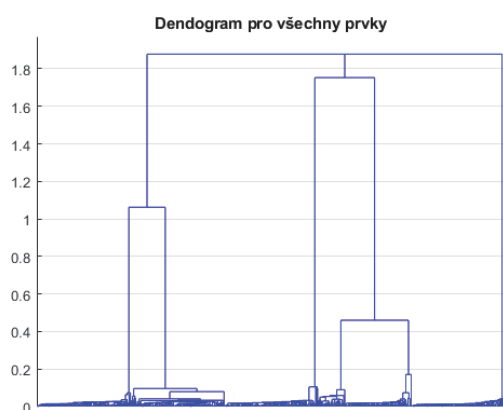
V prostředí Matlab využijeme funkci `pdist()`, která vytvoří vektor obsahující vzdálenosti pro všechny kombinace párů u všech pozorování (měření). Metriky, které lze pro tuto funkci nastavit jsou : euclidean, squaredeuclidean, seuclidean, mahalanobis, cityblock, minkowski, chebychev, cosine, correlation, hamming, jaccard, spearman a případně vytvořit vlastní. Jednotlivé metriky se od sebe liší vzorcem pro vyhodnocení vzdálenosti, viz dokumentace [4].

Následuje použití funkce `linkage()`, která začne postupně spojovat prvky do podmnožin dle jejich vzdálenosti, tak dlouho až vznikne jedna množina [5].

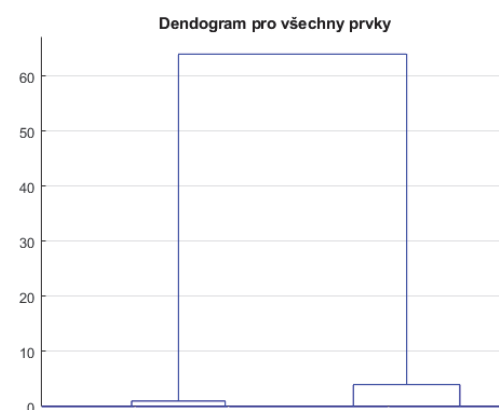
Nyní si výsledek zobrazíme pomocí dendogramu, z kterého můžeme určit, kolik určíme tříd a jak blízké si jsou tyto třídy mezi sebou. Na základě tohoto rozhodnutí můžeme vytvořit výsledné rozřazení do skupin (tříd).

V tomto konkrétním případě se jako nejlepší metrika ukázala „mahalanobis“, které vykazovala nejvíce patrné větve v dendogramu viz obr.5a, na kterém je zobrazeno na ose Y vzdálenosti mezi jednotlivými množinami a na ose X je každé pozorování (měření)

seskládáno dle vzdáleností. Z tohoto dendogramu (obr.5a) je patrné (bez znalosti problému), že se v datech vyskytují 3 výrazné skupiny a dvě z nich se později dále větví na další podobně blízké skupiny. Nyní tedy záleží na uživateli, kde provede pomyslný řez v grafu (vodorovná čára) a na kolik shluků tedy budou výsledná měření seskupena. Bez znalosti problému by se uživatel rozhodoval mezi 5 a 6 shluky. Při znalosti problému je zřejmé, že poslední dvojice je právě problematická třída T2. Pro názornost je na obr.5b dendogram pro metriku „squaredeclidean“, která vykazuje dva velké shluky a pak rozvětvení, kde je ale blízkost objektu v poměru mezi základními shluky málo výrazná.



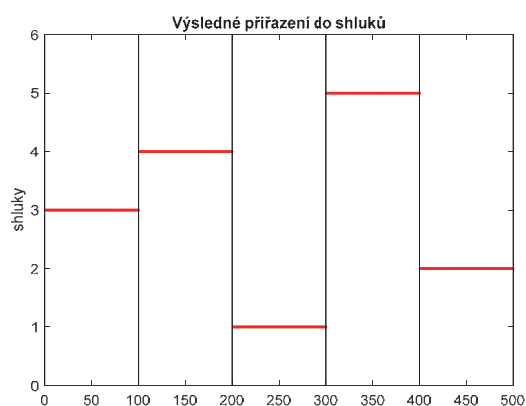
a) Metrika „mahalanobis“



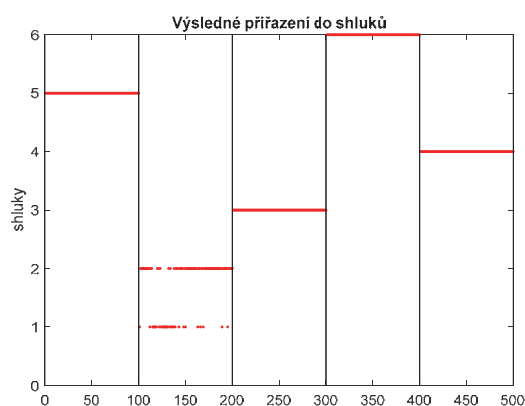
b) Metrika „squaredeclidean“

Obr.5 Ukázka dedogramů

Posledním krokem je tedy rozdělení výsledků do shluků a to provedeme buď automaticky na základě blízkosti (tzn. množiny které si jsou blíží než zvolena hranice se dále nedělí) nebo zadáním maximalního počtu shluků, v tomto případě zvolíme počet 5 nebo 6 (v případě počtu 6 by byly vytvořeny samostatné shluky pro FP=3 a FP=6). Výsledky jsou na obr. 6, kde jednotlivé barevné obdelníky reprezentují reálné (pravdivé) třídy a úroveň osy Y reprezentuje příslušnost k shluku 1 až 5 (obr. 6a) případně 1 až 6 (obr.6b). Z výsledků lze konstatovat, že použitá metrika je velmi účinná pro tento problém a dosahuje 100 % úspěšnosti, tzn. všechny prvky z reálné třídy tvoří samostatné shluky.



a) při počtu shluků = 5



b) při počtu shluků = 6

Obr.6 Přiřazení pozorování do tříd

5. Metoda K-menas

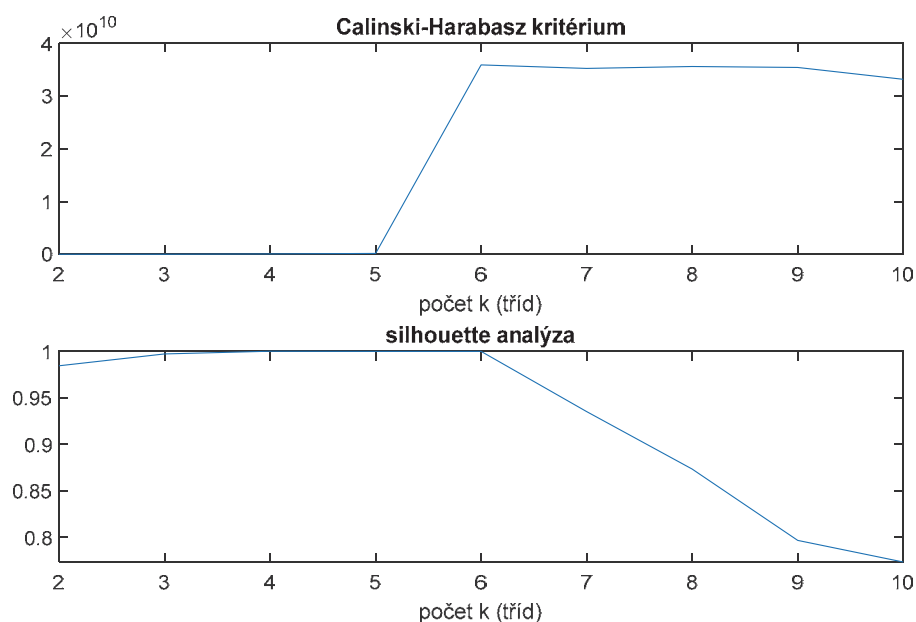
Metoda k-means pracuje s předpokladem, že každé pozorování (měření) lze chápat jako bod v n rozměrném prostoru a poté metoda naleznе centroidy (těžiště v prostoru), které reprezentují jednotlivé shluky. Přiřazení konkrétního měření do konkrétního shluku je v podstatě pouhé určení, ke kterému centroidu je nejkratší vzdálenost. Nevýhoda této metody je, že na začátku musí být zvolen počet shluků, pro které se hledá centroid, avšak lze postupně spouštět metodu pro různý počet centroidů a vyhodnotit, který počet vykazuje nejlepší rozptyl vzdáleností pro jednotlivé objekty ve shluku. Výhodou této metody je naučení na vzorku dat a pak rozřídít nová pozorování na základě zkušeností z minulých pozorování. Postup metody při učení je tedy následující:

- rozmístit stanovený počet centroidů do prostoru mezi pozorování, zpravidla náhodně,
- pomocí metody nejmenších čtverců na základě zvolené metriky vyhodnotit umístění centroidů vůči jednotlivým objektům,
- iterační metodou „posouvat“ v prostoru centroidy tak, aby bylo optimální umístění vůči všem objektům.

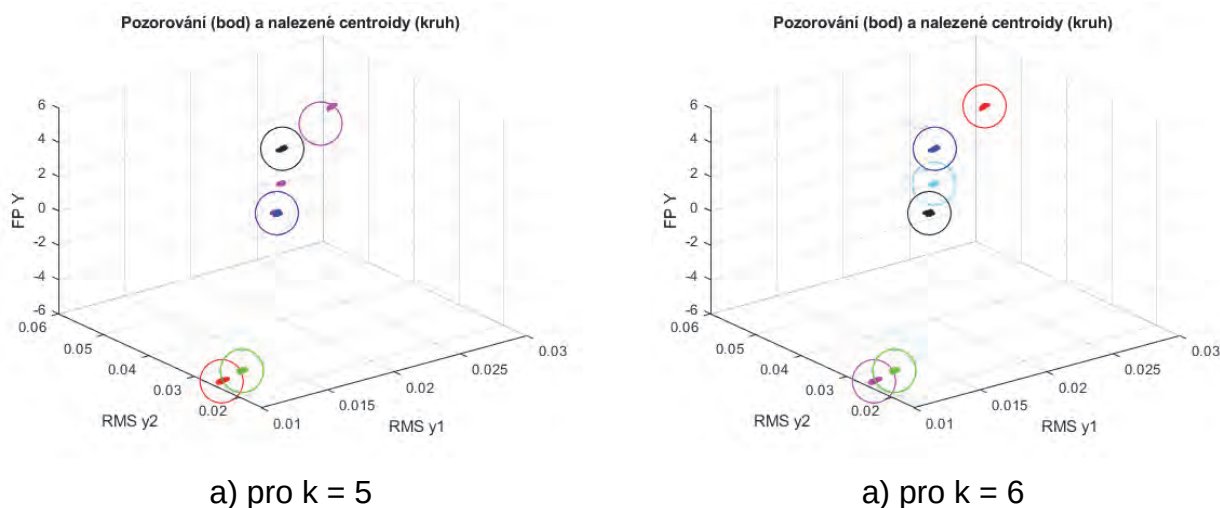
Díky tomu, že na začátku jsou centroidy umístěny náhodně, může každé spuštění dosáhnout odlišných výsledků.

V prostředí Matlabu lze využít funkci `kmeans()` [6], která provede iterační výpočet, kdy výsledkem jsou rozřazené objekty do tříd a také souřadnice centroidů. Nicméně již na začátku je nutné zadat počet tříd, tzn. i počet centroidů, proto je nutné provést výpočty pro různý počet tříd (v tomto případě je to parametr k) a vyhodnotit, jaký počet je nejvýhodnější. K tomu lze využít tzv. siluetní graf (silhouette), který zobrazuje vzdálenosti objektu od sebe v dané třídě a z tohoto grafu vychází silhouette analýza, které provede průměr všech vzdáleností pro daný počet tříd, vyberme takový počet k (a tudíž počet tříd), kde je průměr všech vzdáleností co nejbližší 1 a případně kde dochází k náhle změně vzdáleností, tzn. zhoršení stavu. Toto můžeme provést pomocí výpočtů z funkce `silhouette()` [7] a následnému vyhodnocení průměru, nebo využít funkci `evalclusters()` [8], které umožňuje kromě silhouette analýzy provést i jiné typy analýzy, například Calinski-Harabasz kritérium [9.], kde vybereme počet k (tříd) s největší hodnotou. Analýzy byly provedeny pro počet k rovno 1 až 10. U obou analýz se jako nejvhodnější ukazuje počet $k = 6$, tzn. 6 tříd (obr.7), jak je patrné z předcházející kapitoly, je to díky tomu, že se sporná třída T2 rozdělí na dvě podtřídy.

Funkce `kmeans()` v Matlabu neumožňuje použít metriku „mahalanobis“, která přinášela vhodné výsledky u předešlé metody a jako nejvhodnější je tedy „sqeuclidean“, pro kterou i dendrogram vykazoval nevhodnou metriku. Z tohoto důvodu je v případě volby $k = 5$ nevhodně přidružená podskupina z T2 k jiné ze skupin, což je pro vyhodnocení nesprávné určení, v případě počtu $k = 6$ je výsledek dle očekávání bezchybný, ale problémová třída T2 je rozdělena na dvě podtřídy. Výsledky jsou pak zobrazeny na obr.9, kde obr.9a je situace se zvoleným parametrem $k = 5$ a obr.9b je situace se zvoleným parametrem $k = 6$.



Obr.7 Analýza pro vhodný počet parametru k



Obr.8 Výsledné určení shluků s vyznačenými centroidy (kruhy)

6. Závěr

Příspěvek si nekládí za cíl provést důkladnou analýzu konkrétních naměřených dat, ale seznámení s problematikou a příkladem aplikace základních metod shlukové analýzy pro reálné data. Byly tedy představeny dva základní zástupci hierarchického a nehierarchického přístupu. Dle výsledků si obě metody dokáží s problémem poradit, nicméně je nutné provést základní analýzy a zvolit vhodné parametry. Jako nejzásadnější je zvolení vhodné metriky pro určení podobnosti objektů, které má zásadní vliv na výsledky shlukové analýzy.

Je zřejmé, že představené metody zdaleka nejsou jediné, které by pro shlukovou analýzu a tento konkrétní problém bylo možno použít, jako příklad vyzkoušených metod s podobným výsledkem je například Spectral clustering [10] nebo Fuzzy c-means

clustering [11]. Další pokročilejší metody mohou zpracovávat také obrazový vstup a jednalo by se například o metodu Deep learning v kombinaci s autoencoderem. Popsání dalších metod je však nad rámec tohoto příspěvku.

Literatura

- [1] Zuth, D. Ukázka využití strojového učení ve vibrodiagnostice. Řízení&údržba průmyslového podniku, 2018, č. 4, s. 14-16. ISSN: 1803-4535.
- [2] Zuth, D. Využití metod umělé inteligence v technické diagnostice - Deep Learning. Technická diagnostika, 2021, roč. 2021, č. 1, s. 21-24. ISSN: 1210-311X.
- [3] Zuth, D. and T. Marada. Utilization of Machine Learning in Vibrodiagnostics. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018, č. 2017, s. 271-278. ISSN: 2194-5357.
- [4] MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink [online]. Copyright © 1994 [cit. 10.01.2023]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/help/stats/pdist.html>
- [5] MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink [online]. Copyright © 1994 [cit. 10.01.2023]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/help/stats/linkage.html>
- [6] MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink [online]. Copyright © 1994 [cit. 10.01.2023]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/help/stats/kmeans.html>
- [7] MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink [online]. Copyright © 1994 [cit. 10.01.2023]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/help/stats/silhouette.html>
- [8] MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink [online]. Copyright © 1994 [cit. 10.01.2023]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/help/stats/evalclusters.html>
- [9] MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink [online]. Copyright © 1994 [cit. 10.01.2023]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/help/stats/clustering.evaluation.calinskiharabaszevaluation.html>
- [10] MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink [online]. Copyright © 1994 [cit. 10.01.2023]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/help/stats/spectralcluster.html>
- [11] MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink [online]. Copyright © 1994 [cit. 10.01.2023]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/help/fuzzy/fcm.html>

ANALÝZA VENTILÁTOROVEJ TECHNIKY POMOCOU VIBRODIAGNOSTIKY

ANALYSIS OF FAN TECHNOLOGY USING VIBRODIAGNOSTICS

Jozef ŽARNOVSKÝ, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF ¹

Rastislav MIKUŠ, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF ²

Ivan KOVÁČ, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF ³

Jozef DOBRÁNSKÝ, Technická univerzita v Košiciach, FVT ⁴

Rastislav BERNÁT, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF ⁵

Zoltán ZÁLEŽÁK, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF ⁶

Michal WEIS, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF

Anotácia:

Príspevok je zameraný na vibrodiagnostiku ventilátorovej techniky. Cieľom práce je preveriť správnu funkčnosť ventilátora RLT5.1 6M1 v systéme ANTIFOG, ktorý je umiestnený vo vybranej spoločnosti. Merania boli realizované diagnostickým prístrojom ADASH VA4 a vyhodnotené softvérom DDS 2022. Výsledky experimentu boli analyzované z pohľadu efektívnej hodnoty vibrácií RMS, hodnotenia obáľkovou metódou, hodnotenia frekvenčného spektra rýchlosti a zrýchlenia vibrácií. Na základe získaných informácií boli formulované odporúčania pre ďalší bezproblémový chod daného ventilátora.

Annotation:

In the paper we focus on vibrodiagnostics of ventilator technology. The aim of the work is to verify the correct functionality of the RLT5.1 6M1 ventilator in the ANTIFOG system located in a selected company. The measurements were carried out with the ADASH VA4 diagnostic device and evaluated by the DDS 2022 software. The results of the experiment were analysed according to the effective RMS vibration values, evaluation of the envelope system method, evaluation of the speed frequency spectrum and

¹ doc. Ing. Jozef Žarnovský, PhD.

Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Technická fakulta

Ústav konštruovania a strojárskych technológií

Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra, Slovenská republika

tel.: +421 37 641 5784, e-mail: jozef.zarnovsky@uniag.sk

² Ing. Rastislav Mikuš, PhD.

tel.: +421 37 641 4308, e-mail: rastislav.mikus@uniag.sk

³ Ing. Ivan Kováč, PhD.

tel.: +421 37 641 5687, e-mail: ivan.kovac@uniag.sk

⁴ doc. Ing. Jozef Dobránský, PhD.

Technická univerzita v Košiciach, FVT TUKE so sídlom v Prešove

Katedra prevádzky výrobných procesov

Štúrova 31, 080 01 Prešov, Slovenská republika

tel.: +421 55 602 6350, e-mail: jozef.dobransky@tuke.sk

⁵ Ing. Rastislav Bernát, PhD.

tel.: +421 37 641 5796, +421 37 641 5688, e-mail: rastislav.bernat@uniag.sk

⁶ Ing. Zoltán Záležák, PhD.

tel.: +421 37 641 5796, +421 37 641 5686, e-mail: zoltan.zalezak@uniag.sk

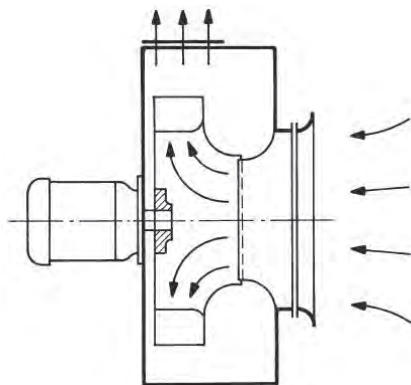
acceleration of vibrations, and then we proposed recommendations for trouble-free operation of the examined ventilator.

1. Úvod

Úlohou ventilátora je transportovať objemový prietok plynného média, najčastejšie vzdušniny cez systém zariadenia (potrubný systém spájajúci technologické alebo procesné zariadenia). [1]

Hlavnými časťami sledovaného radiálneho ventilátora (obr.1) sú špirálová skriňa s výtlakovým kanálom a nábehovou hranou, sacia dýza a obežné koleso. Dopravovaný vzduch vstupuje cez saciu dýzu do obežného kolesa, kde je jeho dráha zmenená v radiálnom smere. V lopatkovom kanáli obežného kolesa (priestor medzi lopatkami) nastáva premena energie, tzn. obežnému kolesu je prostredníctvom hriadeľa od hnacieho motora dodaná mechanická energia premieňaná na tlakovú a rýchlostnú energiu. [2, 3]

Ventilátor, ktorý bol predmetom experimentov sa nachádzal vo filtračnej stanici v systéme ANTIFOG. Experimenty boli vykonané na prírubovom radiálnom ventilátore s pracovným označením RTL 5.1 6M1.



Obr.1 Radiálny ventilátor s prírubovým uchytením elektromotora [3]

2. Materiál a metódy

Sledovaný ventilátor je zložený z asynchrónneho motora a obežného kolesa umiestneného priamo na hriadeľi motora. V dobe merania dosahovali otáčky hriadeľa $1\,500\text{ min}^{-1}$, čomu, podľa vzorca (1), zodpovedá hodnota 25 Hz:

$$f = n / 60 \text{ [Hz]} \quad (1)$$

kde f frekvencia [Hz]

n otáčky hriadeľa [min^{-1}]

Sledovaný ventilátor je umiestnený priamo na filtračnej stanici v systéme ANTIFOG, kde uloženie ventilátora je možné považovať za tuhé (obr.2). Rotor elektromotora bol osadený v ložiskách od spoločnosti SKF, kde ložisko L1 malo označenie 6311 2Z C3 a ložisko L2 malo označenie NU 311E.



Obr.2 Ventilátor RTL 5.1 6M1

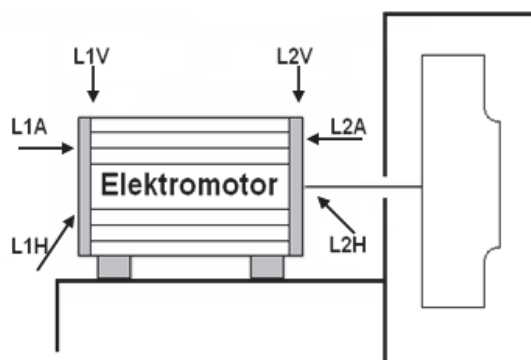
Experimenty boli vykonané pomocou diagnostického prístroja Adash. Bol použitý analyzátor A4400 - VA4 Pro (obr.3) so snímačom vibrácií A104-1A pripevneným magnetom. Tento výkonný analyzátor vibrácií je multifunkčným prístrojom, ktorý umožňuje ako samotné merania, uchovanie dát, tak aj následnú analýzu vibračného signálu. Prístroj má štvorkanálový vstup a navyše vstup pre otáčkovú sondu. Ďalej je tento prístroj vybavený modulmi pre akustické merania, vyvažovanie strojov, meranie rozbehu a dobehov, modulom pre vizualizáciu prevádzkového stavu kmitov a i. [4, 5]



Obr.3 Vibrodiagnostický prístroj ADASH VA4Pro a snímač vibrácií A104-1A

Pri experimentálnom skúšaní stroja bolo nutné vyhodnotiť všetky namerané body všetkými metódami. Experimentálne merania boli smerované ako diagnostické na zistenie stavu ventilátora, preto bolo potrebné odmerať dáta zo všetkých meracích bodov (obr.4).

Na vyhodnotenie bol použitý softvér DDS 2022, kde bol na experimenty vytvorený nový pochôdzkový merací strom pre vyhodnotenie nameraných dát.



Obr.4 Meracie body ventilátora

3. Dosiahnuté výsledky

3.1 Efektívna hodnota vibrácií RMS

Ako prvé meranie v rámci experimentu boli vykonané merania metódou efektívnej hodnoty vibrácií RMS, ktorá charakterizuje mieru nebezpečnosti a škodlivosti kmitania s priamym vzťahom k energii vibrácií. Podľa tejto metódy boli porovnávané namerané hodnoty (tab.1) s príslušnou normou DIN ISO 10816. Na základe analýzy výsledkov prekročenia nameraných hodnôt bola stanovená hypotéza, že motor nevyhovuje, avšak pre potvrdenie hypotézy bolo nutné vykonať detailnejšiu analýzu vibrácií a stanoviť príčinu vibrácií.

Tab.1 Tabuľka nameraných hodnôt vibrácií RMS

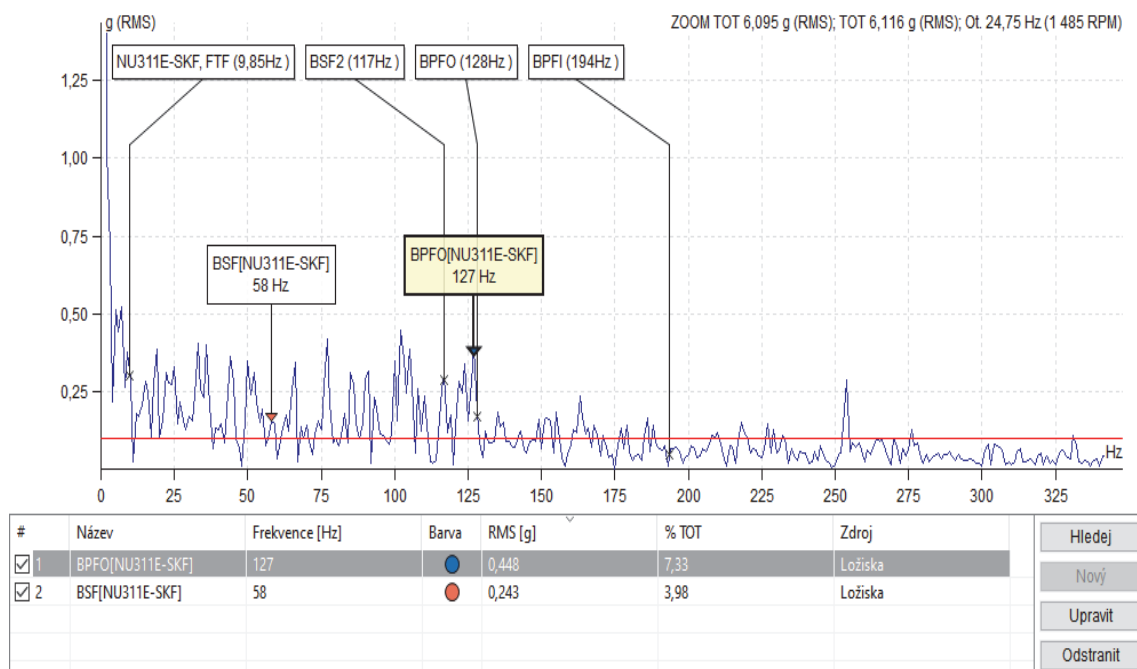
Meracie body	Hodnota vibrácií [mm.s ⁻¹]	Alarm
L1H/ISO RMS01	4,79	
L2A/ISO RMS01	6,42	
L1V/ISO RMS01	4,54	
L2V/ISO RMS01	9,76	
L2H/ISO RMS01	9,36	

3.2 Vyhodnotenie obáľkovej metódy

Ďalšie vyhodnotenie bolo realizované obáľkovou metódou. V uvedenom demodulovanom frekvenčnom spektre (obr.5), možno konštatovať závislosť zrýchlenia vibrácií od frekvencie v pásme 5 Hz až 325 Hz pre ložisko L2, snímanú zo smeru V - vertikálne. Grafické zobrazenie spektra zobrazuje namerané dynamické dáta vypočítané pomocou FFT z príslušného časového záznamu, z ktorých boli vyfiltrované nízkofrekvenčné hodnoty a naopak zosilnené vysokofrekvenčné hodnoty, na ktoré sa aplikoval obáľkový filter.

Z grafického priebehu možno konštatovať jednotlivé frekvencie a informačné okná, ktoré poukazujú na poruchové frekvencie jednotlivých komponentov valivých ložísk, ktoré boli vopred nadefinované. Komponenty valivých ložísk sú označené nasledovne: FTF - klietka ložiska, BSF2 - valivý element ložiska, BPFO - vonkajší krúžok ložiska, BPFI

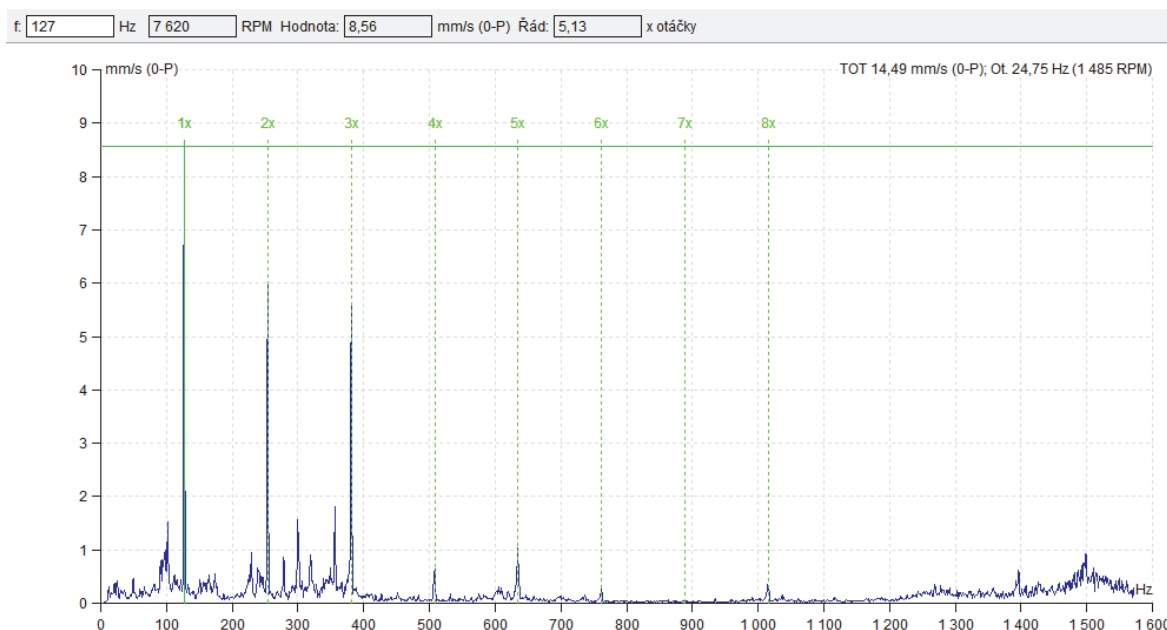
- vnútorný krúžok ložiska. Z týchto poruchových (škodových) frekvencií je dominantná frekvencia BPFO 127 Hz, čo je vonkajší krúžok ložiska. Vysokú hodnotu má aj frekvencia BSF2, čo je valivé teliesko. Z daných informácií možno teda tvrdiť, že ložisko L2 je poškodené.



Obr.5 Demodulované frekvenčné spektrum zrýchlenia vibrácií s vyznačenými poruchovými frekvenciami komponentov ložiska NU 311E

3.3 Vyhodnotenie frekvenčného spektra rýchlosti vibrácií

Pri detailnejšej analýze bolo vyhodnotené frekvenčné spektrum rýchlosti vibrácií. Vo frekvenčnom spektre rýchlosti by sa mali nachádzať amplitúdy vibrácií poukazujúce na nevyváženie obežného kola, prípadne mechanické uvoľnenie. Ak by išlo o nevyváženie, bola by očakávaná amplitúda frekvencie otáčok na úrovni 25 Hz. Ale keďže vo frekvenčnom spektre rýchlosti vibrácií (obr.6) sa nachádza špička na úrovni 127 Hz a jej harmonické násobky, čo je škodová frekvencia daného ložiska, možno s určitosťou tvrdiť, že dané ložisko je už značne poškodené a ovplyvňuje aj vibrácie celého ventilátora.



Obr.6 Frekvenčné spektrum rýchlosti vibrácií

3.4 Vyhodnotenie frekvenčného spektra zrýchlenia vibrácií

Ako posledná metóda pri detailnej analýze sledovaného objektu bola zvolená metóda vyhodnotenia frekvenčného spektra zrýchlenia vibrácií.

V priebehu frekvenčného spektra zrýchlenia vibrácií (obr.5) sú najviac viditeľné harmonické frekvencie začínajúce na úrovni 127 Hz, čo je škodová frekvencia ložiska L2, ktorú je možné vidieť aj v grafe frekvencie rýchlosti vibrácií (obr.7). Je to ďalšia metóda potvrdzujúca, že dané ložisko je poškodené.

4. Záver

Na základe vyhodnotených vibrácií a frekvenčných spektier možno konštatovať, že je potrebná výmena ložiska L2, čo je ložisko NU311E. Keďže vo frekvenčnom spektre rýchlosti vibrácií (obr.6) sa nachádzali harmonické amplitúdy len škodovej frekvencie poškodeného ložiska, je predpoklad, že po výmene ložiska nebude potrebné vyvažovanie obežného kola a ventilátor by mal byť prevádzkyschopný bez obmedzení. Napriek tomu, že bolo diagnostikované poškodenie len na ložisku L2, je vhodné vymeniť aj ložisko L1 z ekonomických dôvodov.

Porucha mohla vzniknúť nesprávnym mazaním, prípadne vibráciami, ktoré boli spôsobené znečistením obežného kola, aj keď používateľ deklaroval pravidelne čistenie od prípadných nánosov. Po nápravných opatreniach, teda po výmene ložísk, bude potrebné dodržiavať mazací plán stanovený výrobcom daného ložiska, aby sa predišlo k predčasnému opotrebovaniu a nevyhnutnej výmene v blízkej budúcnosti. Bolo vhodné na daný ventilátor aplikovať automatický domazávací systém a vykonávať pravidelnú diagnostiku v rámci vytvorenia systému prediktívnej údržby, kedy by sa vo väčšej miere zamedzilo porušeniam funkčnosti strojov a tým aj ekonomickým stratám.



Obr.7 Graf frekvenčního spektra zrychlení vibrací

PodĎakovanie

Tento výskum bol realizovaný s podporou projektu KEGA, číslo grantu 063TUKE-4/2021

Literatúra

- [1] Grundman, R. et al. Ventilatoren. In Vulkan-Verlag GmbH, 2002. Berlin. ISBN 3-8027-3200-6
- [2] Biloš, J. a A. Bilošová. Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora. 1.vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1
- [3] Blata, J. Metody technické diagnostiky. 1.vyd. Ostrava. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. 2010. ISBN 978-80-248-2735-3
- [4] Weis, M. 2022. Vibrodiagnostika ventilátorovej techniky. Bakalárska práca, 2022, Nitra.
- [5] Žarnovský, J., Kováč, I., Mikuš, R., Fries, J, a M. Mošat'. Vibration diagnostics of CNC machining center spindle. In Manufacturing Technology. ISSN 1213-2489, 2019, vol. 19, no. 2, s. 350-356

VIBRIO



NOVÝ DIAGNOSTICKÝ PŘÍSTROJ DO KAŽDÉ ÚDRŽBY





Online diagnostika bez rozváděče

Řada VSE9

Vibrodiagnostická vyhodnocovací jednotka



Vysoké krytí IP67
Robustní provedení
Standardní konektory M12
Software VES004 zdarma
4 měřicí kanály
Analogový i pulzní vstup
2 digitální výstupy
Průmyslové sběrnice
Ethernet TCP / IP
Snadná a rychlá instalace
Akcelerometry IEPE i MEMS
Interní paměť pro data
Nativní konektor do monea



Opravdu zcela bez rozváděče?

Ano. Nabízíme ucelený ekosystém komponent od vyhodnocovacích jednotek, napájecích zdrojů, ethernetových switchů či distributorů napájení 24VDC, které umožní velmi rychlou a bezchybnou instalaci systému bez nutnosti komponenty umísťovat do rozváděče. Zrychlíte tak své projekty a snížíte náklady.

Kde nejvíce ušetřím?

Především na rozváděči samotném a jeho výstroji (svorky, jističe). Pak také na legislativních nákladech, mezi které patří prohlášení o shodě k rozváděči či zbytečně složitá elektrotechnická dokumentace. Nejvýznamnější úsporou však obvykle bývá velmi rychlá implementace a velmi omezené možnosti udělat při instalaci chybu.



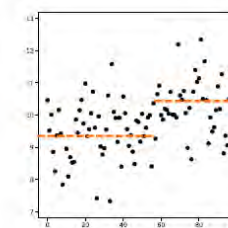
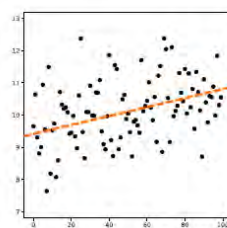
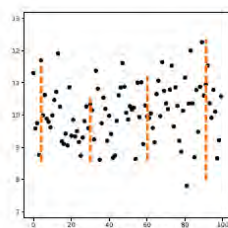
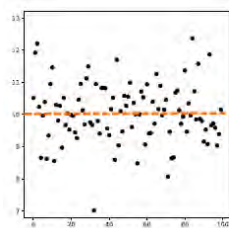
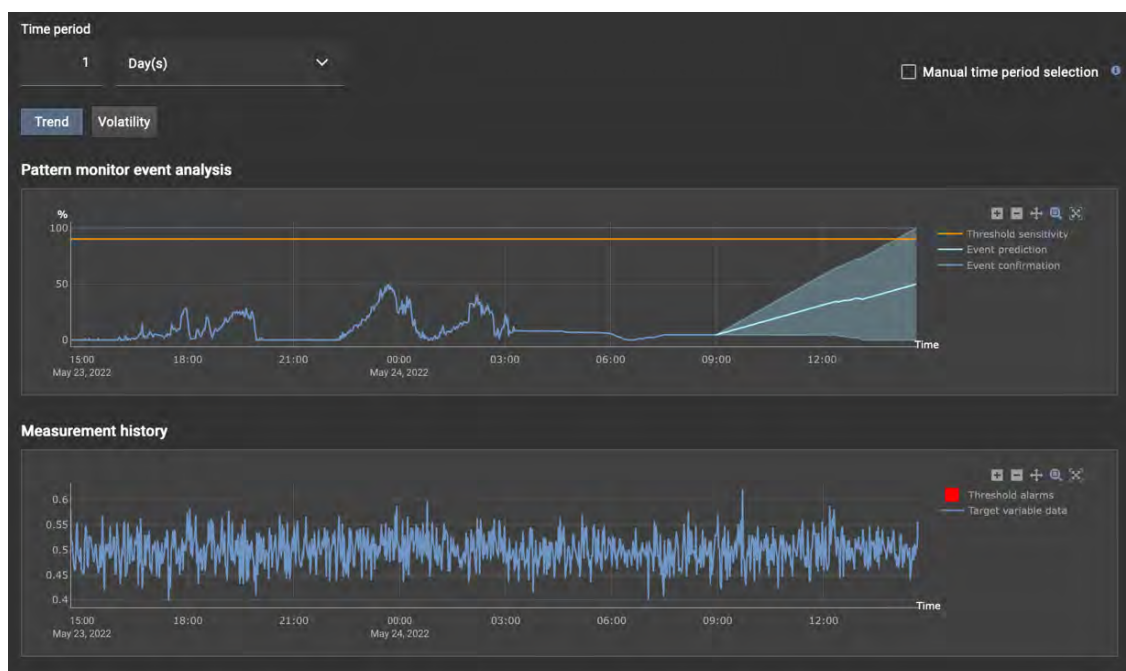
moneo

Digital Science Toolbox



Smart Limit Watcher | Pattern Monitor | Value Predictor | Lifetime estimator

Strojové učení a umělá inteligence IIoT platformy moneo



Co je Digital Science Toolbox?

Jedná se o soubor čtyř nezávislých modulů IIoT platformy moneo, který využívá metod strojového učení a umělé inteligence k tomu, aby uživateli pomáhal s nepřetržitou analýzou dat a upozorňoval je na možné problémy. Velmi užitečným modulem pro vibrodiagnostickou analýzu je tzv. Pattern Monitor, který v signálu akcelerometrů vyhledává specifické vzory (patterns) jakými jsou např. trend, změna volatility nebo skoková změna vibrací.



PROFESS

www.profess.cz

DODAVATEL ZAŘÍZENÍ A SLUŽEB PRO ŘÍZENÍ A SLEDOVÁNÍ CHODU STROJŮ A SPOLEHLIVOSTI A BEZPEČNOSTI PROVOZU

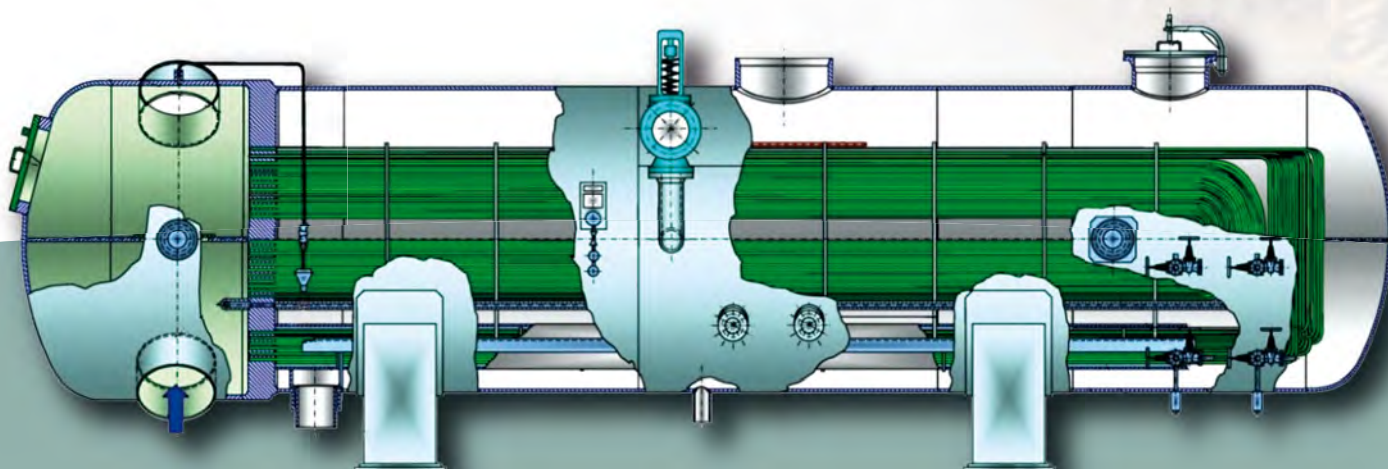
- Systémy pro zabezpečení a ochranu rotačních strojů klasických i jaderných elektráren (primární a sekundární okruh)
- Sběr a vyhodnocení teplotních dat pro sledování ekonomie provozu a diagnostiku technologických komponent sekundárního okruhu JE
- Vibrodiagnostické sledování „zdraví“ strojů
- Poradenství, expertízy, školení, servis

Certifikace pro funkční bezpečnost
TÜV Rheinland – Safety Instrumentation Systems

Partneři:



Zastoupení společnosti:



PROFESIONÁLNÍ PŘÍSTROJE A METODY PRO DIAGNOSTIKU STROJŮ A ZAŘÍZENÍ A ÚSPORU NÁKLADŮ ZA ENERGIE

TERMOKAMERY FLIR

Když potřebujete maximálně kvalitní termokameru, která poskytne nejlepší obraz, přesné měření teplot a rovněž dlouhou životnost se zaručeným a profesionálním servisem, určitě se obrátíte na výrobce s nejdelší historií (od 1958) a největšími zkušenostmi. Výrobce Teledyne FLIR vždy byl a stále je největším výrobcem termokamer na světě a díky tomu může nabídnout termokamery a přístroje pro všechny účely - od kapesních modelů, přes ruční a profesionální přenosné modely až po laboratorní vysoce citlivé systémy či speciální termokamery pro bezpečnostní / vojenské složky. Žádný jiný výrobce nenabízí takové portfolio a zejména kvalitu, odolnost a životnost, jako Teledyne FLIR.

Naše společnost SpektraVision s.r.o. je dlouholetý distributor a PREMIUM Partner Teledyne FLIR a dodává spolu s termokamerami FLIR i profesionální služby v podobě školení, odborných konferencí a servisu (opravy, kalibrace), které dohromady přináší svým uživatelům bezkonkurenční výhody a spolehlivý provoz.

Termokamery FLIR – kvalitní zobrazení a měření nejmenších tepelných změn



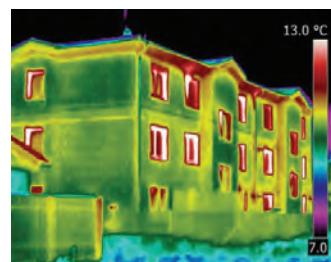
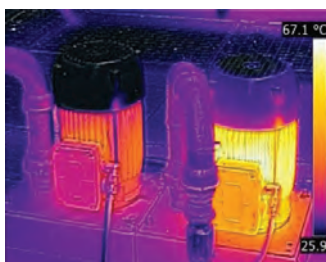
TELEDYNE
FLIR

PREMIUM
PARTNER



Přednosti termokamer FLIR:

- rozlišení snímače až 1024 x 768 (2048 x 1536) bodů
- vysoká citlivost < 20 mK, měření od -40 °C až do +2000 °C
- funkce **MSX** a **UltraMax**, dotykové LCD, WiFi, Bluetooth
- bezkonkurenční záruka 10 let na snímač



Příklady využití:

- diagnostika elektrických rozvodů a zařízení
- diagnostika mechanických strojů a zařízení
- diagnostika staveb a detekce vadné izolace
- kontrola teplot a řízení výrobních procesů

Termokamery FLIR GF – spolehlivá detekce úniků plynů, měření skrz plamen



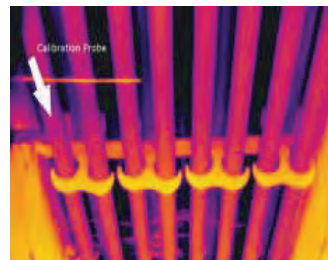
TELEDYNE
FLIR

PREMIUM
PARTNER



Přednosti termokamer FLIR GF:

- vysoké rozlišení snímače až 640 x 480 bodů
- vysoká citlivost až < 15 mK, měření od -40 °C až +1500 °C
- ruční nebo dálkové ovládání a záznam snímků / sekvencí
- použití v prostředí s nebezpečím výbuchu - ATEX



Příklady využití:

- detekce výbušných plynů a těkavých látek
- detekce plynů CO, CO₂, SF₆, čpavku a dalších
- kontrola těsnosti chladírenských zařízení
- měření teplot v pecích přes plamen (petrochemie)

VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY FASTEC a i-SPEED

Vysokorychlostní kamery jsou dnes již nepostradatelným pomocníkem jak v průmyslu, tak zejména při vývoji a testování materiálů. Naše společnost SpektraVision s.r.o. dodává unikátní vysokorychlostní kamery od dvou světových výrobců, a to:

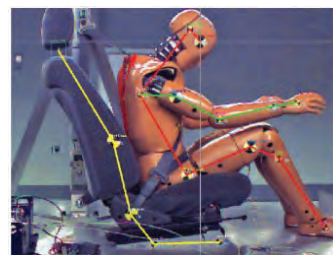
FASTEC Imaging – kompaktní přenosné (**FASTEC TS**) a stacionární (**FASTEC IL a HS**) vysokorychlostní kamery určené zejména pro průmyslové využití

iX Cameras (dříve OLYMPUS) – špičkové laboratorní vysokorychlostní kamery **i-SPEED**, které jsou vzhledem ke svým výjimečným vlastnostem předurčeny pro dosažení nejkvalitnějších videozáznamů v oblasti vývoje a výzkumu materiálů, ultrarychlých dějů, balistiky, crash testů a podobně.

Vysokorychlostní kamery - záznam ultrarychlých dějů ve vysokém rozlišení



iX Cameras

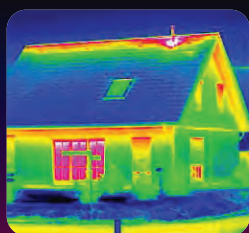


Přednosti kamer i-SPEED a FASTEC:

- záznam ve vysokém rozlišení až 2072 x 1536 bodů
- rychlost záznamu až 2 450 000 fps (snímků / s)
- záznam > 12 700 fps v rozlišení full HD (1920 x 1080 bodů)
- vysoká citlivost, vzdálené ovládání, bezkonkurenční funkce

Příklady využití:

- záznam výrobních a obráběcích strojů a procesů
- vizualizace akustických jevů, vývoj nových materiálů
- pevnostní zkoušky a testování materiálů
- testování účinku zbraní, trhavin, balistika, atd.



SLUŽBY

termovizní měření

natáčení vysokorychlostní kamerou

odborná školení a semináře, poradenství, servis



MĚŘICÍ A DIAGNOSTICKÉ PŘÍSTROJE

analýzátory kvality elektrických sítí

vysokorychlostní kamery

termokamery



„ vidíme svět v celém spektru “

SpektraVision s.r.o.
Kruhová 128
251 01 Nupaky
Česká republika

tel./fax: +420 312 310 258
gsm: +420 608 600 647
e-mail: info@spektravision.cz
web: www.spektravision.cz

Měřicí a diagnostické přístroje pro energetiku a průmysl



Konference DIAGO 2023

Již od roku 1991 firma "TMV SS" spol. s r.o. nabízí měřicí techniku pro diagnostiku a monitoring v různých odvětvích průmyslu, včetně energetiky, nebo ve vývoji a výzkumu. K prodané technice je dodán manuál v českém jazyce, je automaticky provedeno zaškolení a zajištěn hotline pro servis.



» Termokamery InfraTEC a příslušenství pro termografické měření včetně speciálních kamer pro výzkum nebo detekci úniku plynů Opgal



» Přístroje pro testování elektrických ochran, vypínačů, bateriových systémů firmy MEGGER (dříve PROGRAMMA)



» Laserové dálkoměry LASER TECHNOLOGY pro všechny oblasti průmyslu



» Řady přístrojů pro diagnostiku transformátorů firmy MEGGER, jako olejové zkoušečky, převodoměry, ohmmetry nebo testery na diagnostiku přístrojových transformátorů, atd.



» Vysokorychlostní kamery od společnosti AOS pro výrobu a výzkum, s rychlostí záznamu až 100 tisíc snímků za vteřinu a rozlišením téměř Full HD

» On-line monitoringy výkonových transformátorů a přenosný chromatograf společností GE Grid Solutions a KELMAN

» Akustická kamera pro detekci a lokalizaci zdrojů akustického signálu (vysokonapěťové výboje, stavebnictví, únik stlačeného plynu apod.)

» Kamery UVIRCO zobrazující koronovou aktivitu

» Vysokonapěťové zdroje VLF a DC firmy B2 Electronic

» Přístroje pro on-line a off-line monitoring, diagnostiku UPS a bateriových systémů od firmy JOST Elektrotechnik

» Měřicí a monitorovací přístroje kvality SF6 od firmy WIKA - G.A.S. Dortmund

» Termokamery HIKMICRO s unikátním poměrem ceny a výkonu

» Přístroje pro detekci a kvantifikaci částečných výbojů v koncovkách kabelů a v rozvaděčích VN od firmy EA Technology



Obchodní a servisní zastoupení pro ČR a SR:

"TMV SS" spol. s r.o.

Studánková 395, 149 00 Praha 4 - Újezd
tel.: +420 272 942 720, fax: +420 272 942 722
email: info@tmvss.cz, <http://www.tmvss.cz>

POČETNÁ SBÍRKA HISTORICKÝCH MOTOCYKLŮ

Restaurátorská dílna vznikla na Fakultě strojní VŠB-TUO za podpory Moravskoslezského kraje, který v roce 2015 dostal darem početnou sbírku historických motocyklů od akademického sochaře Miroslava Rybičky.

RESTAUROVÁNÍ POMOCÍ MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ

Na restaurování vybraných historických motorek pracují kromě zaměstnanců dílny také studenti, kteří jim co nejšetrněji vrací původní stav a podobu. Využívají při tom moderní technologie reverzního inženýrství, jako jsou aditivní technologie včetně 3D tisku a 3D skenování.

ZAPOJOVÁNÍ STUDENTŮ DO PRAXE

Díky Restaurátorské dílně tak studenti získávají praktické zkušenosti. Restaurátorská činnost se často stává tématem jejich závěrečných prací. Ve fázi příprav je pak otevření unikátní specializace zaměřené na problematiku uchovávání, opravy a udržování historických dopravních prostředků a strojních součástí.

PROPAGACE KRAJE A TECHNICKÉHO VZDĚLÁVÁNÍ

Ročně se v Restaurátorské dílně zrestauruje alespoň jeden historický motocykl, který slouží k propagaci kraje a technického vzdělávání. Díky dlouhodobé spolupráci VŠB – Technické univerzity Ostrava a Moravskoslezského kraje se tak sbírka dokumentuje a zhodnocuje.

A NUMEROUS COLLECTION OF HISTORIC MOTORCYCLES

The Restoration Workshop was established at the Faculty of Mechanical Engineering at VSB-TUO with the support of the Moravian-Silesian Region, which received as a gift a large collection of historic motorcycles from the academic sculptor Miroslav Rybička in 2015.

RESTORATION USING MODERN TECHNOLOGIES

In addition to the workshop employees, students also work on the restoration of selected historic motorcycles, returning them to their original condition and appearance with the utmost care. They use modern reverse engineering technologies, such as additive technologies, including 3D printing and 3D scanning.

INVOLVING STUDENTS IN PRACTICE

Thanks to the Restoration Workshop, students gain practical experience. Restoration activities often become the subject of their final theses. The opening of a unique specialization focused on storage, repair, and maintenance of historic vehicles and machine parts is in the preparation phase.

PROMOTION OF THE REGION AND TECHNICAL EDUCATION

Every year, at least one historic motorcycle is restored in the Restoration Workshop, which serves to promote the region and technical education. Thanks to the long-term cooperation of VSB – Technical University of Ostrava and the Moravian-Silesian Region, the collection is documented, and its value is increasing.



Autor:	Kolektiv autorů
Katedra, institut:	340 - Katedra konstruování
Název:	„DIAGO® 2023“ Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení, sborník 40. mezinárodní vědecké konference
Místo, rok, vydání:	Ostrava, 2023, 1. vydání
Počet stran:	211
Vydala:	Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava 17. listopadu 2172/15 708 00 Ostrava - Poruba
Tisk:	VŠB - TU Ostrava
Náklad:	170 ks
	Neprodejné

ISBN 978-80-248-4656-9