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

pod záštitou
**Ing. Lukáše Vlčka, ministra průmyslu a obchodu ČR**
**Mgr. Marka Výborného, ministra zemědělství ČR**
**PhDr. Marka Ženíška, Ph.D., ministra pro vědu, výzkum a inovace ČR**

# „DIAGO® 2025“

## TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA STROJŮ A VÝROBNÍCH ZAŘÍZENÍ

**KOLEKTIV AUTORŮ**

**SBORNÍK**
**42. MEZINÁRODNÍ VĚDECKÉ KONFERENCE**

**OLOMOUC, 2025**

*Editor :*

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

*Vydavatel :* **VŠB - Technická univerzita Ostrava**
*Počet výtisků :* **on-line**
*Vydáno :* **leden 2025**

Tato publikace neprošla jazykovou úpravou.
Za obsah jednotlivých článků plně zodpovídají uvedení autoři.

**ISBN 978-80-248-4787-0 (on-line)**

**Organizátoři konference :**

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

**Záštita nad konferencí :**

- Ing. Lukáš Vlček — ministr průmyslu a obchodu ČR
- Mgr. Marek Výborný — ministr zemědělství ČR
- PhDr. Marek Ženíšek, Ph.D. — ministr pro vědu, výzkum a inovace ČR

**Patroni konference :**

- prof. RNDr. Václav Snášel, CSc. — rektor VŠB - Technické univerzity Ostrava
- prof. Ing. Robert Čep, Ph.D. — děkan Fakulty strojní, VŠB-TUO

**Hlavní partner :**

- VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ — prof. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D. - ředitel CEET
  Centrum energetických a environmentálních technologií

**Odborní garanti :**

- p. Ondřej Švec, DiS. — TRIFOSERVIS s.r.o., Čelákovice
- doc. Ing. Lukáš Prokop, Ph.D. — VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET
- Ing. Jakub Všolák — ČEZ, a.s., Elektrárna Štěchovice, Štěchovice
- prof. Ing. Milan Honner, Ph.D. — „TMV SS“, spol. s r.o., Praha
- 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-TUO, FS
- doc. Ing. František Helebrant, CSc. — VŠB - Technická univerzita Ostrava, FS

**Organizační výbor :**

- Ing. Ladislav Hrabec, Ph.D. — tajemník ATD ČR, z.s., VŠB-TUO, FS
- Ing. Štěpán Pravda — katedra 340, FS, VŠB-TUO, FS
- Bc. Marcela Dluhošová — katedra 340, FS, VŠB-TUO, FS

**Mediální partner :**

ŘÍZENÍ&ÚDRŽBA průmyslového podniku

Trade Media International

# SEZNAM PŘÍSPĚVKŮ


1. Marek Bělohoubek, Luboš Smolík, Jakub Šulda, Milan Schuster, Yevhenii Vasylchenko. Renata Cápová, Filip Schmidt: VYUŽITÍ BEZPILOTNÍCH PROSTŘEDKŮ A UMĚLÉ INTELIGENCE PŘI MONITOROVÁNÍ STAVU SOLÁRNÍCH PARKŮ ..... 6

2. Rastislav Bernát, Zoltán Záležák, Norbert Kecskés, Roman Gálik, Martin Kotus, Radoslav Majdan, Juraj Jablonický, Miroslav Čurgali: DIAGNOSTIKA A OPRAVA RADIACEHO MECHANIZMU PREVODOVKY CFMOTO GLADIATOR X850 ..... 8

3. Marta Filipová, Petr Kříž: AKTUALITY Z EVROPSKÉ STANDARDIZACE A JEJÍ VÝZNAM PRO KVALITU MOTOROVÝCH PALIV ..... 15

4. Jan Fulneček, Ondřej Kabot, Lukáš Prokop, Stanislav Mišák: ČÁSTEČNÉ VÝBOJE V PROSTŘEDÍ NÍZKÉHO ATMOSFÉRICKÉHO TLAKU ..... 16

5. Alena Hájková, Miloš Hammer: NOVÉ TRENDY V TECHNICKÉ DIAGNOSTICE ..... 17

6. Jan Hyrát, Vít Horáček, Andrea Kolínková: PROBLEMATIKA RUN-OUTU PŘI MĚŘENÍ ROTOROVÝCH VIBRACÍ POMOCÍ SNÍMAČŮ PRACUJÍCÍCH NA PRINCIPU VÍŘIVÝCH PROUDŮ ..... 24

7. Ladislav Chalánek: VYUŽITÍ ONLINE DIAGNOSTIKY PRO DETEKCI POŠKOZENÍ VALIVÝCH LOŽISEK ..... 25

8. Piotr Cheluszka: IMPLEMENTATION OF THE OPERATING PARAMETER SETTING SYSTEM IN THE ROADHEADER RESEARCH SIMULATOR FOR DIAGNOSTICS OF AUTOMATIC CONTROL OF THE ROCK MINING PROCESS ..... 31

9. Ondřej Kabot, Jan Fulneček, Lukáš Prokop, Stanislav Mišák: VN POLYGON PRO TESTOVÁNÍ BEZKONTAKTNÍCH METOD NA DETEKCI ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ ..... 47

10. Tomasz Kądziołka: BADANIA DIAGNOSTYCZNE MECHANICZNEJ TRAKTURY ORGANÓW PISZCZAŁKOWYCH ..... 48

11. Jan Kovář: ČERNÁ TĚLESA - JEJICH VLASTNOSTI A KONSTRUKCE ..... 49

12. Sławomir Kowalski: DIAGNOSTYKA UKŁADU WYDECHOWEGO W KONTEKŚCIE OCENY EMISJI ZWIĄZKÓW SZKODLIWYCH SPALIN ..... 50

13. Sven Künkel, Ondřej Suchý: OVLIVNĚNÍ PIEZOELEKTRICKÝCH AKCELEROMETRŮ PROVOZEM PŘENOSNÝCH VYSÍLAČEK ..... 51

14. Karel Marschner: CHEMOMETRIE A INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE: MODERNÍ NÁSTROJE PRO ANALÝZU VLASTNOSTÍ PALIV ..... 56

15. Zbigniew Matuszak, Iwona Żabińska: UWAGI O POLIOPTYMALIZACJI W DIAGNOZOWANIU MASZYN ..... 57

16. Stanisław Mikuła, Daniel Adamecki, Wojciech Grzegorzek: ZWIĘKSZENIE WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH KÓŁ ZĘBATYCH OBRÓBKĄ POWIERZCHNIOWĄ ..... 61

17. Stanisław Mikuła, Wojciech Grzegorzek, Daniel Adamecki: WZMOCNIENIE ZAWORÓW SILNIKOWYCH OBRÓBKĄ POWIERZCHNIOWĄ ..... 69

18. Marek Moravič, Janka Šaderová: MONITORING AKO NÁSTROJ PREDIKCIE PORÚCH POTRUBNÉHO DOPRAVNÍKA ..... 82

19. Petr Nahodil: ŘEŠENÍ VYSOKÉHO THD FAKTORU SPOJENÉHO S OTEPLENÍM VÝVODNÍCH VODIČŮ SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU ..... 89

20. Jan Otoupalík: DIAGNOSTIKA POMALUBĚŽNÝCH LOŽISEK A LINEÁRNÍCH VEDENÍ ..... 97

21. Martin Paumer, Michal Loman, Ján Kosiba, Martin Nagy: THE IMPACT OF ROAD TRANSPORT ON AIR POLLUTION ..... 102

22. Eryk Remiorz, Stanisław Mikuła: DEFEKTOSKOPIA MAGNETYCZNA W EKSPLOATACYJNEJ DIAGNOSTYCE KÓŁ ŁAŃCUCHOWYCH UKŁADÓW CIĄGNIENIA MASZYN GÓRNICZYCH ..... 111

23. Václav Straka, David Kuboš, Pavel Petráň, Mikoláš Choura: ANALÝZA PRUŽNÉ DEFORMACE ZA VYUŽITÍ IR NDT ..... 122

24. Václav Straka, Pavel Zítek, Antonín Krňoul: PROSTŘEDKY MONITORINGU VÝKONOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ ..... 123

25. Štěpán Svoboda: „KOUZELNÉ“ TEPELNĚ IZOLAČNÍ A REFLEXNÍ NÁTĚRY - MÝTY A PRAXE Z POHLEDU TERMOGRAFIE ..... 124

26. Michal Švantner, Milan Honner, Alexey Moskovchenko, Lukáš Muzika, Martin Valenta, Rudolf Vávra: DETEKCE POVÝSTŘELOVÝCH ZPLODIN POMOCÍ METOD INFRAČERVENÉHO NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ ..... 125

27. Ondřej Švec: TRIBODIAGNOSTIKA MOTOROVÝCH OLEJŮ ..... 127

28. Zdeněk Veselý, Vladislav Lang, Jiří Tesař: VÝVOJ SPECIALIZOVANÝCH IR KAMER PRO OPTIMALIZACI TECHNOLOGIE 3D TISKU PLASTŮ ..... 130

29. Zoltán Záležák, Rastislav Bernát, Norbert Kecskés, Zdenko Tkáč, Juraj Jablonický, Martin Kotus, Miroslav Čurgali: ANALÝZA OPOTREBOVANIA OBRÁBACIEHO STROJA POMOCOU VIBRODIAGNOSTIKY ..... 131

30. Jozef Žarnovský, Rastislav Mikuš, Ivan Kováč, Martin Baráth, Lukáš Bojo: ANALÝZA SPOĽAHLIVOSTI STROJNÝCH ZARIADENÍ VYUŽÍVANÝCH V KAMEŇOLOME ..... 137

# VYUŽITÍ BEZPILOTNÍCH PROSTŘEDKŮ A UMĚLÉ INTELIGENCE PŘI MONITOROVÁNÍ STAVU SOLÁRNÍCH PARKŮ

# THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR CONDITION MONITORING OF SOLAR PARKS

**Marek BĚLOHOUBEK**, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. [1]
**Luboš SMOLÍK**, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. [2]
**Jakub ŠULDA**, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. [3]
**Milan SCHUSTER**, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. [4]
**Yevhenii VASYLCHENKO**, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. [5]
**Renata CÁPOVÁ**, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. [6]
**Filip SCHMIDT**, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. [7]

**Anotace:**

Fotovoltaické (FtV) panely mohou vykazovat celou řadu závad, které snižují jejich výkon. Vzhledem k tomu, že monitorované elektrické veličiny se většinou týkají více panelů zapojených v sérii, často se pro detekci závad a identifikaci vadného panelu využívají vizuální zkoušky a pasivní infračervená termografie. Pochůzková měření ručním přístrojem jsou časově velmi náročná i pro zkušeného diagnostika, a proto se v solárních parcích v posledních letech prosazuje sběr dat pomocí bezpilotních prostředků vybavených pasivní termokamerou. Během jediné mise však vznikne velké množství fotografií a termosnímků, jejichž manuální zpracování je neefektivní.

Tento příspěvek ukazuje, jak lze využít umělou inteligenci (AI) ke zpracování těchto dat, konkrétně k automatické detekci teplotních anomálií a klasifikaci závad. Představený přístup demonstruje, jak AI může zvýšit efektivitu analýzy dat a umožňuje rychlejší a přesnější rozhodování při údržbě solárních parků. Dále jsou diskutovány možnosti dalšího rozšíření automatického monitorování, zejména lokalizace vadných FtV panelů.

[1] Ing. Marek Bělohoubek
Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.
Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň
e-mail: belohoubek@vzuplzen.cz, https://www.vzuplzen.cz/
[2] Ing. Luboš Smolík, Ph.D., CTD
tel.: +420 371 430 792, mobil: +420 601 070 204, e-mail: smolik@vzuplzen.cz
[3] Ing. Jakub Šulda
e-mail: sulda@vzuplzen.cz
[4] Ing. Milan Schuster, CSc.
e-mail: schuster@vzuplzen.cz
[5] Yevhenii Vasylchenko
e-mail: vasylchenko @vzuplzen.cz
[6] Ing. Renata Cápová, CTD
e-mail: capova@vzuplzen.cz
[7] Ing. Filip Schmidt, CTD
e-mail: schmidt@vzuplzen.cz

**Annotation:**

Photovoltaic (PV) panels can exhibit a number of faults that reduce their performance. Monitored electrical quantities usually characterise the state of a circuit with multiple connected panels. Therefore, inspections involving visual testing and passive infrared thermography are often used to detect faults and identify faulty panels. Thermographic inspections with handheld devices are time-consuming, even for an experienced diagnostician. For that reason, data acquisition with unmanned aerial vehicles equipped with passive thermal imaging cameras has become popular in recent years. However, hundreds to thousands of photographs and thermograms are taken during a single mission, which is tedious to process manually.

This paper shows how artificial intelligence (AI) can be used to automatically detect temperature and visual anomalies in such data and classify faults. The presented approach demonstrates how AI can increase the efficiency of data analysis and enable faster and more accurate decision-making in solar farm maintenance. It also discusses possibilities for further extensions of automated condition monitoring, in particular, the localisation of faulty PV panels.

(úplný text příspěvku nebyl autory do termínu uzávěrky sborníku konference zaslán)

# DIAGNOSTIKA A OPRAVA RADIACEHO MECHANIZMU PREVODOVKY CFMOTO GLADIATOR X850

# DIAGNOSTICS AND INNOVATION OF THE WELDING PROCESS OF THE MANIPULATION EYE

**Rastislav BERNÁT**, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF [1]
**Zoltán ZÁLEŽÁK**, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF [2]
**Norbert KECSKÉS**, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, FEM [3]
**Roman GÁLIK**, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF [4]
**Martin KOTUS**, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF [5]
**Radoslav MAJDAN**, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF [6]
**Juraj JABLONICKÝ**, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF [7]
**Miroslav ČURGALI**, DT Transport, s.r.o., Nitra, Slovensko [8]

**Anotácia:**

Dosiahnutie bezporuchového stavu dopravných prostriedkov v prevádzke si vyžaduje použitie kvalitných materiálov a samotnú spoľahlivosť jednotlivých konštrukčných celkov. V príspevku sa zaoberáme na základe požiadaviek praxe a opakovanej poruchovosti hnacieho ústrojenstva, diagnostikou jednotlivých komponentov prevodovky a jej častí. Na základe podrobnej analýzy jednotlivých častí převodovky ďalej riešime systematický návrh efektívnej opravy a zavedením inovácie do výroby a montážnych postupov. Jedná sa o prevodové ústrojenstvo profesiálneho pracovného stroja - štvorkolky CFMOTO Gladiator x850, využívaných v ťažkých podmienkach. Navrhnuté a aplikované inovatívne rie-

[1] Ing. Rastislav Bernát, PhD.
Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Technická fakulta
Ústav konštruovania a strojárskych technológií
Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra, Slovenská republika
mobil: +421 903 816 302, e-mail:rastislav.bernat@uniag.sk, https://uniag.sk/sk/
[2] Ing. Zoltán Záležák, PhD.
tel.: +421 37 641 5796, +421 37 641 5688, e-mail: zoltan.zalezak@uniag.sk
[3] Mgr. Norbert Kecskés, PhD.
Fakulta ekonomiky a manažmentu, Ústav štatistiky, operačného výskumu a matematiky
mobil: +421 903 484 964, e-mail: norbert.kecskes@uniag.sk
[4] 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
[5] doc. Ing. Martin Kotus, PhD.
Ústav konštruovania a strojárskych technológií
tel.: +421 37 641 5689, +421 37 641 5698, e-mail: martin.kotus@uniag.sk
[6] doc. Ing. Radoslav Majdan, PhD.
Ústav poľnohospodárskej techniky, dopravy a bioenergetiky
tel.: +421 37 641 4618, e-mail: radoslav.majdan@uniag.sk
[7] prof. Ing. Juraj Jablonický, PhD.
Ústav poľnohospodárskej techniky, dopravy a bioenergetiky
tel.: +421 37 641 4611, e-mail: juraj.jablonicky@uniag.sk
[8] Ing. Miroslav Čurgali, PhD.
DT Transport, s.r.o.
Štefánikova Trieda 74/50, 949 01 Nitra, Slovenská republika
tel.: +421 903 284 934, e-mail: miroslav.curgali@transdev.com

šenie radiaceho mechanizmu prevodovky bolo zavedené do opravárenských postupov pracovísk.

**Annotation:**

Achieving a fault-free condition of transportation vehicles requires the use of high-quality materials and reliable structural units. Due to the requirements of practice and the repeated failure rate of the driving mechanism we deal with the diagnostics of individual components of the gearbox. Based on a detailed analysis of the gearbox, we propose a systematic design of effective repairs and the introduction of innovation into production and assembly procedures. The paper deals with the gearbox of a professional work machine - the CFMOTO Gladiator x850 quad bike, used in difficult conditions. The proposed and applied innovative solution for the gearbox shifting mechanism was introduced into the repair procedures.

## 1 Úvod

Diagnostika hnacieho ústrojenstva vozidiel je dôležitou súčasťou bezporuchovej prevádzkyschopnosti a spokojnosti užívateľa. Správna a dobre načasovaná diagnostika jednotlivých častí úšetrí nemalé finančné prostriedky vzhľadom na priebeh realizácie opravy, dodávky náhradných dielov a opakovateľnosti diagnostiky v stanovených časových intervaloch. V našomm príspevku sme sa zamerali na servisné a opravárenské postupy štvorkoliek CFMOTO Gladiator x850, kde sme diagnostikou analyzovali chybu hnacieho ústrojenstva pri radení prevodových stupňou v snahe eliminovať celkový čas vozidla v servise. Zároveň, bolo potrebné navrhnúť súbor inovačných opravárenských úkonov na odstránenie daného problému s prijatelnými finančnými nárokmi.

Jeden z hlavných dôvodov použitia prevodovky vo vozidle je výkonnosť a momentová charakteristika spaľovacieho motora, z ktorej vyplýva rozsah maximálnych otáčok, pri ktorých má vysoký výkon potrebný na pohyb vozidla a zníženie spotreby paliva. Je prínosom na dosiahnutie vyšších rýchlostí vozidla, ako by bolo možné pri použití len jedného stáleho prevodu a mení prevod medzi motorom a hnacími kolesami tak, aby sa udržali maximálne otáčky motora pri rôznych rýchlostiach a režimoch jázd. Je dôležitým bezpečnostním prvkom pri brzdení začlenením nižšieho prevodového stupňa, k čomu využíva kompresný tlak v spaľovacom priestore motora.

## 2 Metodika

### 2.1 Charakteristika prevodovky CFMOTO Gladiator x850

Prevodovku motora CFMOTO Gladiator x850 rozdeľujeme na 2 časti: radiaciu a prevodovú. Princíp fungovania prvej časti - radenia rýchlostí je jednoduchý a kľúčovou súčiastkou je tzv. stromček radenia prevodovky.

Obr.1 Stromček radenia prevodovky

Prvá časť prevodovky nám umožňuje radenie rýchlostí, na základe spojenia radiacej páky spolu so sektorovým radiacim kolíkom cez ktorý sa pri radení prenášaná energia na hnaciu sektorovú výstroj. Táto výstroj sú spojena s radiacimi vidličkami v presných drážkách a prostredníctvom pohybu posuvného rotačného bubna sa zabezpečí spájanie ozubení v druhej časti prevodovke. Ďalšie časti radenia prevodovky sú zobrazené na obrázku 2.

Obr.2 Časti radenia převodovky

Pri zaradení rýchlostného stupňa L a H spájajú ozubenie s ozubením. To zabezpečuje pohyb štvorkolky smerom dopredu. Pri zaradenom rýchlostnom stupni N nie je spojené ani jedno ozubenie, čo znamená že máme zaradený neutrál a nemá nám ktoré ozubenie zaberať. Pri zaradenom rýchlostnom stupni R spája druhá vidlička ďalšie ozubenia. Tento stav prevodovky nám umožňuje pohyb štvorkolky smerom dozadu.

Pri poslednej možnosti zaradenia rýchlosti P - parking nemáme ani jednu z vidličiek v pozícii, keď spájajú ozubenia. Je to rovnaký stav ako pri zaradenom rýchlostnom stupni N. Parkovacie rameno zaprie do jedného z vývodových ozubených kolies, čím znemožní pohyb prevodovky a tým pádom sa so štvorkolkou nedá hýbať.

## 2.2 Meracie zariadenia

Rozmerovú presnosť a opotrebenie overíme pomocou 3D prístroja Mitutoyo. Na základe systematických porúch počas prevázky prevodovky je potrebné namerané hodnoty anylyzovať a porovnať s hodnotami predpísaného od výrobcu.

Obr.3 Meracie zariadenie - STRATO-Active Series 700

STRATO-Active Series 700 od výrobcu Mitutoyo je vysoko presné CNC, CMM zariadenie, navrhnuté tak, aby poskytovalo špičkový skenovací výkon s vysokou presnosťou merania, s možnosťou pre dotykovú spúšťovú sondu, skenovaciu sondu, optickú sondu vrátane laserovej skenerovej sondy.

Hlavné výhody:

- vysoká presnosť,
- vysoká rýchlosť a zrýchlenie,
- teplotná kompenzácia od 18 ºC do 22 ºC vrátane obrobku (2 kontaktné snímače),
- úspora času bez nutnosti navádzania a vysoká odolnosť voči vplyvom prostredia,
- žulový pracovný stôl so závitom M8,
- voliteľný multifunkčný joystick s dvoma páčkami a gombíkom na nastavenie rýchlosti.

## 2.3 Analýza poškodenia prevodovky radenia

Mechanizmus radenia na prevodovke štvorkolky má 5 stupňov rýchlosti radenia. Jedná sa o stupne: L-H-N-R-P. Rýchlosti radíme cez riadiacu páku manuálne.

Po podrobnej analýze poruchy s radením so spiatočkovým prevodovým stupňům „R“ je potrebné postupovať podľa demontážneho postupu, následne analyzovať samotné konštrukčné riešenie a príčinu poruchy, nadefinovať inováciu a preveriť funkčnosť inovácie.

Diely prevodky je potrebné dôkladne analyzovať a k simulácií správnej funkcií jednotlivých častí prevodovku z časti zložiť a nasimulovať priebeh radenia všetkých rýchlostí.

Postup simulácie správnej funkcie:

1. Prevodovku poskladáme tak, aby sme východzí rýchlostný stupeň mali nastavený na N - neutrál
2. Nasleduje simulácia radenia rýchlosti H a L
3. Nasleduje simulácia radenia rýchlostného stupňa „R“ - identifikácia problému

4. Vznik poruchy radenia: radiaca vidlička sa zasekla - pri simulovanom otáčaní posunovacieho bubna sa vidlička po nosnom hriadeli nepohybovala čím znemožnila vyradenie rýchlostného stupňa R - spiatočka

Poruchu môže spôsobovať rozmerová presnosť nosného hriadeľa alebo rozmerová presnosť vnútorného priemeru radiacej vidličky.

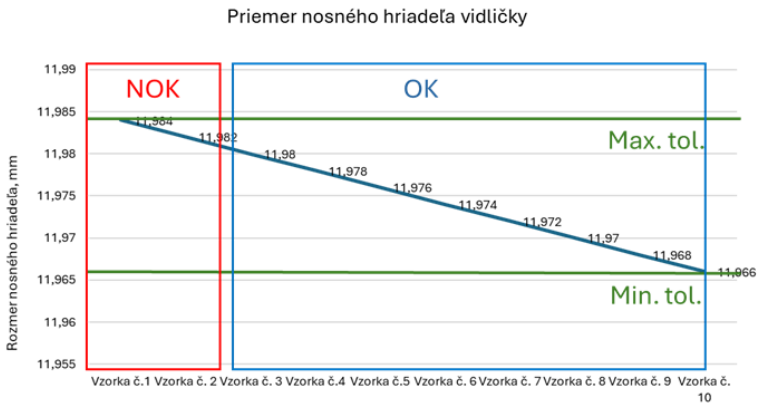
## 3 Výsledky

Tab.1 Modelové situácie riešenia opravy

| Nosný hriadeľ | Vzorka č.1 | Vzorka č.2 | Vzorka č.3 | Vzorka č.4 | Vzorka č.5 | Vzorka č.6 | Vzorka č.7 | Vzorka č.8 | Vzorka č.9 | Vzorka č.10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rozmer [mm] | 11,984 | 11,982 | 11,980 | 11,978 | 11,976 | 11,974 | 11,972 | 11,970 | 11,968 | 11,966 |
| Funkč. rad. mechanizmu L,H R P N | NOK „R“ | NOK „R“ | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK |

a) b)

Obr.4 Vidlička (a), nosný hriadeľ vidličky (b)




Obr.5 Modelové nosné hriadele vidličiek

Radiaca vidlička mala stanovenú toleranciu podľa výrobného manuálu 12H7. V technických tabuľkách máme tento rozmer tolerovaný na 12 mm, horná toler. medza +0.018 mm, dolná toler. medza +0 mm. Nameraná hodnota vnútorného priemeru radiacej vidličky bola 12,012 mm. Táto hodnota spĺňa požiadavky stanoveného rozmeru od výrobcu.

Nosný hriadeľ mal stanovenú toleranciu podľa výrobného manuálu 12f7. V technických tabuľkách máme tento rozmer tolerovaný na 12 mm, horná toler. Medza -0.016 mm, dolná toler. medza -0.034 mm. Nameraná hodnota priemeru hriadeľu bola 11,984 mm. Táto hodnota spĺňa požiadavky stanoveného rozmeru od výrobcu. Rozmer je presne na hranici tolerancie a preto sme sa rozhodli vykonať simulácie s viacerými vzorkami.

Pri poškodení prevodovky sme analýzou a simuláciou radenia rýchlostí dospeli k záveru, že poškodeným, resp. nesprávne použitým dielom, bol nosný hriadeľ. Po simulácii viacero možností priemerov hriadeľu sme určili maximálny priemer nosného hriadeľa. Hriadeľ nejavil známky poškodenia, avšak pri používaní štvorkolky sa mohli časom objaviť problémy s radením rýchlostného stupňa R ako uvádzame vyššie. Oprava samotnej prevodovky s radením je pre servis náročná a preto navrhujeme inováciu s novými hodnotami rozmerov dielov radiaceho mechanizmu.

## 4 Záver

V našej výskumnej práci sme diagnostikovali a analyzovali prevádzkové poruchy prevodovky motora CFMOTO Gladiator x850. Pri komplexnej analýze činnosti prevodovky sme zistili prevádzkovú poruchu pri radení R-kového prevodového rýchlostného stupňa a to konkrétne pri vyraďovaní tohoto stupňa. Po kontrole rozmerov jednotlivých častí radiaceho mechanizmu na 3D zariadení sme konštatovali dodržanie všetkých výkresových hodnôt jednotlivých častí. V experimnetálnej časti našej práce a vyrobení vzoriek ktoré spĺňajú tolerančné medze sme dospeli k záveru, že horné hraničné rozmery nie sú ideálne pre správne fungovanie navrhnutej prevodovky. Preto odporúčame tieto výkresové hodnoty nosného hriadeľa vidličky posunúť v rozmedzí od hornej hodnoty 11,980 mm do dolnej hodnoty priemeru 11,966 mm.

Porovnaním získaných hodnôt z viacerých prevodoviek pri opakovatelnosti jednotlivých meraní sme dospeli k celkovému záveru, že radiaca vidlička s nameranými hodnotami je tiež vyrobená presne podľa výrobného výkresu výrobcu a jej namerané hodnoty radiacej vidličky boli v stanovenej tolerancii, Vzhľadom na technickú a ekonomickú efektivitu celého opravárenského procesu odporúčame zmeniť tolerančné polia nosného hriadeľa radiacej vidičky a dosiahnuť tak bezporuchový stav nových súčastí prevodových ústrojenstiev.

**Poďakovanie:**

Tento príspevok vznikol v spolupráci s TD Transport s.r.o., Nitra ako prepojenie výskumnej činnosti Technickej fakulty SPU v Nitre s opravárenskou praxou v doprave.

**Literatura:**

[1] Bujna, M., Prístavka, M., Polák, P., Földešiová, D. Využitie metódy FMEA pri posúdení rizík v automobilovom priemysle. In *Bezpečnosť - Kvalita - Spoľahlivosť*.

1. vyd. 1 CD-ROM (285 s.). ISBN 978-80-553-2044-1. Bezpečnosť-kvalita-spoľahlivosť. Košice : Technická univerzita, 2015, s. 20-25, CD-ROM

[2] Gscheidle, R. a kol. 2002. *Příručka pro automechanika*. Praha: Akademické nakladatelství 2002, 650 s. ISBN 80-8592-083-2

[3] Jablonický, J., Hujo, Ľ., Tkáč, Z. 2015. *Motorové vozidlá : mechanizmy motorových vozidiel*. 1. vyd. Nitra : Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2015. 163 s. ISBN 978-80-552-1347-7

[4] Korenko, M., Drlička, R., Olejár, M., Cviklovič, V., Pap, M., Bujna, M. *Zariadenie na meranie procesných veličín pri osových operáciách : zverejnená prihláška č. 14-2015 : dátum zverejnenia 3.11.2015*. 1. vyd. Banská Bystrica : Úrad priemyselného vlastníctva Slovenskej republiky, 2015. 5 s

[5] Tokovska, M., Zaťková, T. Š., Jamborová, Ľ. (2022). Digital competencies development in higher education institutions: A mixed methods research study

[6] Tkáč, Z., Kangalov, P.G., Kosiba, J. Getting ecological of hydraulic circuits of agricultural tractors. 1st. ed. Ruse : University of Rousse “Angel Kanchev”, 2014. 120 s. ISBN 978-619-7071-63-4. In *Emerging Science Journal*, 6 (Special Issue), 150-165. 10.28991/ESJ-2022-SIED-011

# AKTUALITY Z EVROPSKÉ STANDARDIZACE A JEJÍ VÝZNAM PRO KVALITU MOTOROVÝCH PALIV

# UPDATE ON EUROPEAN STANDARDIZATION AND ITS RELEVANCE TO THE QUALITY OF MOTOR FUELS

**Marta FILIPOVÁ**, Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, Praha [1]
**Petr KŘÍŽ**, Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, Praha [2]

**Anotace:**

Kvalita motorových paliv je v zemích EU i v ČR specifikována prostřednictvím legislativy, která činí právně závaznými příslušné evropské technické normy pro jednotlivé druhy paliv. V současné době existuje celkem 13 druhů motorových paliv, která jsou jednotně specifikovaná ve všech zemích EU. Příspěvek si klade za cíl ukázat vývoj v oblasti standardizace motorových paliv v posledních letech a předpokládaný vývoj v nejbližších letech budoucích na konkrétních příkladech motorových paliv a jejich parametrů, které ovlivňují kvalitu paliva, kompatibilitu s motory a ochranu životního prostředí v rámci probíhající dekarbonizace dopravy.

**Annotation:**

The quality of motor fuels is specified in the EU countries and in the Czech Republic by means of legislation which makes the relevant European technical standards for individual types of fuels legally binding. There are currently 13 types of motor fuels that are uniformly specified in all EU countries. The paper aims to show the development in the field of standardisation of motor fuels in recent years and the expected developments in the coming years by using specific examples of motor fuels and their parameters that affect fuel quality, engine compatibility and environmental protection in the context of the ongoing decarbonisation of transport.

(úplný text příspěvku nebyl autory do termínu uzávěrky sborníku konference zaslán)

[1] Ing. Marta Filipová
Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, Odbor plynárenství a kapalných paliv
Na Františku 32, 110 15 Praha 1
tel.: +420 224 852 588, e-mail: filipova@mpo.gov.cz, https://mpo.gov.cz/
[2] Ing. Petr Kříž
tel.: +420 224 853 339, mobil: +420 601 693 076, e-mail: kriz@mpo.gov.cz

# ČÁSTEČNÉ VÝBOJE V PROSTŘEDÍ NÍZKÉHO ATMOSFÉRICKÉHO TLAKU

**Jan FULNEČEK**, VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET [1]
**Ondřej KABOT**, VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET [2]
**Lukáš PROKOP**, VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET [3]
**Stanislav MIŠÁK**, VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET [4]

**Anotace:**

V oblasti letecké techniky se dostává do popředí zájmu problematika elektricky poháněných letadel. Zdrojem elektrické energie mohou být v takovém případě teoreticky jak baterie, tak např. také palivové články. Cílem těchto výzkumných aktivit je snížit dopad letecké přepravy na životní prostředí a již vznikly i první prototypy elektrických letadel typu ultralight.

Tato elektrifikace však naráží na překážky způsobené fyzikálními vlastnostmi plynných dielektrik. S rostoucí výškou klesá atmosférický tlak, což má negativní dopad na elektrickou pevnost plynných dielektrik a přestup tepla do okolí. Nástup elektrických letadel tak představuje novou řadu výzev pro oblast diagnostiky elektrických zařízení, a to zejména v oblasti detekce částečných výbojů.

(úplný text příspěvku nebyl autory do termínu uzávěrky sborníku konference zaslán)

[1] doc. Ing. Jan Fulneček, Ph.D., CTD
Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Centrum energetických a environmentálních technologií
17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava - Poruba
tel.: +420 596 993 449, e-mail: jan.fulnecek@vsb.cz, https://ceet.vsb.cz/cs
[2] Ing. Ondřej Kabot, Ph.D., CTD
tel.: +420 596 993 449, e-mail: ondrej.kabot@vsb.cz, https://ceet.vsb.cz/cs
[3] doc. Ing. Lukáš Prokop, Ph.D., CTD
tel.: +420 596 999 306, e-mail: lukas.prokop@vsb.cz
[4] prof. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D., CTD
tel.: +420 596 999 308, e-mail: stanislav.misak@vsb.cz

# NOVÉ TRENDY V TECHNICKÉ DIAGNOSTICE

# NEW TRENDS IN TECHNICAL DIAGNOSTICS

**Alena HÁJKOVÁ**, Vysoké učení technické v Brně, FSI [1]
**Miloš HAMMER**, Vysoké učení technické v Brně, FSI [2]

**Anotace:**

Příspěvek je zaměřen na popis vznikajících nových trendů v technické diagnostice, které se začínají řešit na našem pracovišti. Je představeno možné blokové schéma uvedeného, jednotlivé části jsou stručně popsány a rozebrány. V článku je dále uveden vybraný příklad řešení, který se realizoval v rámci řešení výzkumných úkolů na VUT FSI v Brně. Konkrétně se jedná v tomto příspěvku o využití vibrodiagnostiky, pomocí vibrodiagnostiky o získání dat, a to s cílem identifikace závady na ložisku s využitím nového přístupu hodnocení dat - neuronových sítí. Je popsáno získání vibrodiagnostických dat pomocí reálného modelu, který je na našem pracovišti k řešení výzkumných úkolů k dispozici. Model je popsán a je proveden popis zpracování uvedených získaných dat. Následně je stručně pojednáno o neuronových sítích. Těžiště příspěvku je ve využití vybraných neuronových sítí právě ke zpracování získaných vibrodiagnostických datových souborů. Výsledky jsou stručně vyhodnoceny vzhledem k závadám na sledovaném ložisku.

**Annotation:**

The contribution is focused on the description of emerging new trends in technical diagnostics, which are beginning to be addressed at our workplace. A possible block diagram of the aforementioned is presented, individual parts are briefly described and analyzed. The article also presents a selected example of a solution that was implemented as part of solving research tasks at BUT FSI in Brno. Specifically, this contribution deals with the use of vibrodiagnostics, using vibrodiagnostics to obtain data, with the aim of identifying a bearing fault using a new data evaluation approach - neural networks. The acquisition of vibrodiagnostic data using a real model, which is available at our workplace for solving research tasks, is described. The model is described and a description of the processing of the data obtained is provided. Subsequently, neural networks are briefly discussed. The focus of the paper is on the use of selected neural networks to process the obtained vibrodiagnostic datasets. The results are briefly evaluated with respect to defects in the monitored bearing.

## 1 Úvod

V dnešní době se setkáváme se značným rozvojem automatizace a digitalizace. Uvedené je obecně označováno jako „Průmysl 4.0“. Toto dění se samozřejmě nevyhýbá ani všem oborům technické diagnostiky a údržby. V odborné literatuře a samotné

[1] Ing. et Ing. Alena Hájková
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
Technická 2896/2, 616 69 Brno
mobil: +420 728 964 249, e-mail: alena.hajkova@vutbr.cz, https://www.vut.cz/
[2] doc. Ing. Miloš Hammer, CSc., CTD
tel.: +420 541 142 194, mobil: +420 728 888 597, e-mail: hammer@fme.vutbr.cz

technické praxi lze spatřovat různé přístupy, postupy a i trendy. Záleží na samotném přístupu jednotlivých řešitelů, jejich zaměření a také na jednotlivých firmách.

Na našem pracovišti se technickou diagnostikou a údržbou zaobíráme dlouhou dobu, a to jak po stránce teoretické, tak také se zaměřením na průmyslovou praxi.

## 2 Naznačení nových trendů v diagnostice

Následující kapitola se věnuje blokovému schématu, které ukazuje obecně náš přístup k řešení složité problematiky, a to s akceptováním existujících moderních znalostí v automatizaci a informatice. Tyto vědní oblasti se v současné době značně prolínají, v technice je nelze nyní oddělovat a řešit samostatně, jak tomu bylo ještě před několika roky.

Je třeba zdůraznit, že se naše pracoviště z hlediska diagnostiky věnuje poměrně intenzivně vibrodiagnostice, elektrodiagnostice a dle potřeby i tribodiagnostice a dalším diagnostickým metodám. Zdůrazňujeme multiparametrický přístup, který je nezbytný pro posouzení stavu strojů a jiných technických zařízení. Prosazují se i značně se rozvíjející metody umělé inteligence, jako jsou neuronové sítě, fuzzy systémy či systémy expertní [5]. V dnešní době je také třeba vnímat pokroky v dalších oblastech, jako je například analýza rizik apod.

Na obr.1 je naznačen model [5] u nás používaných moderních trendů v technické diagnostice a rovněž s tím související údržbě. Jak bylo uvedeno, používáme k hodnocení datových souborů i neuronových sítí.

Model dle obr.1 obsahuje některé důležité bloky a s tím související názvy a pojmy, které budou dále stručně popsány. Je třeba uvést, že v modelu jsou uvedeny diagnostické prostředky od firmy ADASH spol.s.r.o., které jsou k dispozici na naší fakultě či pracovišti.

Technická diagnostika je zaměřena na různé diagnostické objekty, dle obrázku se jedná např. o obráběcí stroje, různé elektrické motory, ventilátory atd. Naše činnost se nejprve soustřeďovala na teoretické a praktické řešení off-line diagnostiky. Řešila se otázka analyzátorů, především vibrací, a s tím související otázky zpracování signálů pomocí vhodných softwarů. I zde se začaly využívat metody umělé inteligence, především neuronových sítí. Podobný vývoj lze v posledních několika letech sledovat v nástupu on-line systémů. V dnešní době jich existuje značné množství, u různých firem se objevují různorodé přístupy. Je to v oblasti sběru dat, jejich ukládání, komunikace pomocí různých protokolů apod. Ať jsou výše naznačené různorodosti jakékoliv, on-line systémy nepřetržitě sbírají data (ukládání v cloudech), díky čemuž máme přehled o chodu stroje ve všech jeho provozních stavech. Také v oblasti nasazení on-line systémů lze využít k hodnocení dat prvků umělé inteligence. Toto období je také spojeno s rozvojem údržby, rozvíjí se její mnohé oblasti, např. údržba prediktivní.

V souvislosti se schématem podle obr.1 nelze opomenout pojmy jako virtuální a rozšířená realita. Virtuální realita je technologie umožňující uživateli se ocitnout v simulovaném prostředí, ideálně doprovázené jeho interakcí s ním. Technologie virtuální reality je s námi již cca 50 let, ale teprve v posledním období je na vrcholu a firmy a jednotlivci ji začínají naplno využívat. Rozšířená realita funguje tak, že namapuje trojrozměrné virtuální objekty na reálné prostředí. Rozšířená realita např. pro průmyslovou údržbu umožňuje pracovníkům používat mobilní zařízení, jako jsou chytré telefony nebo tablety k prohlížení a interakci s digitálními překryvnými vrstvami zařízení, dílů a příruček nad fyzickým světem. Tento přístup má pomáhat pracovníkům údržby snadněji diagnostikovat a řešit problémy či efektivněji a přesněji provádět opravy.

Obr.1 Model moderních trendů v diagnostice a údržbě

Digitální dvojče je digitální (počítačový) model reálného, např. výrobního, měřicího atd. automatizovaného zařízení, na němž lze simulovat jeho fungování, komunikaci mezi složkami jeho složkami. Může se také učit z různých zdrojů a adaptovat na měnící se podmínky. Senzory připojené k reálnému zařízení shromažďují data, která se nahrávají do virtuálního modelu. Každý, kdo se podívá na digitální dvojče, vidí zásadní informace o reálném stavu fyzické položky. Digitální dvojčata pomáhají porozumět současnosti, ale zároveň „předpovídat“ budoucnost.

Edge computing umožňuje nasazení umělé inteligence a strojového učení v blízkosti místa shromažďování dat, takže analytické výsledky získáme téměř okamžitě

v reálném čase. Mnoho zařízení vyžaduje velký výpočetní výkon, na který cloud již nemusí stačit. Do cloudu se posílá až konečný výsledek.

Ve výše uvedené druhé kapitole jsou ve značné stručnosti naznačeny nové trendy, které se mohou uplatnit v technické diagnostice a údržbě. Podrobnosti jsou blíže popsány v dostupné literatuře. Tyto trendy jsou v různém rozsahu řešeny i na našem pracovišti. Jak je uvedeno, těchto nových moderních přístupů je větší množství. Pro potřeby tohoto příspěvku byl vybrán jednodušší případ, využití umělé inteligence k identifikaci vad na ložisku.

## 3 Použití umělé inteligence v technické diagnostice

V současné době roste trend využívání umělé inteligence ve všech oborech. Jedná se o velmi širokou oblast informatiky, která zahrnuje například strojové učení (Machine learning), zpracování přirozeného jazyka (Natural Language Processing), počítačové vidění (Computer Vision), expertní systémy, fuzzy logiku a neuronové sítě a hluboké učení (Neural Networks, Deep Learning). Dle uvedených příkladů je jasné že umělá inteligence pokrývá široké spektrum aplikací, od predikce a automatizace až po kreativní tvorbu a autonomní systémy. Její vývoj stále roste díky pokroku ve výpočetní technice, dostupnosti dat a lepším algoritmům.

Neuronové sítě jsou jedním z výpočetních modulů, které se používají v umělé inteligenci a nacházejí široké uplatnění ve vědě, průmyslu i každodenním životě. Jejich výzkum byl původně zaměřen na pochopení lidského mozku, ale postupem času se rozvinuly do podoby univerzálního matematicko-informatického nástroje pro modelování procesů učení, klasifikace a řízení. Typické aplikace zahrnují řízení komplexních systémů, například autonomního řízení vozidel, kde se neuronové sítě učí styl jízdy od lidských řidičů. V oblasti predikce se využívají při předpovědi počasí nebo vývoje finančních trhů. Další významné aplikace zahrnují analýzu biologických signálů, jako je EKG nebo EEG, transformaci signálů, například převod textu na řeč, a kompresi dat pro efektivní přenos obrazu či videa [1].

Neuronové sítě také nacházejí uplatnění v expertních systémech, kde slouží jako alternativa k tradičním metodám založeným na pravidlech. Příkladem je systém EXPSYS, který kombinuje neuronové sítě s intervalovou aritmetikou a heuristikou, což umožňuje pracovat s nepřesnými daty a poskytovat jednoduché vysvětlení závěrů [1]. Aplikace neuronových sítí se neustále rozšiřují díky jejich schopnosti adaptace a řešení složitých problémů v různorodých oborech [2], [6]. Proto se nabízí jejich použití i při úlohách souvisejících s technickou diagnostikou. Jedno z možných použití bude popsáno v demonstrativním příkladu.

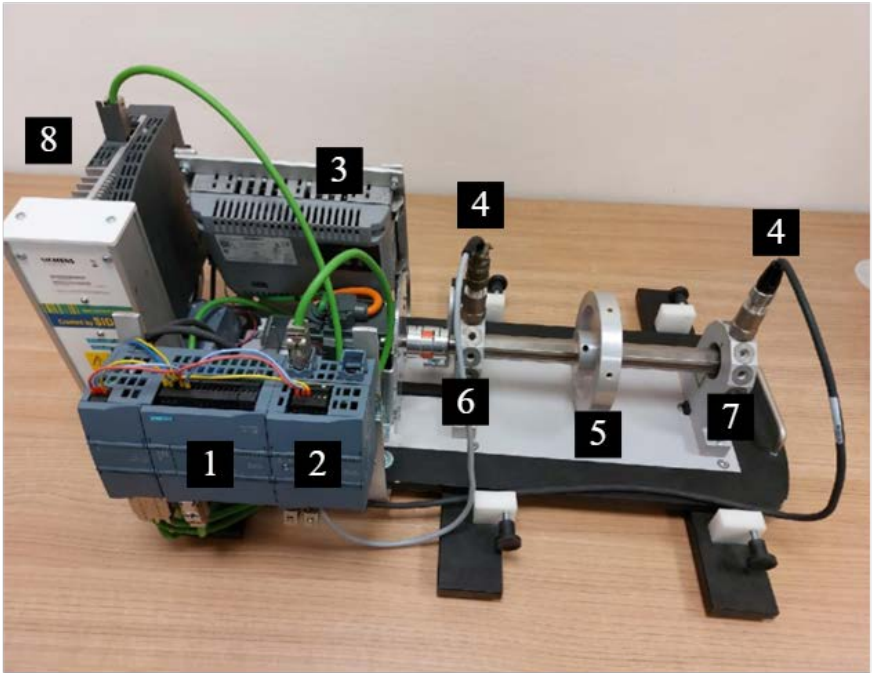
Umělé neuronové sítě (UNN) reprezentují strukturu určenou k distribuovanému paralelnímu zpracování dat. UNN je vytvořena, tak aby její chování odpovídalo biologickým strukturám v lidském mozku. Je složena z umělých neuronů inspirovaných biologickými neurony. Každý neuron má libovolný počet vstupů, ale pouze jeden výstup. Tyto neurony jsou vzájemně propojeny a navzájem si předávají signály, které transformují pomocí přenosových funkcí. Existuje celá řada typů neuronových sítí, dle počtu vrstev lze rozlišit jednovrstvé a vícevrstvé. Dle algoritmu učení lze pracovat s neuronovými sítěmi s učitelem nebo bez učitele a dle stylu učení lze rozlišit na neuronové sítě s deterministickým učením a se stochastickým učením [1].

Obecně se umělá neuronová síť skládá z jedné či více vrstev, přičemž každá vrstva se skládá z libovolného počtu neuronů. Dle druhu architektury, zapojení konkrétních neuronů a zaměření na specifické úkoly lze neuronové sítě rozdělit na feedforward

neuronové sítě (FNN), vícevrstvé perceptrony (MLP), konvoluční neuronové sítě (CNN), rekurentní neuronové sítě (RNN), generativní adversariální sítě (GANs), sítě s posílením (Reinforcement Learning Networks), spiking neuronové sítě (SNN) atd. [2]. Pro navržený experiment se jako nejvhodnější jeví konvoluční neuronové sítě, které jsou navrženy pro zpracování obrazu a vizuálních dat a jsou hojně využívány k rozpoznávání obličejů, analýze lékařských snímků či detekci objektů [7].

## 4 Získání a hodnocení vibrodiagnostických dat

Pro získání vibrodiagnostických byl použit vibrodiagnostický model pro nepřetržité sledování stavu objektu [5]. Základ tvořil programovatelný automat SIMATIC S7-1200 (1), ke kterému byl přidán rozšiřovací modul SIPLUS CMS1200 SM 1281 (2). Pro komunikaci s uživatelem byl použit dotykový panel SIMATIC HMI TP700 Comfort (3). Pro měření byly použity dva senzory SIPLUS CMS VIB-Sensor S03 (4). Pohyb rotoru byl řízen pomoci servomotoru SINAMICS V90 (8). Dále jsou na obrázku označena ložiska (6), (7) a kotouč (5). Model je zobrazen na obr.2. Detailněji je o celém experimentu pojednáno v [3].



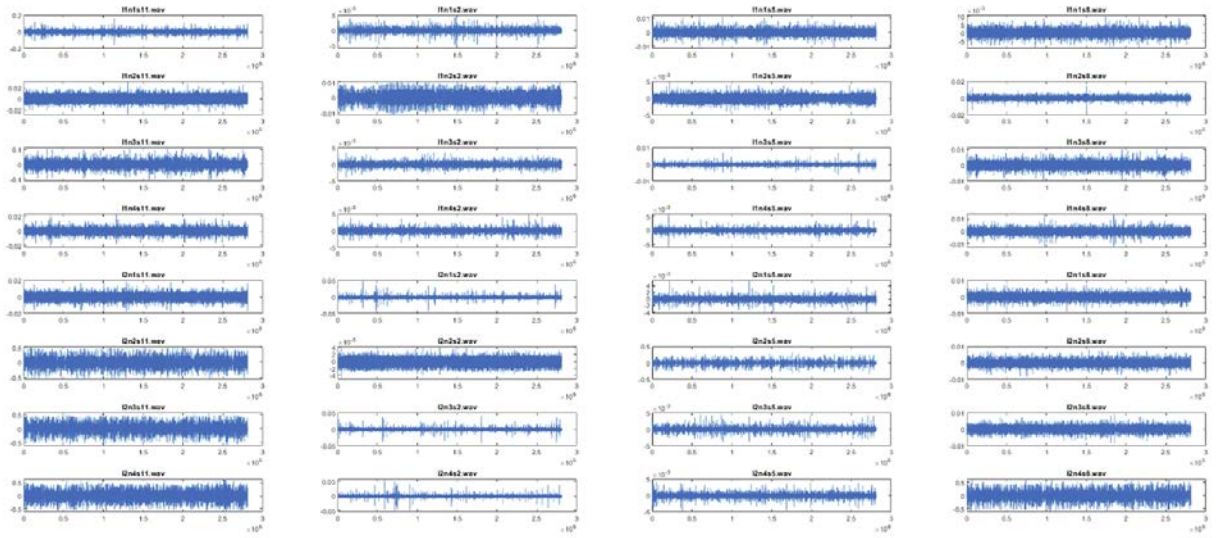

Obr.2 Vibrodiagnostický model

Na popsaném modelu byly simulovány dvě vady, první byla nevyváženost a druhou bylo poškození ložiska na vnějším kroužku. Celkem se naměřilo 32 vzorků s různou kombinací vad (bez vady, s vadou na vnějším kroužku a vývaha, nevývaha 10,6 g, nevývaha 16 g, nevývaha 21,4 g) a rychlostí otáček (n1 = 200 $min^{-1}$, n2 = 500 $min^{-1}$, n3 = 800 $min^{-1}$, n4 = 1100 $min^{-1}$). Data byla ukládána ve formě surového signálu ve formátu *.wav a jejich zpracování probíhalo následně v Matlabu s využitím Matlab Neural Network Toolbox. Naměřená data byla rozdělena do tréninkových, validačních a testovacích sad v poměru 0,6:0,2:0,2. Matice naměřených signálů je na obr.3.

Pro řešení byly vybrány dva typy konvolučních neuronových sítí. Prvním byla CNN 1D, kdy byla použita surová data z měřených signálu v časové oblasti. Architektura sítě

byla jednoduchá se standartními konvolučními vrstvami a poolingem. Jelikož tréninkový dataset obsahoval signály přímo z vibračních senzorů bez jakýchkoli transformací, bylo použito několik konvolučních filtrů. Po patnácti tréninkových epochách dosáhla síť klasifikační přesnosti 89.74%. Chybovost se nejčastěji objevovala u klasifikace stavů s malými odchylkami ve frekvenčních složkách.

Druhou neuronovou sítí byla opět konvoluční neuronová síť CNN 2D, do které vstupovala naměřená data ve formě 2D map. Pro transformaci naměřených dat do obrazců byla použita vlnková transformace (Wavelet transform). Tato transformace používá matematické funkce, které jsou schopny rozkládat signál na různé frekvenční složky a časové rozložení. To umožňuje zachytit jak nízkofrekvenční, tak vysokofrekvenční detaily. Při tvorbě datasetu se vycházelo z měření s maximální otáčkovou frekvencí. Validační přesnost po 30 epochách dosáhla 82.3%.



Obr.3 Matice zobrazení naměřených signálů [3]

Při srovnání vybraných metrik vyšla lépe 1D CNN. Při hodnocení citlivosti dosáhla 1D CNN 89,79%, zatímco 2D CNN dosáhla 81,9% a lze konstatovat, že pro minimalizaci falešně negativních případů je vhodnější použití 1D CNN. Preciznost 2D CNN je oproti 1D CNN mírně nižší, což naznačuje, že 2D CNN vykazovala vyšší pravděpodobnost chybné klasifikace drobnějších anomálií. Specifičnost 99,6% u 1D CNN naznačuje, že model má minimální tendenci k identifikaci správných ložisek jako špatných. Celkově lze říct, že model dosahuje vysoké spolehlivosti při detekci špatných ložisek a je schopen minimalizovat riziko falešných poplachů.

Obecně lze 1D CNN považovat za lepší, jelikož vykazuje mírně lepší výsledky napříč všemi vybranými metrikami. 2D CNN měla být dle předpokladů vhodnější pro komplexní analýzu, kdy je třeba identifikovat jemnější odchylky a analyzovat přechodné jevy v signálu. Nicméně je otázkou, zda byl dataset vytvořený pro 2D CNN dostatečný. Z výsledků je patrné, pro tento konkrétní případ by bylo vhodné použití 1D CNN, její architektura je jednodušší a požadavky na předzpracování dat zde nejsou. Závěrem ovšem je, že se nelze na 100% spoléhat na určení závady pomocí neuronových sítí a u kritických objektů je velice důležité nastavení kontrolního měření.

## 5 Závěr

Předložený příspěvek je zaměřen na aktuální téma v oblasti technické diagnostiky. Výsledky lze považovat za informativní. Naznačují však, že možnost posouzení stavu, v tomto případě ložisek, je možná i tímto způsobem. Je třeba výše uvedené dále rozvíjet. Na našem pracovišti důsledně vycházíme z naznačeného schématu dle obr.1, snažíme se řešit i jiné možnosti právě v rámci technické diagnostiky, jako např. virtuální a rozšířenou realitu, digitální dvojčata a edge computing. Spolupracujeme s významnými špičkovými firmami, je tedy záruka, že získané výsledky na našem pracovišti najdou cestu do průmyslové praxe.

**Poděkování:**

Tento článek byl realizován za finanční podpory Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, číslo grantu FSI-S-23-8394: „Metody umělé inteligence v inženýrských aplikacích“.

**Literatura:**

[1] Volná, E. *Neuronové sítě*. Studijní opora k inovovanému předmětu: Neuronové sítě (KIP/NESI1). Ostravská univerzita v Ostravě. 2013. 86 s. ISBN 978-80-7464-329-3

[2] Khan, Salman; Rahmani, Hossein; Shah, Syed Afaq Ali a Bennamoun, Mohammed. *A Guide to Convolutional Neural Networks for Computer Vision*. 2018. Morgan & Claypool Publishers, 2018. ISBN 978-1681730219

[3] Koníček, T. *Moderní vibrodiagnostika strojů a hodnocení datových souborů neuronovými sítěmi* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-12-03]. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157554. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Miloš Hammer

[4] Hammer, M. *Metody umělé inteligence v diagnostice elektrických strojů*. Praha: BEN-technická literatura. 2009. 400 s. ISBN 978-80-7300-231-2

[5] Hammer, M. and Hájková, A. Moderní přístupy v diagnostice technických systémů. In *Sborník mezinárodní konference "Diago® 2024"*, Ostrava 2024, s. 26-31, ISBN 978-80-248-4721-4

[6] Wu, Yu-chen and Feng, Jun-wen. Development and application of artificial neural network. *Wireless Personal Communications*, 1645–1656, 2017, doi:10.1007/s11277-017-5224-x

[7] Li, Zewen, et al. A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*. vol. 33, no. 12, pp. 6999-7019, 2022, doi: 10.1109/TNNLS.2021.3084827

# PROBLEMATIKA RUN-OUTU PŘI MĚŘENÍ ROTOROVÝCH VIBRACÍ POMOCÍ SNÍMAČŮ PRACUJÍCÍCH NA PRINCIPU VÍŘIVÝCH PROUDŮ

# RUN-OUT ISSUES IN SHAFT VIBRATIONS MEASUREMENTS WITH THE USE EDDY-CURRENT PROXIMITY SENSORS

**Jan HYRÁT**, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. [1]
**Vít HORÁČEK**, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. [2]
**Andrea KOLÍNKOVÁ**, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. [3]

**Anotace:**

Pro měření vibrací rotujících částí strojů se běžně používají bezkontaktní snímače vibrací pracující na principu vířivých proudů. Tyto snímače se osvědčují i ve vlhkém a znečištěném prostředí, avšak jejich nevýhodou je citlivost na tzv. „RUNOUT“. Tento falešný elektrický signál je vyvolán materiálovými a magnetickými nehomogenitami nebo geometrickou nekruhovitostí rotujícího hřídele, a nemá žádnou souvislost s reálnými vibracemi. RUNOUT může významně ovlivnit správnost diagnostických závěrů a vést k chybným rozhodnutím o stavu stroje. Příspěvek se zaměřuje na problematiku měření a kompenzace RUNOUTU.

**Annotation:**

Non-contact vibration sensors based on the eddy current principle are commonly used to measure vibrations of rotating machine parts. These sensors are also effective in wet and dirty environments, but their disadvantage is their sensitivity to "run-out". This false electrical signal is caused by material and magnetic inhomogeneities or geometric non-circularity of the rotating shaft and has no relation to the actual vibration. Run-out can significantly affect the accuracy of diagnostic conclusions and lead to erroneous decisions related to the condition of the machine. This paper focuses on the issue of run-out measurement and compensation.

(úplný text příspěvku nebyl autory do termínu uzávěrky sborníku konference zaslán)

[1] Dr. Ing. Jan Hyrát
Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.
Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň
e-mail: hyrat@vzuplzen.cz, https://www.vzuplzen.cz/
[2] Ing. Vít Horáček
e-mail: horacek@vzuplzen.cz
[3] Ing. Andrea Kolínková
e-mail: kolinkova@vzuplzen.cz

# VYUŽITÍ ONLINE DIAGNOSTIKY PRO DETEKCI POŠKOZENÍ VALIVÝCH LOŽISEK

# USING ONLINE DIAGNOSTICS TO DETECT DAMAGE OF ROLLING BEARINGS

**Ladislav CHALÁNEK**, SKF CZ a.s., Praha [1]

**Anotace:**

Vibrační diagnostika je jedna z možností multiparametrické diagnostiky, jak odhalovat poškození na strojních komponentech. Informace a výsledky analýzy vibračních dat pomáhají údržbě se bezpečně připravit na plánovanou odstávku a zamezit tak velmi drahým a neplánovaným odstávkám. Specialisté disponující znalostmi analýzy vibračních dat dokáží odhalit například mechanické problémy spojené s nevyváženostmi rotorů, nesouosostí hřídelů, mechanické uvolnění základů či kotevních šroubů apod. Speciální metody měření dokonce zachytí problémy s mazáním či počínající poškození valivého ložiska a přesně specifikovat a kterou část ložiska se jedná.

**Annotation:**

Vibration diagnostics is one of the options for multiparametric diagnostics to detect damage to machine components. Information and results of vibration data analysis help maintenance to safely prepare for planned downtime and prevent very expensive and unplanned downtime. Specialists with knowledge of vibration data analysis can detect, for example, mechanical problems associated with rotor imbalance, shaft misalignment, mechanical loosening of foundations or anchor bolts, etc. Special measurement methods can even detect lubrication problems or incipient damage to rolling bearings and specify exactly which part of the bearing is affected.

## 1 Úvod

Valivá ložiska patří k nejdůležitějším součástem většiny strojů a navíc musí splňovat vysoké nároky na únosnost a spolehlivost. Z toho důvodu byl valivým ložiskům zcela právem přiznán jejich význam a v průběhu let se staly předmětem rozsáhlých výzkumů. Vznikl samostatný vědní obor zaměřený na valivá ložiska.

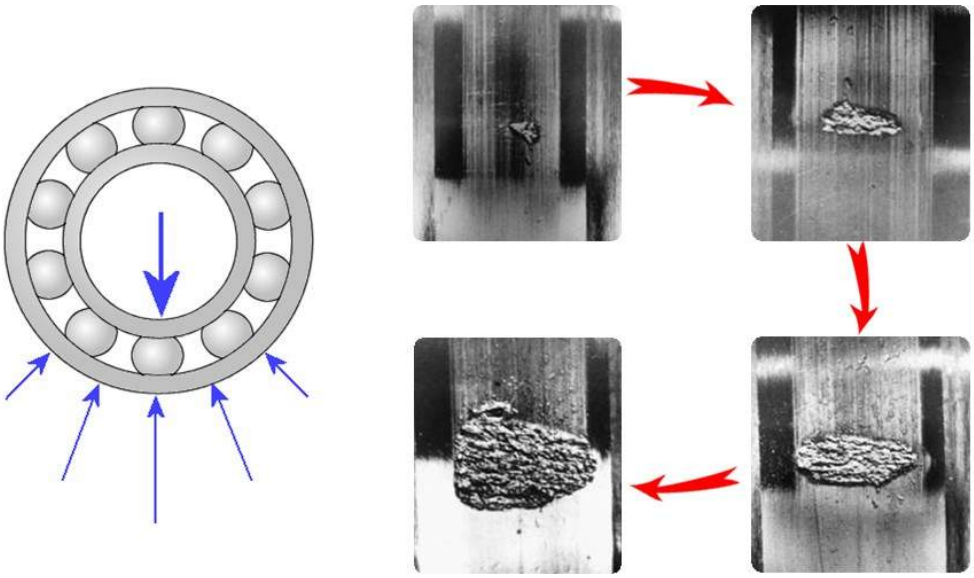
Jedním z výsledků tohoto výzkumu je možnost vypočítat trvanlivost s poměrně vysokou přesností, což umožňuje přizpůsobit trvanlivost ložiska životnosti stroje. Mají-li valivá ložiska fungovat spolehlivě, musí být adekvátně mazána, aby se zabránilo styku kovu s kovem mezi valivými prvky, dráhami a klecí. Separace povrchů ložiska je primární funkcí maziva, které musí také inhibovat opotřebení a chránit ložiskové plochy před korozí. V některých aplikacích se mazivo používá k přenášení tepla. Proto je důležitá volba vhodného maziva a způsobu mazání pro každé jednotlivé použití ložiska, stejně jako

[1] Ing. Ladislav Chalánek, CTD
SKF CZ a.s.
Dělnická 1628/9, 170 00 Praha 7 - Holešovice
mobil:+420 739 386 395, e-mail: ladislav.chalanek@skf.com, https://www.skf.com/cz

správná údržba. Skutečná volba maziva závisí především na provozních podmínkách, to je na teplotním rozsahu, rychlostech a vlivu okolí. Nejvýhodnější provozní teploty bude dosaženo, když minimální množství maziva potřebné pro spolehlivé mazání ložisek je zajištěno.

## 2 Životnost a trvanlivost ložiska

Valivé ložisko nemůže v zásadě pracovat neomezeně dlouho. Pokud nejsou ideální provozní podmínky a v případě, že je dosaženo mezního únavového zatížení, se dříve nebo později projeví únava materiálu. Doba, která uplyne, než se projeví první příznaky únavy materiálu, závisí na počtu otáček ložiska a velikosti zatížení. Únava materiálu je výsledkem působení smykových napětí, která opakovaně vznikají těsně pod zatěžovaným povrchem. Po určité době vyvolá napětí trhlinky, které se postupně šíří směrem k povrchu. Při odvalování valivých těles přes trhlinky se odlamují částice materiálu.



Obr.1 Postupný rozvoj defektu valivého ložiska

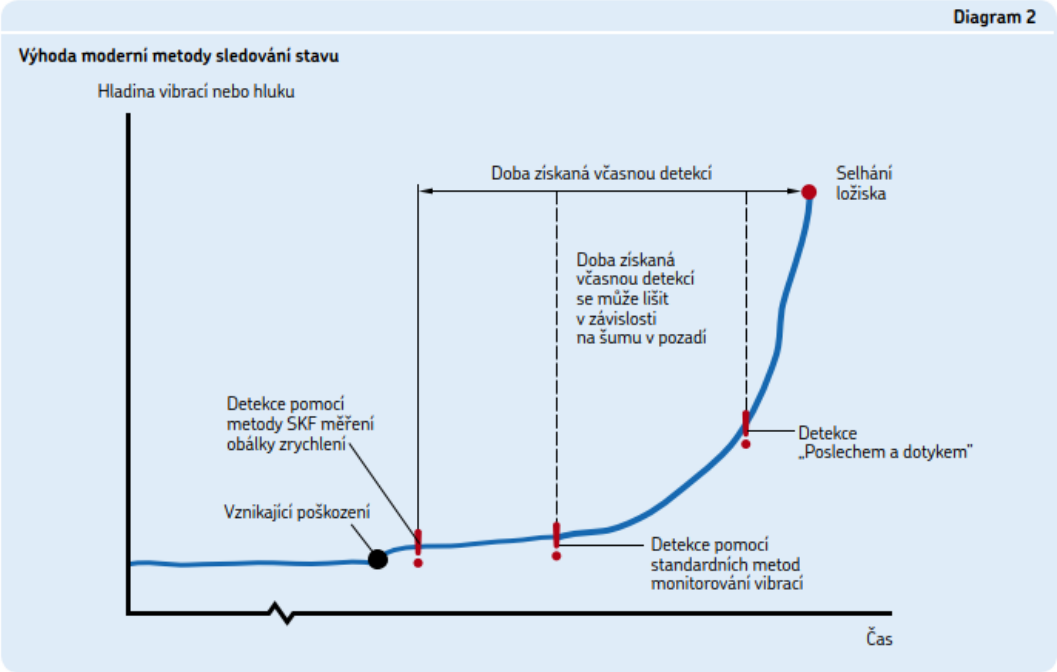
Tento jev se nazývá odlupování. Poškozená plocha se progresivně zvětšuje a nakonec je ložisko poškozeno v takovém rozsahu, že je nepoužitelné.Trvanlivost ložiska je definována jako počet otáček, které ložisko dokončí, než dojde k odlupování materiálu. To však neznamená, že ložisko už nemůže být používáno. Odlupování je poměrně dlouhý proces, který se projevuje vzrůstající hlučností a vibracemi ložiska. Provozovatel má tedy zpravidla dostatek času, aby se mohl připravit na výměnu ložiska.

Provozní trvanlivost, což je skutečná trvanlivost ložiska v reálných provozních podmínkách do doby selhání ložiska (nebo kdy není schopno provozu), závisí na mnoha faktorech, jakými např. jsou mazání, míra znečištění prostředí ložiska, nesouosost, správná montáž, a dále záleží na provozních podmínkách jako zatížení, teplota a úroveň vibrací. SKF důrazně doporučuje brát tyto faktory do úvahy a provádět výpočty trvanlivosti podle SKF, nikoli pouze základní výpočtové trvanlivosti.

## 3 Včasná indikace poškození valivých ložisek

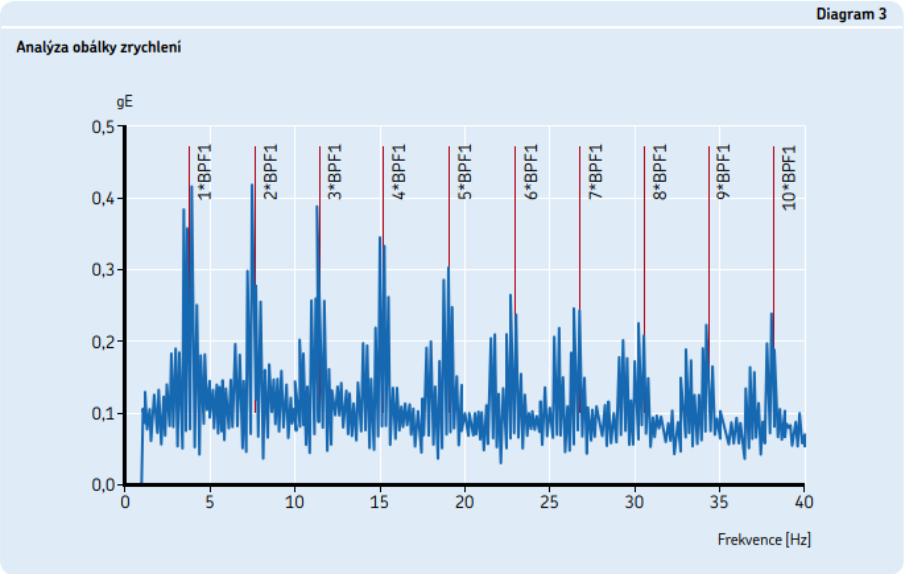
Obecně je přijímáno, že měření a analýza vibrací je nejvhodnější metodou monitorování a hodnocení technického stavu rotačních strojů. Vibrace jsou v tomto případě symptomem (to je nosičem informací) technického stavu, a ne problémem samotným, jak je často uvažováno z hlediska provozní praxe. Zvýšení vibrací znamená, že ve stroji se vyskytuje problém a analýzou signálu vibrací lze získat užitečné informace pro zjištění kořenové příčiny problému. Pokud známe příčinu problému lze navrhnout optimální řešení problému stroje, jakož i navrhnout nápravné akce.

Ložiska jsou zpravidla nejdůležitější části všech typů rotačních zařízení. V této souvislosti je vhodné poznamenat, že i když monitorování stavu valivých ložisek je založeno na měření vibrací, diagnostika jejich technického stavu vyžaduje použití speciálních metod úpravy vibračního.




Obr.2 Vývoj poškození ložiska v čase

Každé ložisko vydává nízkofrekvenční signál. Frekvence signálu závisí na počtu a velikosti valivých těles, stykovém úhlu ložiska a na roztečném průměru valivých těles. Pokaždé, když se valivá tělesa převalí přes vadu, vzniká vysokofrekvenční signál a amplituda signálu dosahuje špičky (maxima). Míra výskytu těchto špiček závisí na rychlosti otáčení, místě defektu v ložisku i na vnitřní geometrii ložiska.Ke sledování stavu ložiska se používá metoda nazvaná obálka zrychleni. Obálka zrychlení odděluje vysokofrekvenční signál vydávaný vadou od jiných rotačních či konstrukčních frekvencí přirozeně vznikajících uvnitř stroje obr.3.

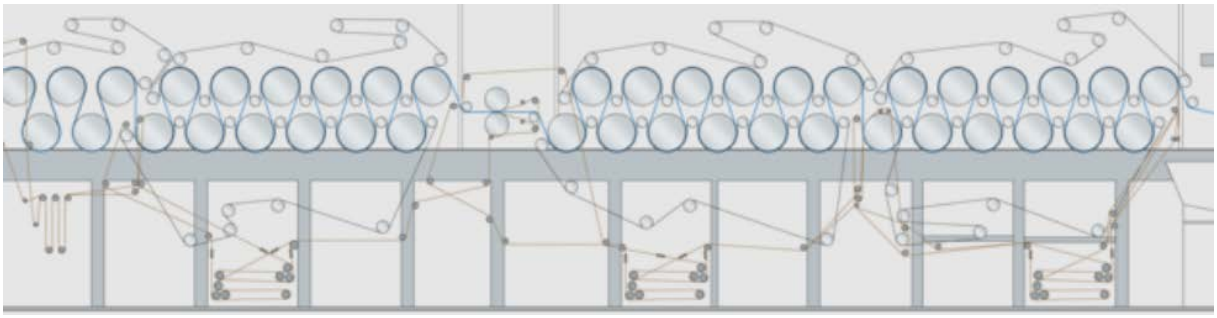



Obr.3 Spektrum obálky signálu zrychlení s viditelným poškozením ložiska

## 4 Využití online monitoringu pro detekci poškození valivého ložiska sušícího válce

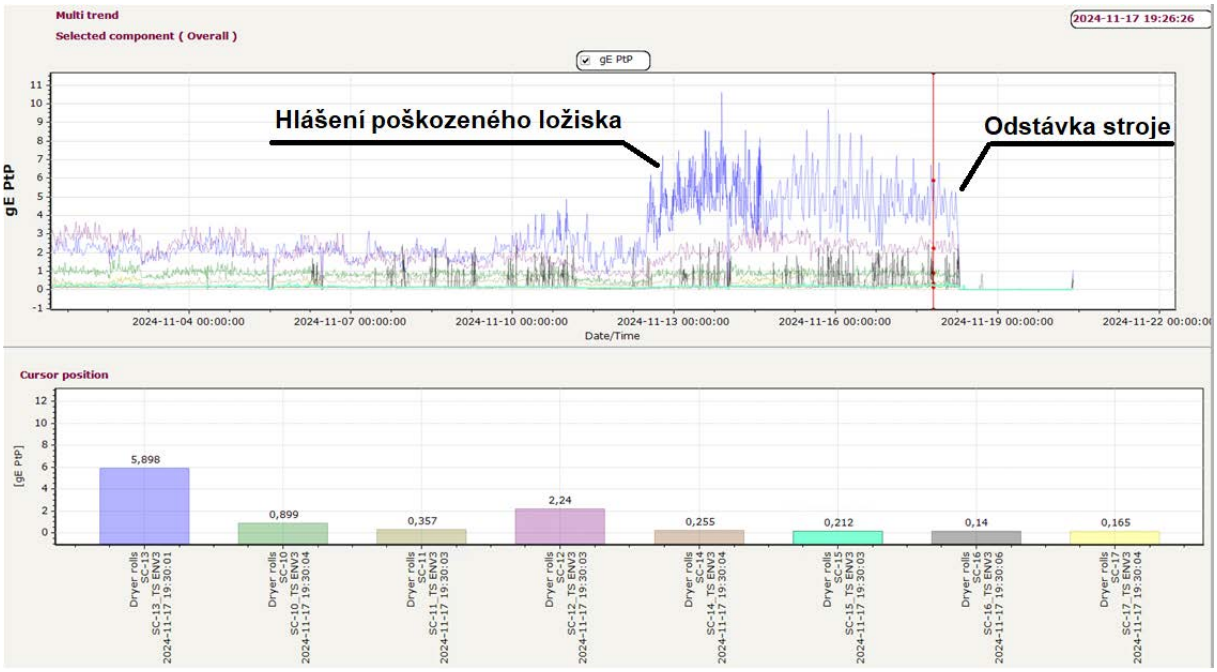
Významnou roli hraje online monitoring při odhalování poškození kritických strojních komponentů v papírenském průmyslu. Poškození ložiska, povrchu hřídele válce, popřípadě ložiskového tělesa jsou scénáře, ke kterým dochází, pokud není poškozené ložisko vyměněno ve správný čas. V tomto kontextu roste význam online monitoringu, který spočívá v tom, že diagnostici dokáží monitorovat a vyhodnocovat celkový technický stav všech ložisek v reálném čase a odhalit počáteční poškození valivého ložiska.

Následující případ z praxe popisuje proces práce s online monitorovanými daty od počátku nárůstu trendu až po výměnu ložiska. Jedná se o kontrukci párou vyhřívaného válce o pracovních otáčkách 100 ÷ 130 $min^{-1}$. Válec je uložen na soudečkových ložiscích s centrálním olejovým mazacím systémem.



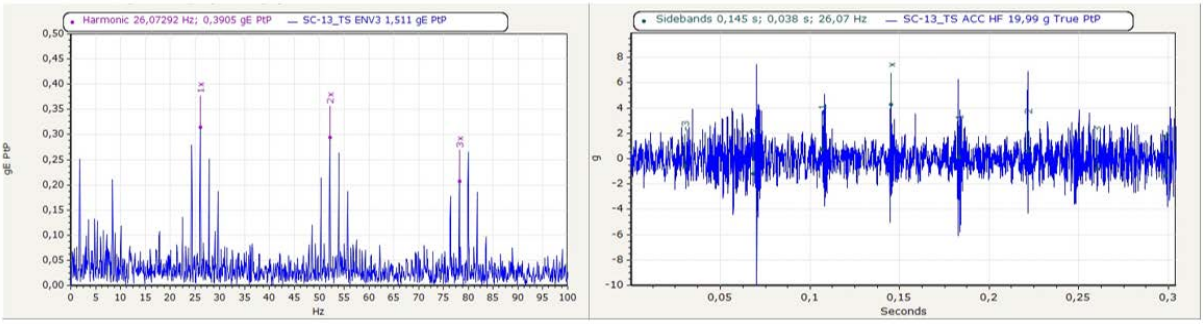
Obr.4 Grafický příklad Sušící sekce papírenského stroj

Multi trendová analýza umožňuje rychlou detekci problémových pozic, na základě porovnání trendů a změn nárůstů celkových hodnot monitorovaných parametrů. Na obr.5 je vyobrazen Multi trend obálky signálu zrychlení sušících válců. Z prvního pohledu je patrný nárůst a výrazně vyšší celková trendová hodnota válce č.13.




Obr.5 Multi trendová analýza obálky signálu zrychlení

Pro přesné zjištění odůvodnění rostoucího trendu a identifikaci problému byla použita analýza spektra obálky signálu zrychlení a časového záznamu zrychlení. Ve spektru byly vyditelné poruchové frekvence vnitřního kroužku ložiska. Poruchová frekvence byla detekována i za pomocí analýzy časového záznamu zrychlení, kde jsou viditelné rázy projevující se stejnou frekvencí, jako ve spektru obálky signálu zrychlení, a to 26,07 Hz (14,81XRPM) obr.6.




Obr.6 Spektrum obálky signálu zrychlení a časový záznam zrychlení

Obr.7 Poškození vnitřního kroužku ložiska (příčná prasklina kroužku)

Tento úspěšně vyřešený případ za pomocí online monitoringu poukazuje na význam včasné detekce přes nahlášení problému zákazníkovi až po samotnou výměnu ložiska v plánované odstávce. Celkový interval mezi nahlášením nárůstu trendu až po výměnou ložiska byl 6 dnů. Během této doby byl zákazník informován o aktuálním vývoji trendu.

## 5 Závěr

Online monitoring je významný nástroj pro zvyšování provozní spolehlivosti výrobních strojů. Pokročilé možnosti trendové analýzy přinášejí detailní přehled nad kondicí měřeného stroje a v případě vznikajícího problému dostává zákazník varování s dostatečným časovým předstihem. Hlavní uplatnění je primárně pro stroje s vysokou kritičností, kde je požadavek na minimum odstávek, popřípadě pro případy řešení problémů tzv. troubleshooting. Méně viditelnou výhodou, ale o to důležitější je pokrytí měřících míst, které nejde z důvodu bezpečnosti práce za standartního provozu měřit. Komplexně monitorovaný stroj a data vyhodnocovaná zkušeným týmem diagnostiků zamezuje zbytečným finančním škodám v podobě odstaveného stroje.

**Literatura:**

[1] Interní zdroje SKF

# IMPLEMENTATION OF THE OPERATING PARAMETER SETTING SYSTEM IN THE ROADHEADER RESEARCH SIMULATOR FOR DIAGNOSTICS OF AUTOMATIC CONTROL OF THE ROCK MINING PROCESS

**Piotr CHELUSZKA**, Politechnika Śląska, Gliwice, Polska [1]

**Annotation:**

The roadheader research simulator developed at the Department of Mining Mechanization and Robotisation of the Silesian University of Technology, in addition to its training function, is to enable the study of various control strategies in virtual reality. These studies are carried out to automate and further - robotize roadheaders, widely used for drilling roadways in underground mines and tunnels. The next stage of the development of the software part of this simulator is to equip it with a settings system, which develops control signals or the roadheader's executive mechanisms responsible for mining the heading face of the excavated roadway. The algorithm of this settings system, which was developed as part of an earlier research project, adjusts the parameters of the cutting process based on the current cutting heads' drive load due to the adopted optimization criteria. The article presents the architecture of the automatic control system for a roadheader on the virtual stage of the simulator, its implementation, and test results.

## 1 Introduction

One of the fundamental stages of robotization of boom roadheaders, understood as autonomous, self-propelled mining machines that automatically carry out the process of mining the heading face of the roadways in underground mines or tunnels, is the development of effective and efficient algorithms for planning the trajectory of the cutter heads. The development of roadheader designs in the direction of robotization results on the one hand from the need to ensure the work safety of crews working in underground mines and in the construction of underground architectural structures using trenchless techniques in particularly dangerous zones, such as the faces of excavated roadways. On the other hand, there is a need to optimize the excavation process in terms of reducing costs, increasing efficiency, and increasing the accuracy of roadway drilling in general-purpose mines and tunnels.

In the literature, we can find many publications on the subject of planning the trajectory of the cutter heads of roadheaders in the aspect of automation of the mining process [7 - 12]. The authors of these works focus, for example, on the optimization of the mining cycle time through optimal, automatic selection of the path of the cutter heads. However, these studies commonly concern the case of drilling mine galleries carried out in the seam. In the entire cross-section of the excavated roadways or tunnels, there is a fairly homogeneous rock (e.g. hard coal) with approximately constant strength parameters. The situation becomes more complicated in the case of tunneling in rocks with highly varying workabil-

[1] dr hab. inż. Piotr Cheluszka, prof. PŚ
Silesian University of Technology, Faculty of Mining, Safety Engineering and Industrial Automation
Department of Mining Mechanization and Robotisation
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

ity. Such a situation is common in Polish hard coal mines, where, for example, longwall galleries are drilled in the coal seam with a large ceiling and/or floor trimming. The rock layers surrounding coal seams are often much more difficult to work than hard coal. The process of automatic trajectory planning must therefore be carried out taking into account additional criteria, such as minimizing dynamic loads and vibrations in drives and key roadheader construction nodes or minimizing the energy consumption of mining.

In 2015 - 2017, the Department of Mining Mechanization and Robotisation at the Silesian University of Technology carried out an R&D project in cooperation with Famur S.A. in the field of automatic control of the movement of roadheader cutter heads. The aim of this project was, among others, to develop an automatic control algorithm ensuring minimization of dynamic loads and energy consumption of mining (Fig.1a). As part of the work carried out, a technical solution was developed, which was tested in laboratory conditions on a real roadheader excavating a cement-sand block with a layered structure (Fig.1b). Although the results are highly satisfactory, the developed automatic control system requires further research, especially in the context of the entire cycle of mining the heading face of the drilling roadway or tunnel. Due to the high cost and arduousness of the implementation of these works on a real facility, the concept of using the research simulator of the boom-type roadheader {*RH-Sim*} [2, 4]. An important functional feature of this simulator is the ability to predict the values of the roadheader's operating parameters, including, m.in the load on its drives, the speed of boom tilting, and the energy consumption of mining. For this purpose, artificial neural networks are used, which have undergone a machine learning process [1]. This process was carried out using the results of computer simulations of the dynamics of the roadheader during simulated mining of rocks with different mechanical properties at different values of the parameters of this process. In this way, it is possible to map the roadheader's response to the forcing of vibrations accompanying the excavation of the heading face of the roadway or tunnel during the movement of the cutter heads along a set trajectory.

## 2 Hardware implementation of the automatic control system of a roadheader in the {RH-Sim} research simulator

As shown in the schematic diagram of the developed automatic control system implemented in a real roadheader (Fig.1a), an important element of this system is the control of the roadheader's operating parameters. Based on the information about the engine load in the cutter head drive, obtained from the roadheader's diagnostic system, the current values of three out of four parameters of the mining process are developed there, i.e.:

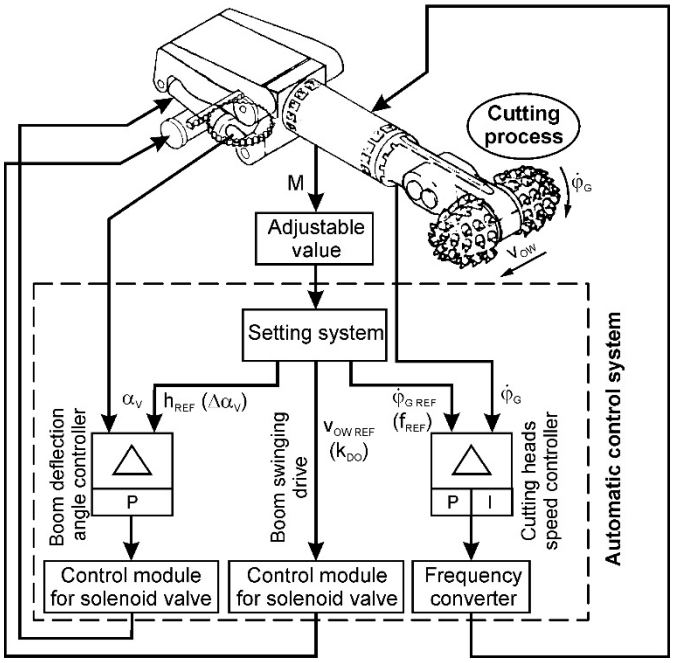
angular velocity of the cutter heads $\varphi_{G\ REF}$,

boom swing speed in working motion $v_{OW\ REF}$,

the height of the cut machines $h_{REF}$.

One of the parameters, the value of which is adjusted to the changing conditions of the mining process, is the angular velocity of the cutter heads in the developed solution of the automatic control system. Such a possibility had not been considered before. Adjustment of the angular speed of the cutter heads requires the use of a converter system in the motor supply system in the drive of the cutter heads. Some of the currently produced roadheaders can change the angular speed, but only in steps - thanks to the use of a two-speed motor. As the results of simulation and experimental studies have shown, the stepless adjustment of the angular speed of the cutter heads offers a wide range of possibili-

ties for optimizing the parameters of the mining process. However, this requires the use of a converter system in the drive of the cutter heads.




a)

b)

Fig.1 A block diagram of the automatic control system for controlling the cutting process parameters of the boom-type road header (a) [5] and the test stand with the FAMUR R-130 boom-type roadheader (b) [3]

The actuator systems are responsible for the implementation of the values of the three above-mentioned parameters developed by the Setting System during the successive rotations of the cutter heads. The angular velocity is controlled by the PI controller. The adjustment of the boom tilt angle in the vertical plane, which determines the height of the cutter heads, is made using the P controller. Due to the characteristics of the drive of

the boom swing mechanism in the horizontal plane, responsible for moving the heads in the working motion, the control system works in an open feedback loop. Its task is to ensure the maximum possible speed $v_{OW}$ to guarantee a high cutting capacity.

The {*RH-Sim*} simulator recreates the structure and operation of the automatic control system for the movement of cutter heads implemented in a real roadheader. The Setting System's algorithm has been implemented in the Python environment installed in the reTerminal microcomputer, used, m.in, as an HMI interface (Fig.2). It is equipped with a Raspberry Pi single-board computer running on the Linux operating system. This computer was connected to the central unit of the simulator {*RH-Sim*} (Workstation #1) and the Operator Panel computer (Workstation #2) with the installed software, in which, m.in other things, the response of the roadheader is worked out during the simulated mining of the heading face on the virtual stage of the simulator. Communication with these workstations is carried out using the TCP/IP protocol via Ethernet. The values of the parameters characterizing the dynamic state of the roadheader and the parameters of the mining process are determined using artificial neural networks.

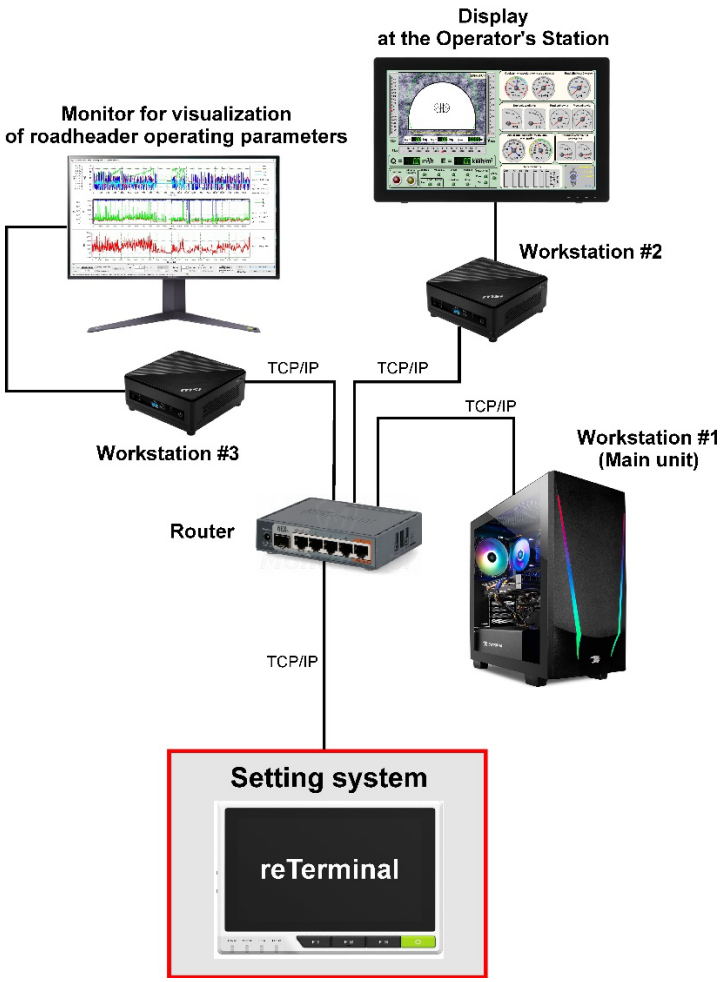



Fig.2 Schematic diagram of the automatic control system for the movement of cutter heads in the {*RH-Sim*} research simulator

The idea of operation of the automatic control system for the cutter heads in the {*RH-Sim*} simulator is shown in Fig.3. After initiating the mining process with randomly se-

lected values of the web of cut and the cut height $h_0$, the movement of the cutter heads parallel to the floor (working movement) begins. This movement is initiated at the lowest value of the motor supply voltage frequency in the drive of the cutter heads (f = 25 Hz), corresponding to the lowest assumed angular velocity and the lowest value of the opening factor of the hydraulic distributor ($k_{doH}$ = 0.2) in the power supply system of the boom rotation cylinders. The boom is positioned in the extreme position ($\alpha_H = \alpha_{H\,MIN}$).

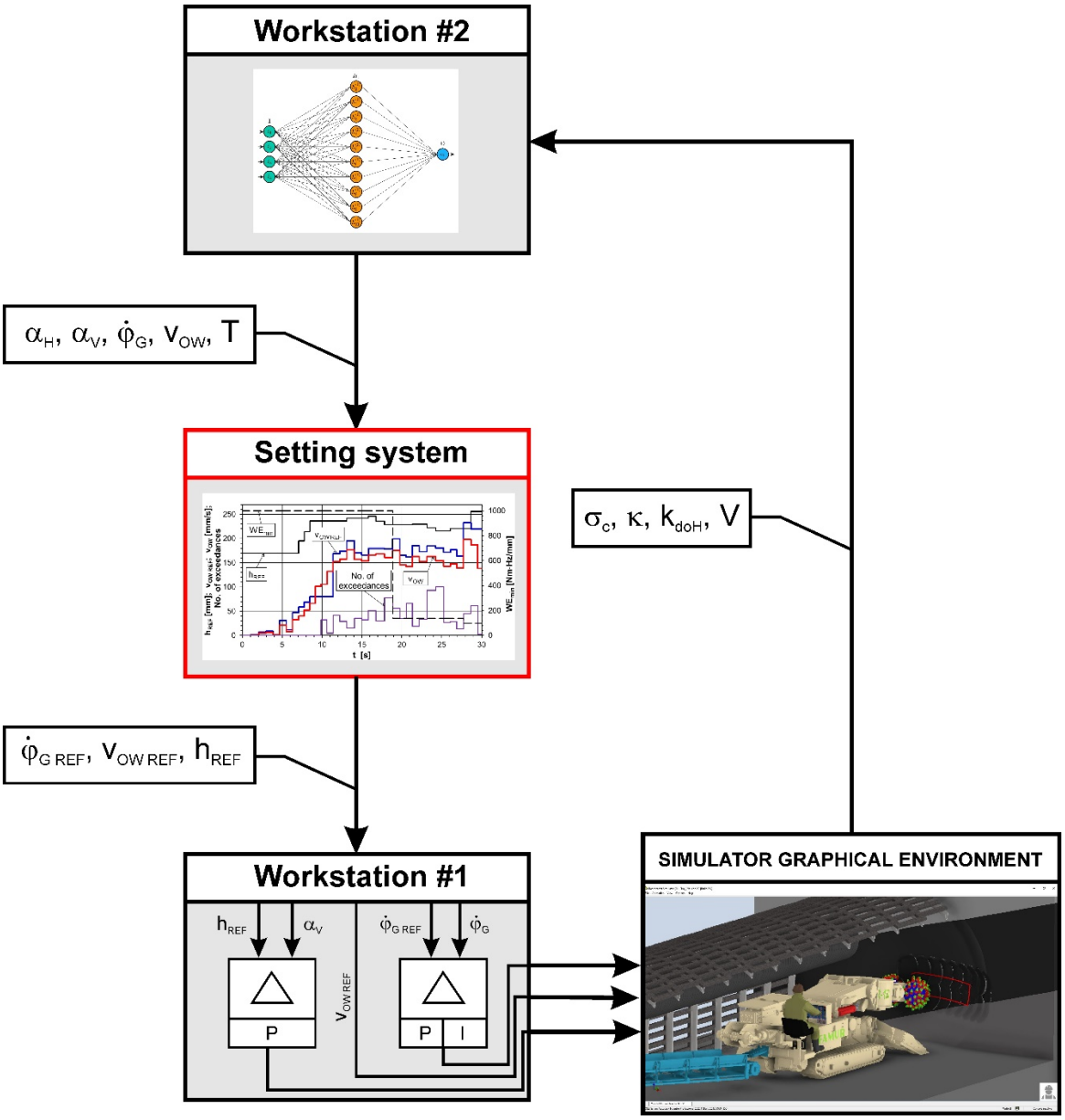



Fig.3 Block diagram of the software implementation of the automatic motion control system of cutter heads in the {*RH-Sim*} research simulator

The prediction module (Workstation #2) determines the values of the roadheader's operating parameters and its dynamic load for the current values of the parameters characterizing the workability of the rock ($\sigma_c$, $\kappa$), the opening factor of the hydraulic distributor ($k_{doH}$) and the volume of "excavated rock" (V) obtained from the simulator's graphics engine. These values are averaged for successive rotations of the cutter heads. Information

about the load, the speed of movement of the cutter heads, and their current position are sent to the Setting System, where reference values (REF) are developed, based on which the angular speed of the cutter heads (frequency of the motor supply voltage in their drive) and the cut height (the angle of inclination of the boom in the vertical plane) is corrected. This data is sent to the simulator's actuator that carries out the movement of the boom on the virtual stage. To map the behavior of the real object (taking into account its inertia and delay caused by the operation of the regulators used in the real object), changes in the roadheader operating parameters are carried out based on the approximation characteristics of the PI regulator in the drive of the cutter heads and P in the drive of the boom tilting mechanism in the vertical plane, obtained based on recording on the real object. The procedure described above is repeated until the cutter heads reach the assumed target position (boom swing angle in the horizontal plane $\alpha_H = \alpha_{H\,MAX}$).

## 3 Method for predicting the operating parameters of a roadheader and its dynamic load as a function of the angular velocity of the cutter heads

As mentioned earlier, the prediction of the roadheader's operating parameters and its dynamic load is made using artificial neural networks (ANN). In the input layer, these networks have four neurons corresponding to the input signals, i.e. the parameters characterizing the mechanical properties of the mined rocks (compressive strength $\sigma_c$ and the number of brittleness $\kappa$), the set speed of movement of the cutter heads $v_{OW}$ (characterized by the opening factor of the hydraulic distributor $k_{doH}$) and the volume of the "excavated" rock V. To take into account the influence of the angular velocity of the cutter heads $\varphi_G$ on the considered parameters characterizing the dynamic state of the roadheader and the course of the simulated mining process, the characteristics obtained from computer simulations carried out for the angular velocity of the cutter heads from a wide range, corresponding to the frequency of the motor supply voltage in their drive $f_{ZAD}$, were analyzed from 25 to 50 Hz. By changing the frequency of the motor supply voltage, the angular velocity of the cutter heads is changed. For this purpose, the actual roadheader is equipped with a frequency converter. An example of such characteristics is shown in Fig.4. As can be seen, they form families of lines reflecting the dependence of the values of parameters characterizing the load of the roadheader drives responsible for mining and the energy consumption of this process on the speed of movement of the cutter heads for the tested frequencies of the motor supply voltage in the drive of the cutter heads. In the examples shown, the average values are considered torque on the motor shaft ($T^m$). The characteristics shown refer to the mining of rock with a compressive strength of $\alpha_c = 50$ MPa with a web of cut of z = 100 mm, and a cut height of h = 400 mm.

It can be seen that the lines corresponding to the individual frequencies of the motor supply voltage have a similar shape. The lower the frequency $f_{ZAD}$, the more these lines are shifted to the left (towards lower velocities $v_{OW}$). This is due to the physical nature of the mining process with the transverse heads of the roadheader. The kinematics of this type of cutter head means that the sequence of cuts, and thus their shape and size, is determined by the ratio of the speed of movement of the cutter heads to their angular velocity. For the same values of the ratio $v_{OW}/\varphi_G$ load of the cutter heads, the load will therefore be at a similar level. With this in mind, to predict the load on the roadheader drives in the {*RH-Sim*} research simulator during simulated rock mining at different angular speeds of the cutter heads, the equivalent value of the displacement velocity of the cutter heads $v_{OW\,50}$ is determined, understood as the value corresponding to the nominal angular speed of the cutter heads at the motor supply frequency $f_{50} = 50$ Hz. The mean value of torque on the shaft of this motor ($T^m$) should be at a similar level as at the given angular velocity of the cutter heads:

$$T^m = const \Leftrightarrow v_{OW\,50} = v_{OW} \cdot \frac{f_{50}}{f_{ZAD}} \qquad [mm.s^{-1}] \qquad (1)$$

where:

$T^m$ ..... average torque value on the motor shaft in the cutter head drive [Nm],

$v_{OW\,50}$ ..... equivalent speed of cutter head movement in working motion [mm.s$^{-1}$],

$v_{OW}$ ..... actual speed of moving cutter heads in working motion [mm.s$^{-1}$],

$f_{50}$ ..... reference frequency of the motor supply voltage in the cutter head drive [Hz],

$f_{ZAD}$ ..... the actual frequency of the motor supply voltage in the cutter head drive [Hz].

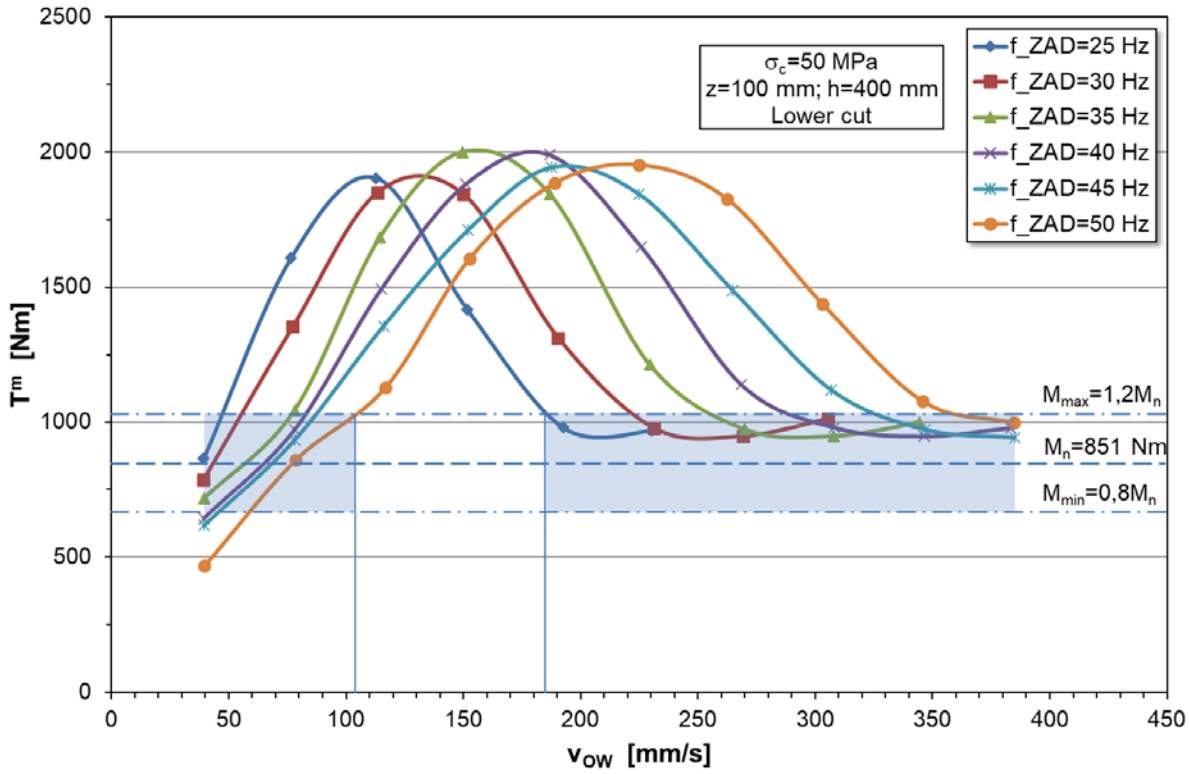



Fig.4 Dependence of the average torque on the motor shaft in the cutter head drive on the cutter head movement speed during making a lower cut

Figure 5 shows the relationship between the average torque ($T^m$) characterizing the load of the roadheader cutter heads drive responsible for the mining process and the energy consumption of mining during making a lower cut as a function of the equivalent speed of moving the cutter heads and different frequencies of the motor power supply in their drive. As expected, the characteristics overlap. The prediction of the values characterizing the load of the roadheader drives using ANN, at a given angular speed of the cutter heads (corresponding to the set frequency of the supply voltage) is preceded by the determination of the equivalent value of the cutter head movement speed from formula (1). The forecast of the values of individual parameters is therefore made for the nominal angular velocity of the cutter heads ($f_{ZAD}$ = 50 Hz) and the appropriately calculated speed of their movement parallel to the floor (in working motion).

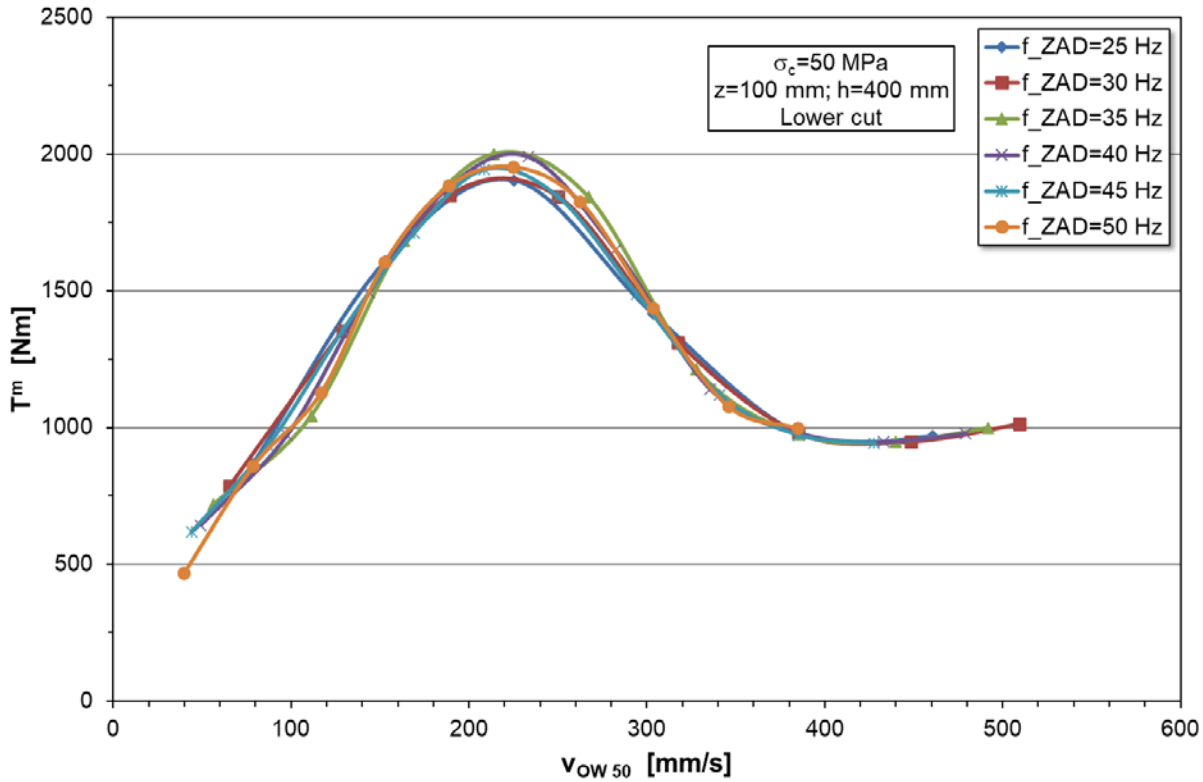



Fig.5 Dependence of the mean value of the torque on the motor shaft in the cutter head drive on the equivalent speed of the cutter heads while making the lower cut

## 4 Modelling of the dynamic properties of the roadheader as a control object equipped with an automatic control system

This chapter describes how to solve the problem of the {*RH-Sim*} simulator mapping the realistic behavior of a roadheader as an adjustment object. The values of the parameters generated by the Setting System, at which the process of shaping the virtual heading face is to take place, are carried out using executive systems. The change of speed $v_{OW}$ takes place in an open system as a result of the software increase of the value of the opening factor of the distributor $k_{doH}$. On the other hand, the change of the values of the other two parameters, i.e. the angular speed of the cutter heads $\varphi_G$ ($\Delta f$) and the cut height h ($\Delta\alpha_V$) is made with the use of Pi and P controllers operating in a closed system.

Figure 6 shows the characteristics of the electrohydraulic valve used in a real object. The angular speed of the boom rotation begins to increase when the distributor is opened corresponding to $k_{doH} > 0.2$. In the initial phase of movement, the increase in the angle of rotation of the boom and its angular velocity is non-linear (the boom accelerates). These characteristics become linear only when the valve is opened for $k_{doH} \geq 0.7$. The dependence of the angular velocity of the boom swing in the horizontal plane on the opening factor of the distributor is described with a good approximation by the quadratic function:

$$\omega_{OW} = 0.1317 \cdot k_{doH}^2 + 0.0073 \cdot k_{doH} - 0.0056 \qquad [\mathrm{rad.s^{-1}}] \qquad (2)$$

The circumferential speed of the boom swinging (the speed of movement of the cutter heads in the working movement) is expressed as follows:

$$v_{OW} = \omega_{OW} \cdot (L_2 + L_1 \cdot \cos\alpha_V) \qquad [mm.s^{-1}] \qquad (3)$$

where:

$\omega_{OW}$ ..... angular speed of boom inclination in the horizontal plane [rad.s$^{-1}$],

$v_{OW}$ ..... speed of movement of cutter heads in working motion [mm.s$^{-1}$],

$k_{doH}$ ..... opening ratio of the electrohydraulic valve [--],

$L_1$ ..... boom length [mm],

$L_2$ ..... distance of the rotation axis of the turntable from the axis of rotation of the boom [mm],

$\alpha_V$ ..... boom deflection angle in the vertical plane [deg].

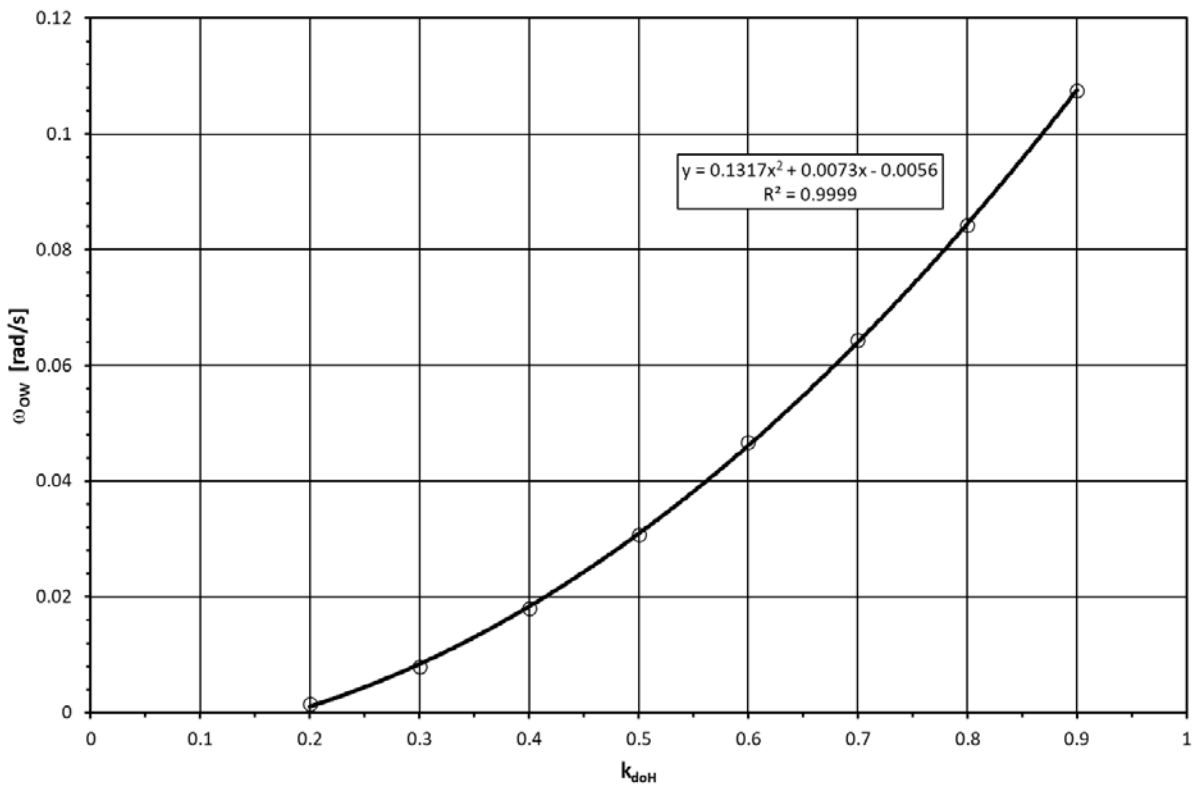



Fig.6 Dependence of the angular velocity of the boom swinging in the horizontal plane on the opening ratio of the electro-hydraulic distributor

The vertical boom tilt control system in the real solution is equipped with a P-controller operating in a closed feedback loop. The course of the control process and the dynamic properties of the controlled object make it possible to reach the set value with a certain delay. Fig.7 shows three examples of the behavior of a real roadheader equipped with the above-mentioned adjustment system during a step change in the set value of the

boom angle $\alpha_V$. The step change of the set value by 1º was carried out in about 3 s (Fig.7a and b). So you can see that a large step change in the set point of the $\alpha_V$ boom swinging angle does not significantly affect the adjustment time. During automatic mining, a relatively small correction of the boom tilt angle $\alpha_V$ is assumed in subsequent periods of rotation of the cutter heads ($\Delta\alpha_V$ = 1º ↔ Δh = ~± 60 mm). To simulate the behavior of the boom tilt control system in the vertical plane, the waveforms shown in Fig.7 were linearized in the {*RH-Sim*} simulator. The course of the value of angle $\alpha_V$ as a function of time is described by the following formula:

$$\alpha_V^{(j)} = \alpha_V^{(j-1)} \pm 0.33 \cdot \Delta t \qquad \text{for } j = 0, \ldots, N \qquad [\text{deg}]$$

$$\text{whereby:} \qquad N = \mathrm{Ent}\left(\frac{T_G}{\Delta t}\right) \qquad (4)$$

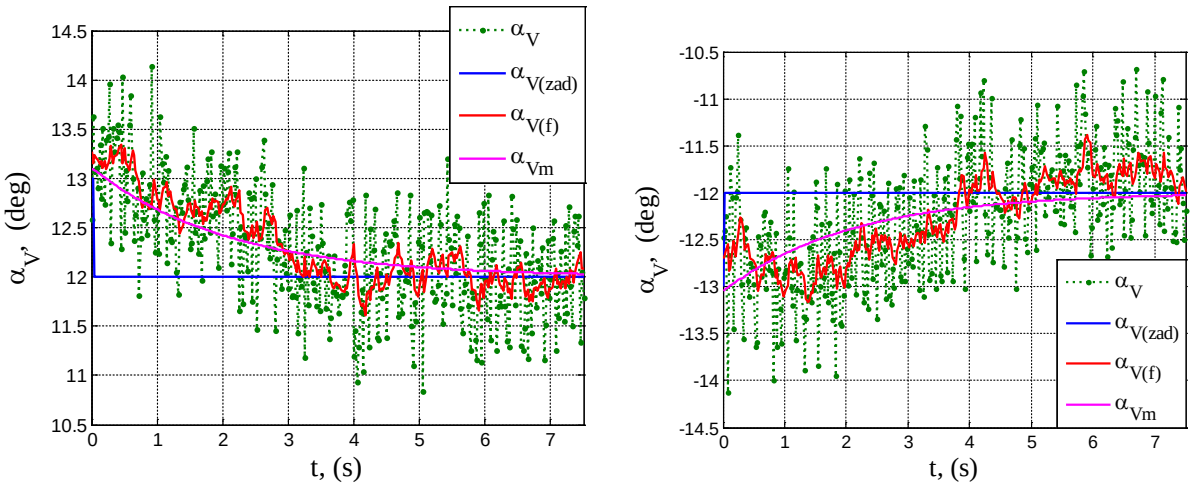
where:

Δt ..... period (step) of the roadheader boom movement animation during mining in automatic mode [s],

$T_G$ ..... the rotation period of the cutter heads at a given motor supply voltage frequency [s],

$\alpha_V^{(j)}$ ..... the current value of the boom tilt angle in the vertical plane [deg].

The "+" sign applies when the boom is swiveled upwards, which means a reduction in the height of the lower cut. On the other hand, the "–" sign applies when the boom is swiveled downwards, which means an increase in the height of the lower cut. In the case of the upper cut, the effect is the opposite.




a) b)

Fig.7 Behaviour of the boom tilt angle adjustment system in the vertical plane in response to a step change in the setpoint (controller P): a) change of angle $\alpha_V$ in the range of 13º to 12º, b) change of angle $\alpha_V$ in the range from -13º up to -12º [6]

## 5 First tests of the automatic control system on the virtual stage of the roadheader research simulator {*RH-Sim*}

To test the operation of the automatic control system for the movement of cutter heads in the {*RH-Sim*} research simulator, an application with the implemented Setting System algorithm was developed, which will ultimately be installed in the reTerminal microcomputer (Fig.8). This application is connected via an Ethernet link with the main program of the simulator and the software of the Operator Panel, in which the parameters of the roadheader and its dynamic load are predicted.

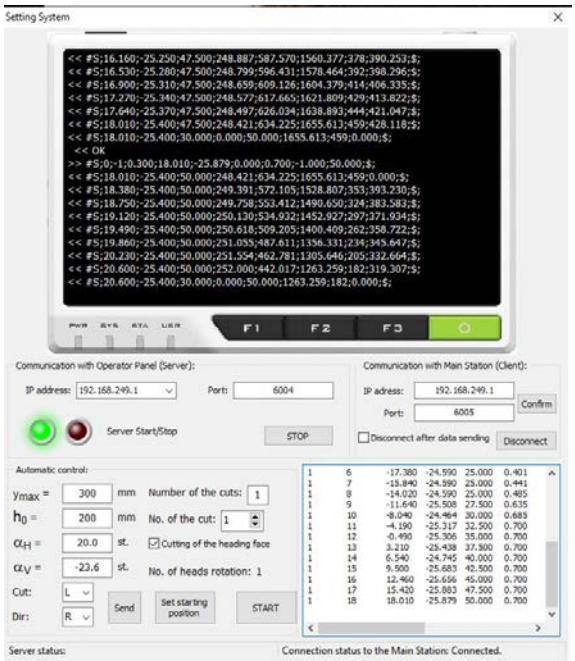



Fig.8 User interface of the Setting System software

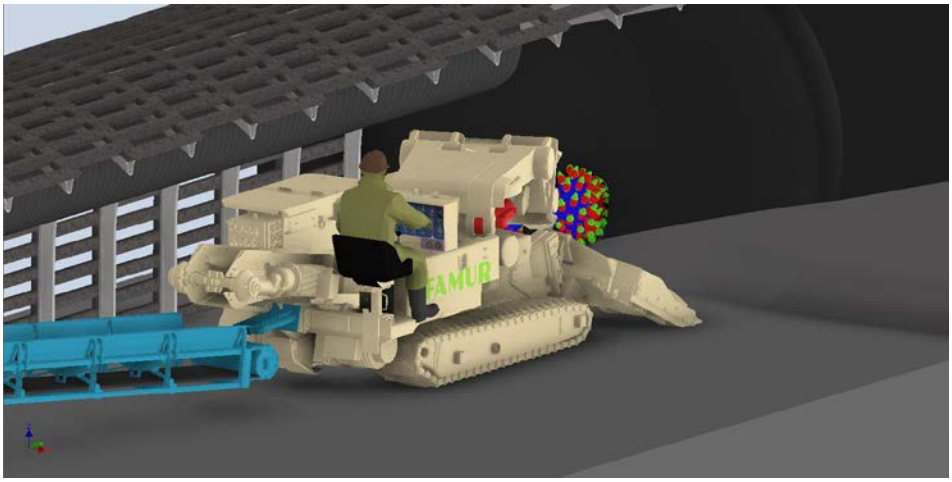
The developed application allows you to set the initial values of the mining process parameters, i.e.:

- web of cut $y_{max}$,
- initial cut height $h_0$,
- the maximum angle of rotation of the boom $\alpha_H$, after which the mining will stop,
- the initial angle of deflection of the boom in the vertical plane $\alpha_V$,
- type of cut (lower/upper),
- cutting direction (right/left).

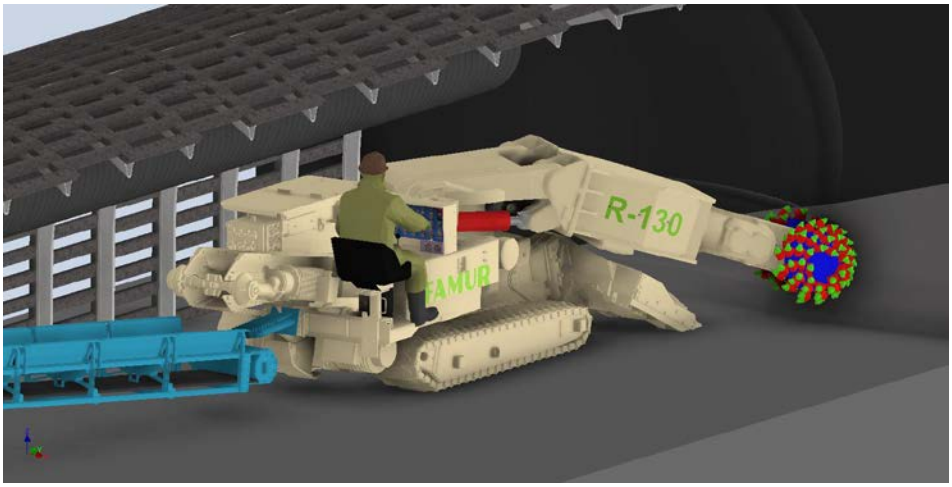
The "Set starting position" button activates the procedure of setting the cutter heads to the initial position and their reworking to the assumed depth ymax (Fig.9a). Selecting the "START" option starts controlling the roadheader on a virtual stage. The first cut is made to the full height ($h = h_{max}$) resulting from the set web of cut (Fig.9b). It is carried out without changing the position of the boom in the vertical plane. The next cut (Fig.9c) is

made after the cutter heads have been moved by the size resulting from the assumed initial cut height $h_0$. In the presented situation, the boom was tilted downwards by $\Delta_{\alpha V}$ = 3.6º.

a)




b)




c)

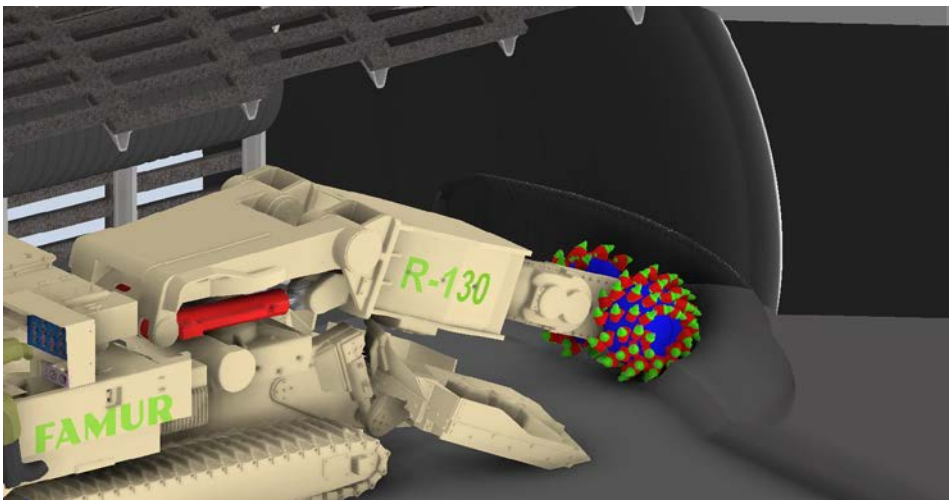
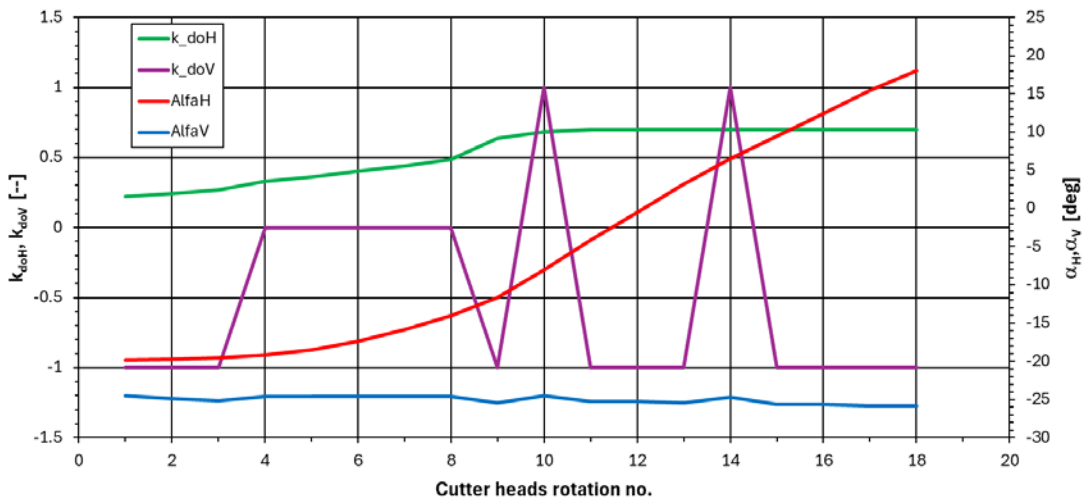
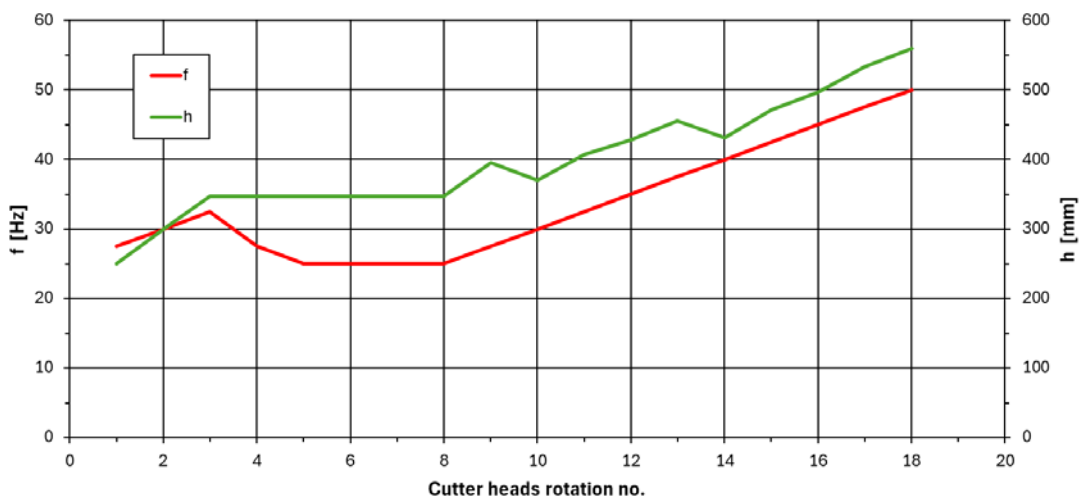



Fig.9 Initial phase of the simulation of mining the heading face with a roadheader in automatic mode: a) starting position, b) after making the first cut at full height, c) making the bottom cut ($y_{max}$ = 300 mm, $h_0$ = 200 mm)

Figures 10 - 12 show the result of the simulation of the automatic mining of the face surface in the {*RH-Sim*} simulator. The boom was tilted to the left to the position corresponding to the values of the tilt angles: $\alpha_H$ = -20º and $\alpha_V$ = -23.6º. The initial value of the cutting height $h_0$ is 200 mm. After the cutter heads had made their first rotation, after which the values of the parameters characterizing the dynamic load of the cutter heads drive were determined, the Setting System worked out corrections to the values of the cutting process parameters, i.e. the opening ratio of the boom rotation mechanism distributor $k_{doH}$, the supply voltage frequency f and the cutting height h (Fig.10). The above-described procedure was repeated in subsequent revolutions of the cutter heads until the final value of the boom inclination angle in the horizontal plane $\alpha_H$ = +20º was reached.




a)




b)

Fig.10 The course of the parameter values generated by the Setting System during the bottom cut ($k_{doH}$, $k_{doV}$ - the opening ratio of the distributor in the boom deflection mechanism in the horizontal and vertical plane, $\alpha_H$, $\alpha_V$ - boom deflection angles in the horizontal and vertical plane, f - supply voltage frequency, h - cut height)

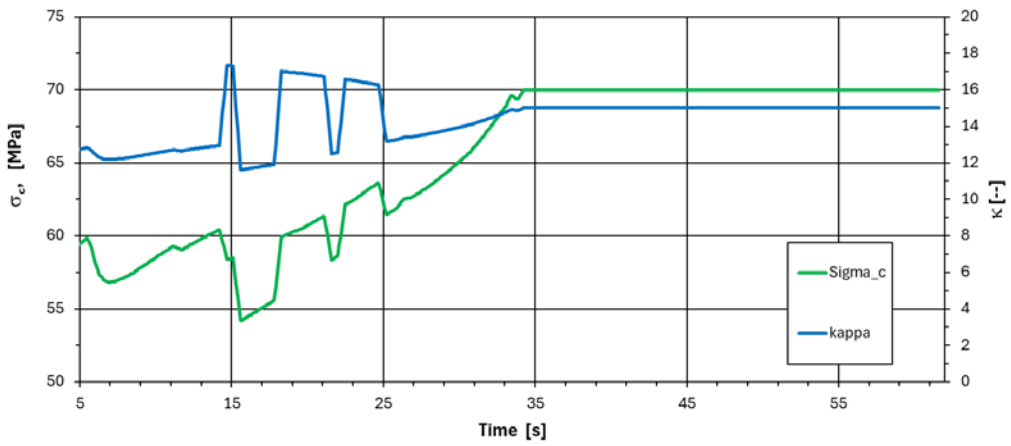
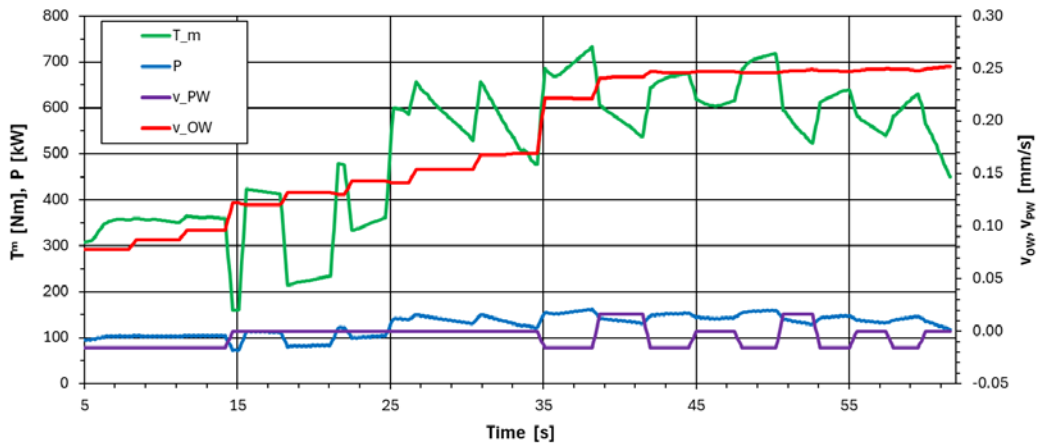
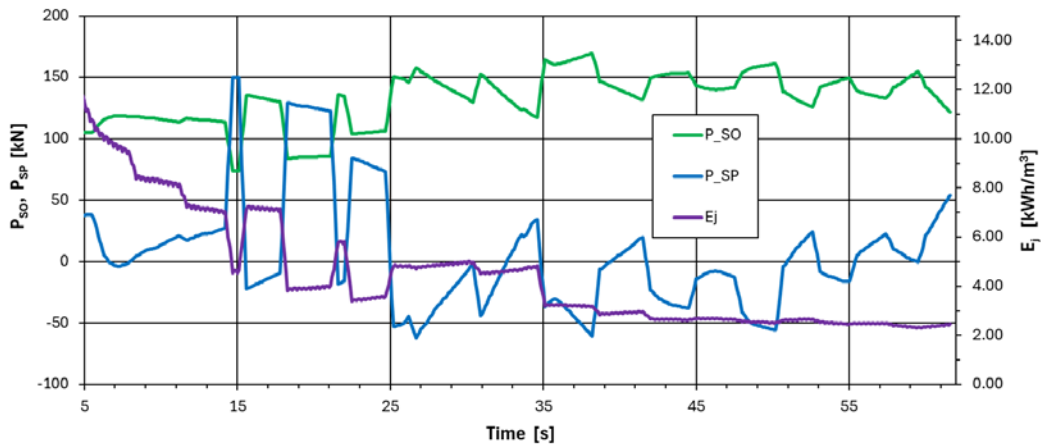



Fig.11 The course of the average compressive strength of the mined rocks and their brittleness number ($\sigma_c$ - uniaxial compressive strength, κ - brittleness number)




a)




b)

Fig.12 Predicted response of the roadheader to the signals controlling its operation in automatic mode ($T^m$ - average value of the torque on the engine shaft, P - power for mining, $v_{OW}$, $v_{PW}$ - boom swinging speed in the horizontal and vertical plane, $P_{SO}$, $P_{SP}$ - load of the boom deflection actuators in the horizontal and vertical plane, $E_j$ - energy consumption during mining)

As the cutter heads moved parallel to the floor of the excavation, the conditions of the cutting process changed. The compressive strength of the rocks, the cutting of which was simulated $\sigma_c$, increased within the range from 55 to 70 MPa (Fig.11 - green line). The brittleness number $\kappa$ changed within the range from 12 to 17 (blue line). The effects of regulating the parameters of the cutting process are visible in Fig.12. The random selection of the initial values of the web of cut and cut height caused the cutter head drive to be significantly underloaded. The average value of the torque on the motor shaft in the cutter head drive Tm was around 300 Nm (with a nominal value of 851 Nm). The role of the Setting System was therefore to increase the load of the roadheader to improve the degree of utilization of the installed power. As a result, the load increased in subsequent revolutions of the cutter heads, reaching the level of 700 Nm (0.82% of the nominal torque) - Fig.12a - green line. As the cutting was performed, the speed of the cutter heads $v_{OW}$ (red line) and the cut height (Fig.10b - green line) systematically increased. This was accompanied by an increase in the cutting efficiency and a decrease in the energy consumption of this process $E_j$ (Fig.12b - purple line). Within 55 s of cutting, this energy consumption decreased 6-fold (from 12 to about 2 kWh.m$^{-3}$).

## 6 Conclusions

In the era of striving for full automation and robotization of mining works in mines, there is a need to develop effective and efficient algorithms for the automatic control of mining machines. One of the directions of this research and implementation work is the robotization of roadheaders widely used for drilling roadways in underground mines and tunnels. In the case of cutting machines, one of the key tasks of the automatic control system is to optimize the course of the rock mining process. This is difficult due to the stochastically changing properties of the mined rocks, which forces continuous correction of the values of the mining process parameters over time. On the one hand, these corrections must be introduced quite quickly, because the time of performing one cut with a roadheader usually does not exceed 50 ÷ 60 s. On the other hand, the adjustment of settings cannot lead to the loss of stability of the control system and the controlled machine. The use of simulation tools is today a basic tool in research. In addition to classic programming environments used to build simulation models (Matlab/Simulink, C++, Delphi), it is possible to use physical simulators for various types of experiments. An example is the roadheader research simulator {*RH-Sim*} described in this paper. It is equipped with a platform that reproduces the actual operator's station of the roadheader, equipped with manuals and indicators, just like in a real roadheader. The cutting of the face is carried out on a virtual stage, while the prediction of the operating parameters and dynamic load of the roadheader is made using the predictive models implemented in the simulator software. The simulator is equipped with a microcomputer in which the Setting System is implemented, which develops the set values of control signals. These signals control the drives of the virtual roadheader, just like in the real machine. Equipping the simulator {*RH-Sim*} with an automatic control system for the movement of cutting heads provides wide diagnostic possibilities. It is possible to test various strategies for automatic control of the roadheader to meet the assumed target functions. It is also possible to select the control system parameters. Experiments conducted on the virtual simulator stage are safe and inexpensive. They do not require expensive adaptation of the actual machine for automatic control purposes, construction of full-scale experimental stations, or conducting arduous tests in operating conditions (for example, underground in mines or on a tunnel construction site). Field tests can therefore be limited to final verification of the effectiveness of the automatic control system developed in this way.

**References:**


[1] Cheluszka P. Predykcja parametrów pracy oraz obciążenia dynamicznego kombajnu chodnikowego w symulatorze badawczym z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej. In *XIII Międzynarodowa Konferencja TECHNIKI URABIANIA „TUR 2024”*. Krynica Zdrój, 17 - 20 września 2024

[2] Cheluszka P., Głuszek G. a J. Melecký: Symulator oparty na rozszerzonej rzeczywistości w diagnostyce technicznej kombajnów chodnikowych i szkoleniu operatorów. In *40. Technical Diagnostics of Machines and Manufacturing Equipment DIAGO 2023”*. Sniezne - Milovy, 31.01-1.02.2023 r.

[3] Cheluszka P., Mikuła S., Mikuła J. and J. Fries. *Improving the operational durability of tangential-rotary picks for rock cutting with central spraying and hydrodynamic rotation*. Sci Rep 14, 12946 (2024), pp. 23. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-63733-1

[4] Cheluszka P., Remiorz E. and J. Rostami. *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. and P. Sobota. Automatic control of working process parameters as a condition for robotisation of mining machines. Proceeding of the *23rd International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR)*, Miedzyzdroje (Poland), 2018, 27–30 August: 211–216. DOI: 10.1109/MMAR.2018.8486000

[6] Cheluszka P. i inni: Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego PBS3/B2/15/2015: *Sterowanie ruchem głowic urabiających kombajnu chodnikowego dla potrzeb obniżenia energochłonności urabiania i obciążeń dynamicznych - Zad. 14: Testowanie działania układu automatycznego sterowania w warunkach laboratoryjnych*. Gliwice, grudzień 2017 (praca niepublikowana)

[7] Daobin Wang, Yi Chai, Rui Ling, Liang Li. Research on Automatic Boom-type Roadheader Profiling. Proceedings of the *7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Chongqing (China), 2008, 25–27 June

[8] Dolipski M, Cheluszka P. and P. Sobota. The relevance of the rotational speed of roadheader cutting heads according to the energy consumption of the cutting process. In *Archives of Mining Sciences 2013*; 58; 1: 3–19

[9] Jasiulek D. and J. Świder. *Mechatronic systems in mining roadheaders - examples of solutions*. PAR 2013; 1: 121 - 127

[10] Jasiulek D, Stankiewicz K. and J. Świder. An adaptive control system of roadheader with intelligent modelling of mechanical features of mined rock. In *Journal of KONES Powertrain and Transport 2011*; 18(2): 197 - 203

[11] Tong Minming, Kang Dongliang, Liu Peng. Research on Automatic Section Cutting Control of Roadheader. Proceedings of the *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Changsha City (China), 2010 13–14 March: 22–25

[12] Rogala J. Use of artificial intelligence to control roadheader cutter jib movements. In *Mining Machines 2008*; 26; 3: 21–25

# VN POLYGON PRO TESTOVÁNÍ BEZKONTAKTNÍCH METOD NA DETEKCI ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

# HV POLYGON FOR TESTING NON-CONTACT METHODS FOR PARTIAL DISCHARGE DETECTION

**Ondřej KABOT**, VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET [1]
**Jan FULNEČEK**, VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET [2]
**Lukáš PROKOP**, VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET [3]
**Stanislav MIŠÁK**, VŠB - Technická univerzita Ostrava, CEET [4]

**Anotace:**

Zkoumání různých technologií pro detekci částečných výbojů je možné také v laboratorním prostředí. V tomto případě však výzkum probíhá bez vlivů okolí, které jsou v praxi vždy přítomné a významně ovlivňují funkčnost detekce částečných výbojů. Testování na komerčních distribučních sítích je nevhodné, jelikož je zde mnoho bezpečnostních opatření, které je nutno dodržet a není možné na nich uměle vyvolávat poruchové stavy. Z toho důvodu je využíváno testovacího polygonu, který je postaven specificky z tímto účelem a umožňuje zkoumání této problematiky ve venkovním prostředí se všemi okolními vlivy.

**Annotation:**

Investigating different technologies for partial discharge detection is also possible in a laboratory environment. In this case, however, the research is carried out without environmental influences, which are always present in practice and significantly affect the functionality of partial discharge detection. Testing on commercial distribution networks is impractical as there are many safety measures to be adhered to and it is not possible to artificially induce fault conditions on them. For this reason, a test polygon is used which is built specifically for this purpose and allows the investigation of this issue in an outdoor environment with all the surrounding influences.

(úplný text příspěvku nebyl autory do termínu uzávěrky sborníku konference zaslán)

[1] Ing. Ondřej Kabot, Ph.D., CTD
Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Centrum energetických a environmentálních technologií
17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava - Poruba
tel.: +420 596 993 449, e-mail: ondrej.kabot@vsb.cz, https://ceet.vsb.cz/cs
[2] doc. Ing. Jan Fulneček, Ph.D., CTD
tel.: +420 596 993 449, e-mail: jan.fulnecek@vsb.cz
[3] doc. Ing. Lukáš Prokop, Ph.D., CTD
tel.: +420 596 999 306, e-mail: lukas.prokop@vsb.cz
[4] prof. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D., CTD
tel.: +420 596 999 308, e-mail: stanislav.misak@vsb.cz

# BADANIA DIAGNOSTYCZNE MECHANICZNEJ TRAKTURY ORGANÓW PISZCZAŁKOWYCH

# DIAGNOSTIC TESTS FOR MECHANICAL TRACKER ACTION OF PIPE ORGANS

**Tomasz KĄDZIOŁKA**, Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu, Polska [1]

**Streszczenie:**

W pracy zostaną zaprezentowane badania diagnostyczne mechanicznej traktury organów piszczałkowych. Pokazany zostanie wpływ remontu organów na zmianę siły nacisku na poszczególnych klawiszach. Przedstawiony zostanie również wpływ ciśnienia w komorze wiatrowej na siłę nacisku na klawisze oraz na komfort pracy organisty.

**Annotation:**

The paper will present a diagnostic study of the mechanical tracker action of a pipe organ. The effect of organ renovation on the change of pressure force on individual keys will be shown. The influence of the pressure in the wind chamber on the pressure force on the keys and on the comfort of the organist will also be presented.

(úplný text příspěvku nebyl autorem do termínu uzávěrky sborníku konference zaslán)

[1] dr inż. Tomasz Kądziołka
Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu
ul. Zamenhofa 1a, 33-300 Nowy Sącz, Poland
e-mail: tkadziolka@ans-ns.edu.pl

# ČERNÁ TĚLESA - JEJICH VLASTNOSTI A KONSTRUKCE

**Jan KOVÁŘ**, W-Technika group s.r.o., Praha [1]

**Anotace:**

Cílem příspěvku je seznámit posluchače s typy černých těles využívaných při kalibraci infračervených kamer a pyrometrů v kalibračních laboratořích a testovacích centrech. Projít si hlavní technické parametry těchto zařízení, jejich vlastnosti a charakteristiky. Současně si projít principy konstrukce a jednotlivé součásti, ze kterých se skládají. Posluchač by se měl po této prezentaci dobře orientovat v rozdílech mezi plošným a kavitovým tělesem a znát omezující podmínky pro jejich používání.

(úplný text příspěvku nebyl autorem do termínu uzávěrky sborníku konference zaslán)

[1] Ing. Jan Kovář, CTD
W-Technika group s.r.o.
Na Okraji 335/42, 162 00 Praha 6 - Veleslavín
e-mail: jan.kovar@w-technika.cz, https://www.w-technika.cz/

# DIAGNOSTYKA UKŁADU WYDECHOWEGO W KONTEKŚCIE OCENY EMISJI ZWIĄZKÓW SZKODLIWYCH SPALIN

# DIAGNOSTICS OF THE EXHAUST SYSTEM IN THE CONTEXT OF ASSESSING THE EMISSION OF HARMFUL EXHAUST GASES

**Sławomir KOWALSKI**, Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu, Polska [1]

**Annotation:**

The aim of this work is to compare the concentration of chemical compounds found in the exhaust gases of cars supplied with different fuels, depending on the engine speed and vehicle mileage. Testing the exhaust gas composition of low and high mileage cars showed significant differences in emissions. High mileage cars demonstrate higher emissions of toxic exhaust gas components. However, those emissions do not exceed permissible standards and the vehicles may still be operated. A comparison of exhaust emissions from vehicles fueled with LPG and unleaded petrol confirmed the advantage of the gaseous fuel in terms of the emission of toxic components into the surroundings. Tests performed on cars with compression-ignition engines showed a negligible difference in the emission of particulates into the surroundings, despite the differences in exhaust gas treatment systems and the vehicle mileage.

(úplný text příspěvku nebyl autorem do termínu uzávěrky sborníku konference zaslán)

[1] dr hab. inż. Sławomir Kowalski, prof. ANS
Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu
ul. Zamenhofa 1a, 33-300 Nowy Sącz, Poland
e-mail: skowalski@ans-ns.edu.pl

# OVLIVNĚNÍ PIEZOELEKTRICKÝCH AKCELEROMETRŮ PROVOZEM PŘENOSNÝCH VYSÍLAČEK

**Sven KÜNKEL**, Voith Hydro s.r.o., Plzeň [1]
**Ondřej SUCHÝ**, Voith Hydro s.r.o., Plzeň [2]

**Anotace:**

Autoři článku uváděli do provozu systém pro monitoring vibrací vodní elektrárny a při tom se setkali s jevem, kdy provoz přenosných vysílaček pracujících v oblasti frekvencí VHF významným způsobem ovlivňoval činnost piezoelektrických akcelerometrů. Konkrétně se jednalo o špičky v průběhu měřených RMS hodnot vibrací s hodnotou řádově až 1 000 mm.s$^{-1}$. Následně byla provedena podrobnější a systematická analýza jak na elektrárně samotné, tak v laboratoři. Výsledky potvrdily silné ovlivňování akcelerometru v okamžiku, kdy došlo k zahájení komunikace (zaklíčování) a v případech, kdy vysílačka byla v těsné blízkosti senzoru. Srovnání s akcelerometrem jiného výrobce navíc prokázalo, že mezi akcelerometry jsou z hlediska zmíněného ovlivňování značné rozdíly.

**Annotation:**

The authors were commissioning a vibration monitoring system of a hydro power plant and encountered a phenomenon where the operation of VHF frequency range walkie-talkies significantly affected the operation of piezoelectric accelerometers. Specifically, these were peaks in the measured RMS vibration values with a value of up to 1 000 mm.s$^{-1}$. Subsequently, a more detailed and systematic analysis was carried out both at the power plant itself and in the laboratory. The results confirmed the strong influence of the accelerometer at the moment when communication was initiated (PTT button press) and in cases where the radio was in close proximity to the sensor. Furthermore, a comparison with an accelerometer from another manufacturer showed that there are significant differences between accelerometers in terms of the aforementioned influence.

## 1 Úvod

Vodní elektrárna byla tvořena dvěma horizontálními dvojitými francisovými turbínami, z nichž každá má maximální výkon 20 MW. Elektrárna se dále vyznačovala prostornou strojovnou, v níž se kromě soustrojí nacházely bez stavebního oddělení také skříně řídicího systému a monitoringu. Tato skutečnost dle autorů článku přispívá k náchylnosti na níže popsané jevy.

Po prvním pozorování na elektrárně byly provedeny systematické testy, aby se tento jev prozkoumal. Během těchto testů byla systematicky měněna poloha a natočení vysílačky. Rovněž byly měněny senzory, kabely a metody zapojení stínění. Ukázalo se, že některé levnější a méně kvalitní akcelerometry jsou silněji ovlivněny rádiovým rušením než

[1] Ing. Sven Künkel, Ph.D., CTD
Voith Hydro s.r.o.
Božkovské náměstí 17/21, 326 00 Plzeň - Božkov
mobil: +420 731 163 890, e-mail: sven.kuenkel@voith.cz, https://www.voith.cz/
[2] Ing. Ondřej Suchý, CTD
mobil: +420 604 238 433, e-mail: ondrej.suchy@voith.cz

jiné kvalitnější a dražší senzory (Wilcoxon, B&K). Rovněž bylo prokázáno, že rádiové rušení lze výrazně minimalizovat použitím konektoru snímače, který prodlužuje stínění kabelu a umožňuje vytvořit souvislou plochu uzavřenou stínením kabelu a kovovým pouzdrem snímače.

V dalším budou ukázány výsledky následujících testů provedených v elektrárně:

1) referenční měření s výchozím snímačem a zapojením

Výchozí snímač byl piezoelektrický akcelerometr s citlivostí 500 mV/g, rozsahem ± 10 g, frekvenčním rozsahem 0,17 Hz ÷ 10 kHz (± 3 dB), izolovaným pouzdrem a přímým konektorem. Výrobce nemůže být uveden.

2) měření za pozměněného zapojení uzemnění stínění kabelu

V elektrárně bylo stínění kabelů snímačů uzemněno ve svorkovnicových skříňkách. Myšlenkou tedy bylo odstranit toto uzemnění ve skříňkách a místo toho jej připojit ke stínění navazujícího kabelu vedoucího do hlavní skříně monitoringu a stínění uzemnit až tam. Toto řešení je doporučeno např. i standardem API 670, viz [1].

3) měření pomocí dočasného EMC kabelu

Termín EMC kabel budeme pro zjednodušení používat pro kabel, který je vybaven konektorem, který zajišťuje jednolitou uzavřenou vodivou plochu spojující stínění kabelu a pouzdro snímače.

4) měření s izolovaným senzorem

Tím je myšlen snímač izolovaný od ložiska elektricky nevodivou podložkou. Jako kabel byl použit stejný EMC kabel jako v (3). Celý systém pouzdro snímače + stínění kabelu je uzemněn na druhé straně kabelu ve svorkovnicové skříňce.

5) měření se senzorem Wilcoxon 780A

Stejný test jako v (1), jen se sensorem vyšší kvality - vysoce kvalitní akcelerometr se podobnými parametry a stejným konektorem jako výchozí snímač.

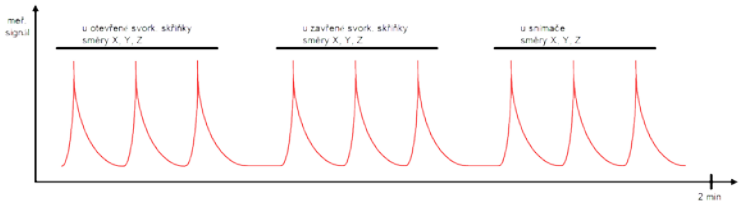
6) měření s izolovaným senzorem Wilcoxon 780A

Stejný test jako v (4), jen se sensorem vyšší kvality.

Před provedením testů byla kvalita zemění zkontrolována pomocí zařízení pro měření elektrického odporu zemní smyčky. Tím bylo ověřeno, že s uzemněním nejsou žádné problémy.

## 2 Výsledky testů

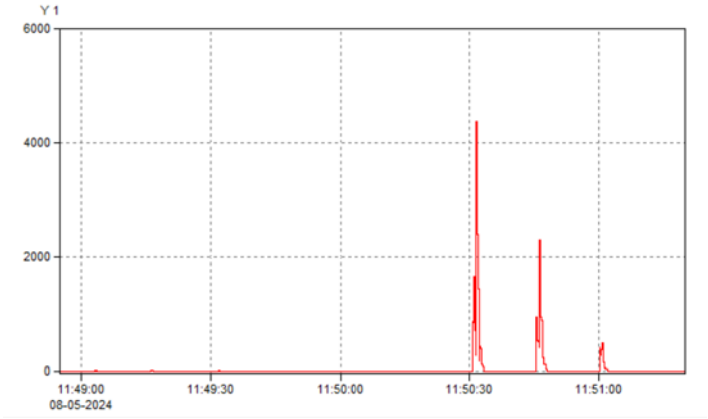
Během každého testu byla v časovém intervalu asi 2 min postupně vystřídána 3 místa, v každém z nichž byla 3x sepnuta vysílačka. Vysílačka byla v každém místě natočena do 3 vzájemně kolmých os X, Y a Z. Jak bude vidět ze srovnání následujících grafů, velikost špiček v měřeném signálu se liší podle místa i podle natočení vysílačky.




Obr.1 Vzorec testu společný všem měření, pokud není uvedeno jinak

ad 1)

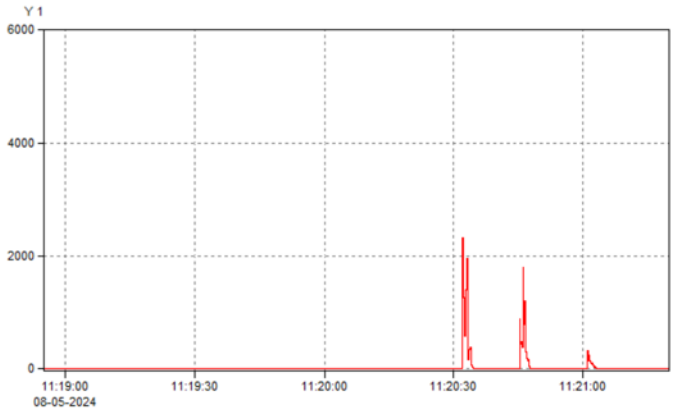
Při referenčním měření byly hodnoty špiček maximální. Největších hodnot je dosaženo s vysílačkou u snímače - tři špičky v pravé části grafu.




Obr.2 Výchozí snímač a výchozí zapojení stínění

ad 2)

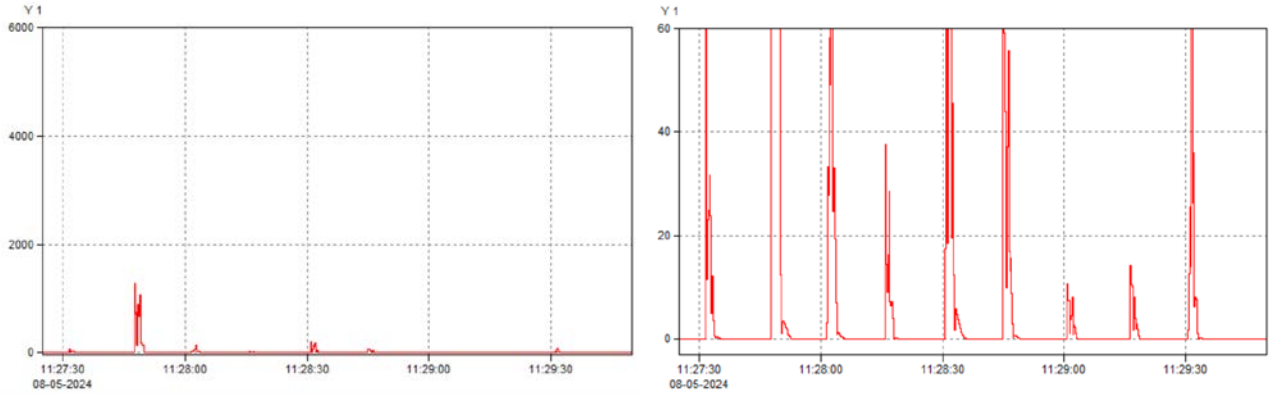
Při průběžném stínění bylo dosaženo mírného snížení špiček.




Obr.3 Výchozí snímač a „průběžné stínění“

ad 3)

Použití „EMC kabelu“ rasantně sníží špičky, když je vysílačka u snímače, ale zato zvýší špičky při vysílačce umístěné u skříňky. To je dáno tím, že stínění tohoto kabelu muselo ve skříňce zůstat nezapojené, neboť bylo implicitně uzemněné přes kryt snímače a následně ložisko stroje. Volný konec stínění ve skříňce tedy pro rádiové vlny fungoval jako anténa.

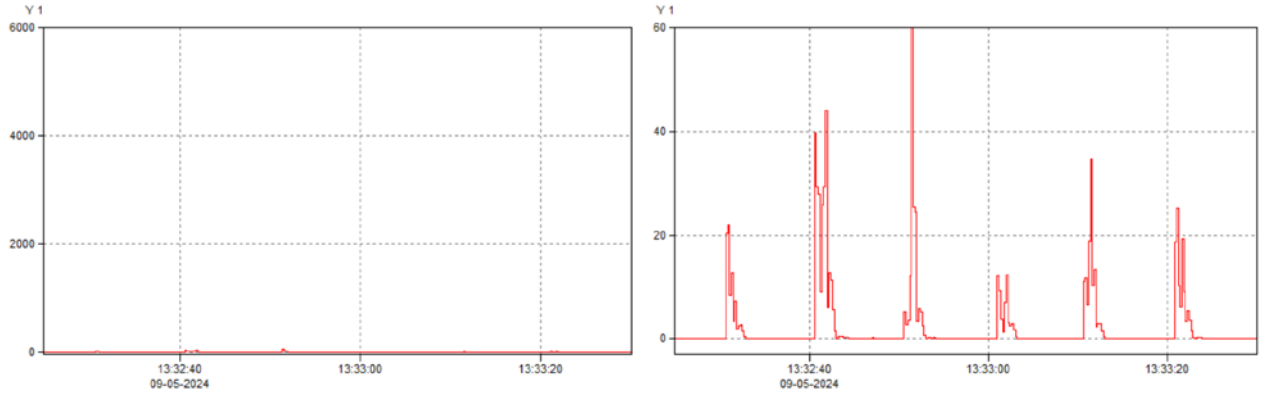



Obr.4 Výchozí snímač + „EMC kabel“

ad 4)

Zlepšení oproti testu (3) lze dosáhnout tím, že se použije izolační podložka a stínění kabelu se uzemní ve skříňce.

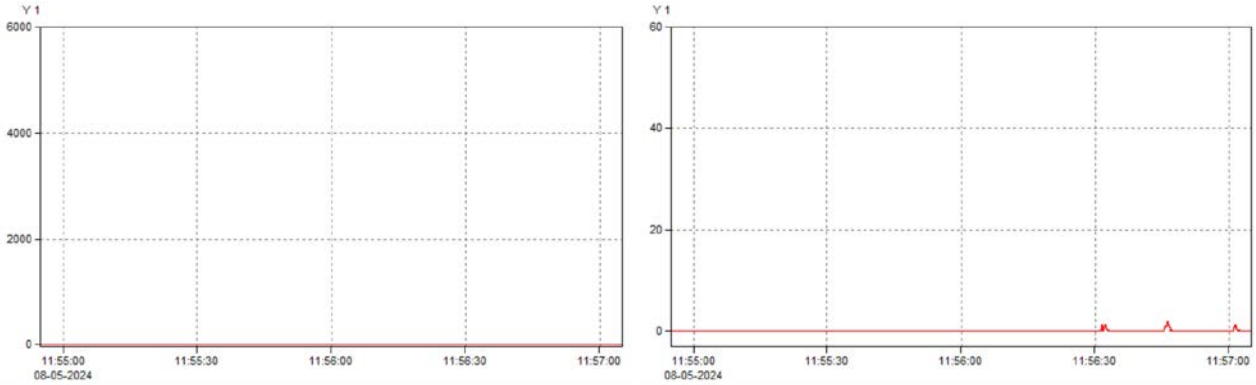
Pozn. Byly testovány jen dvě místa. Levá trojice jsou směry X, Y, Z u zavřené skříňky, pravá trojice jsou směry X, Y, Z u snímače.




Obr.5 Výchozí snímač s izolační podložkou + „EMC kabel“

ad 5)

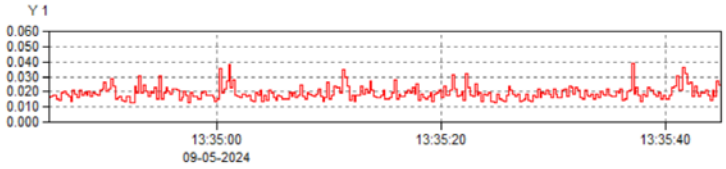
Při použití kvalitnějšího snímače Wilcoxon 780A a zapojení jako v případu (1) jsou špičky o tři řády nižší.




Obr.6 Snímač vyšší kvality + výchozí zapojení stínění

ad 6)

Při použití kvalitního snímače v kombinaci s izolovanou podložkou je vliv rádiových vln eliminován na nepozorovatelnou úroveň.




Obr.7 Snímač vyšší kvality + „EMC kabel“

## 3 Závěr

Výsledky provedených testů ukazují, jak silné může být ovlivňování akcelerometrů provozem přenosných vysílaček a jak velkou roli hraje způsob zapojení stínění. Při použití levnějšího akcelerometru se nelze vyhnout velkým špičkám v měřených signálech (případy 1 ÷ 4), pouze je možné použitím vhodného konektoru a zapojení stínění špičky poněkud zmenšit. Naopak při použití kvalitního akcelerometru lze docílit stavu, kdy se žádné rušení způsobené provozem vysílaček do signálu nepřenáší. Závěrem lze říci, že při návrhu systému pro měření absolutních vibrací piezoelektrickými snímači je vhodné vzít v úvahu jejich možné ovlivnění přenosnými vysílačkami, zejména v případech, kdy lze provoz těchto vysílaček očekávat i během normálního provozu zařízení.

**Literatura:**

[1] American Petroleum Institute. *Machinery Protection Systems. API Standard 670*. Washington 2010

# CHEMOMETRIE A INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE: MODERNÍ NÁSTROJE PRO ANALÝZU VLASTNOSTÍ PALIV

# CHEMOMETRICS AND INFRARED SPECTROSCOPY: MODERN TOOLS FOR FUEL PROPERTY ANALYSIS

**Karel MARSCHNER**, SGS Czech Republic s.r.o., Praha [1]

**Anotace:**

Chemometrie ve spojení s infračervenou spektroskopií představuje moderní nástroj pro analýzu fyzikálně-chemických vlastností automobilového benzínu a motorové nafty. Tato metodologie umožňuje predikci klíčových parametrů, jako jsou oktanová čísla, cetanové číslo, obsah aromátů, obsah methylesterů mastných kyselin, kyslíkaté látky a další.

Postupy zahrnují měření infračervených spekter pomocí FTIR spektrometrů a automatizovaných systémů, jako je autosampler, a následné zpracování dat prostřednictvím chemometrických metod, jako jsou vícerozměrná lineární regrese nebo diskriminační analýza. Klíčové je zajištění přesné kalibrace na základě referenčních vzorků a výběr optimálních vlnočtů, což umožňuje vysokou přesnost modelů pro predikci parametrů.

Analýza je zaměřena na rychlé, spolehlivé a reprodukovatelné hodnocení kvality paliv a významně přispívá k efektivní kontrole kvality automobilových paliv.

**Annotation:**

Chemometrics combined with infrared spectroscopy represents a modern tool for analyzing the physicochemical properties of automotive gasoline and diesel fuel. This methodology enables the prediction of key parameters, such as octane numbers, cetane numbers, aromatic content, fatty acid methyl ester content, oxygenates, and others.

The process involves measuring infrared spectra using FTIR spectrometers and automated systems, such as autosamplers, and subsequently processing the data with chemometric methods, including multivariate linear regression and discriminant analysis. Critical steps include precise calibration based on reference samples and the selection of optimal wavenumbers, ensuring high accuracy in the predictive models.

This approach focuses on rapid, reliable, and reproducible fuel quality assessments, significantly contributing to effective quality control of automotive fuels.

(úplný text příspěvku nebyl autorem do termínu uzávěrky sborníku konference zaslán)

[1] Mgr. Karel Marschner, Ph.D.
SGS Czech Republic s.r.o.
U Trati 42, 100 00 Praha 10 - Strašnice
tel.: +420 737 847 501, e-mail: karel.marschner@sgs.com, https://www.sgs.com/cs-cz

# UWAGI O POLIOPTYMALIZACJI W DIAGNOZOWANIU MASZYN

# NOTES ON POLYOPTIMISATION IN MACHINE DIAGNOSTICS

**Zbigniew MATUSZAK**, Politechnika Morska w Szczecinie, Polska [1]
**Iwona ŻABIŃSKA**, Politechnika Śląska w Gliwicach, Polska [2]

**Streszczenie:**

Podjęcie decyzji o zastosowaniu wybranego sposobu diagnozowania wymaga określenia przyczyn jego wybrania. Do wybrania sposobu diagnozowania można optymalizacją wielokryterialną, nazywaną polioptymalizacją. W prezentowanym materiale: scharakteryzowano pojęcie polioptymalizacji, opisano właściwości zbioru kompromisów w optymalizacji wyboru sposobu diagnozowania, scharakteryzowano metody określania zbioru kompromisów i wybór rozwiązań kompromisowych metod diagnozowania, opisano podstawy matematyczne polioptymalizacji, scharakteryzowano polioptymalizację statyczną i dynamiczną. W pracy skoncentrowano się na ogólnych zagadnieniach polioptymalizacji w procesie diagnozowania maszyn, nie przedstawiając i nie proponując konkretnego sposobu diagnozowania maszyn.

**Annotation:**

Deciding on the use of the chosen diagnosis method requires identifying the reasons for choosing it. Multi-criteria optimisation, known as polyoptimisation, can be used to select a diagnostic method. The material presented here: characterises the concept of polyoptimisation, describes the properties of a set of trade-offs in optimising the choice of a diagnostic method, characterises the methods for determining a set of trade-offs and selecting trade-off solutions of diagnostic methods, describes the mathematical basis of polyoptimisation, characterises static and dynamic polyoptimisation. The material presented here focuses on general polyoptimisation issues in the machine diagnostic process, without presenting or suggesting any specific machine diagnostic method.

## 1 Wprowadzenie

Optymalizacja poszukuje najlepszego rozwiązanie dla zadanych problemów. To proces, którego celem jest znalezienie najlepszego rozwiązania w kontekście określonego problemu, gdy istnieje zbiór potencjalnych rozwiązań do wyboru. Jest to dążenie do maksymalizacji lub minimalizacji funkcji celu w kontekście postawionego zadania.

Przez pojęcie optymalizacji diagnozowania należy rozumieć, że przez określone działanie diagnostyczne osiąga się pewien maksymalny efekt diagnozowania. Dla wielu przypadków diagnozowania przy silnych ograniczeniach i wymaganiach można ocenić cel

[1] dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. PM
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
[2] dr inż. Iwona Żabińska
Politechnika Śląska w Gliwicach
ul. Roosevelta 26-28, 41-800 Zabrze, Polska
tel. +48 502 741 002, e-mail: iwona.zabinska@polsl.pl

optymalizacji za pomocą jednego kryterium, które przyjmuje wartość maksymalną lub minimalną, w zależności od przyjętego kryterium. W przypadku, jeżeli występuje konieczność wyboru celu optymalizacji za pomocą wielu kryteriów, występuje optymalizacja wielokryterialna, nazywana polioptymalizacją.

Dla dużej liczby wymagań (kryteriów) mogą wystąpić sprzeczne wymagania, powodujące zastosowanie tzw. teorii kompromisów. Funkcje jakości dla poszczególnych kryteriów diagnozowania rzadko osiągają wartości optymalne, a częściej sprzeczne między sobą.

Poprzez różne kombinacje kryteriów diagnozowania można uzyskać różne rozwiązania kompromisowe, które mogą pozwolić na wybranie jednego lub wielu rozwiązań uwzględniających założone kryteria diagnozowania. W ten sposób można ogólnie określić pojęcie polioptymalizacji diagnozowania.

## 2 Charakterystyka polioptymalizacji

Podstawowe dwa rodzaje polioptymalizacji to polioptymalizacja statyczna i dynamiczna. Polioptymalizacja statyczna występuje wtedy, gdy rozpatruje się diagnozowanie na podstawie stałych ustalonych zmiennych $d_1, d_2, \ldots, d_n$, które są polioptymalne dla skończenie wielu kryteriów diagnozowania $D_i$ (i = 1, 2, … $k$).

Polioptymalizacja dynamiczna występuje natomiast wtedy, gdy rozpatruje się diagnozowanie na podstawie przebiegów zmiennych $d_1(t), d_2(t), \ldots, d_n(t)$, które są polioptymalne dla skończenie wielu kryteriów diagnozowania $D_i(t)$ (i = 1, 2, … $k$).

W procesie diagnozowania wymagane jest określenie grupy (zbioru) kompromisów procesu diagnozowania, jako zbioru rozwiązań efektywnych.

Na rys.1 przedstawiono metody poszukiwania rozwiązań optymalnych.

Rys.1 Metody poszukiwania rozwiązań optymalnych [2]

W przypadku zastosowania znacznej liczby kryteriów może zachodzić do sprzeczności pomiędzy kryteriami, w tym przypadku diagnozowania. Oznacza to, że poszukiwane rozwiązania nie są wartościami ekstremalnymi wszystkich rozważanych kryteriów i należy poszukiwać kompromisu między nimi.

Celem polioptymalizacji jest otrzymanie rozwiązania, dla którego spełniony jest warunek [4]:

$$\min \mathbf{F}(\mathbf{X}) = \{f_1(\mathbf{X}), f_2(\mathbf{X}), f_3(\mathbf{X})\} \tag{1}$$

gdzie:

$\mathbf{X} = \{x_i\}$, $i$ = 1, 2, …, $I$ - wektor zmiennych decyzyjnych, zmienne niezależne;

$\boldsymbol{F} = \{f_j\}$, $j = 1, 2, \ldots, J$ - zbiór kryteriów (funkcji), względem których oceniane są rozwiązania kompromisowe.

Nakładane inne ograniczenia na rozwiązania to m.in. ograniczenia:

- nierówności

$\boldsymbol{G} = \{g_k\}$, $k = 1, 2, .., K$, - gdzie $g_k(X) \leq 0$ (2)

- równości

$\boldsymbol{E} = \{e_l\}$, $l = 1, 2, .., L$, - gdzie $e_l(X) = 0$ (3)

Historycznie optymalizacją i polioptymalizacją zajmowali się m.in. Leibniz, Euler, Lagrange, Hamilton, Pareto. Aktualnie najczęściej do rozwiązywania zadań polioptymalizacji używa się np. metody ważonych kryteriów, metody ograniczonych kryteriów, metody optymalizacji hierarchicznej, metody kryterium globalnego, metody algorytmów ewolucyjnych [3, 5, 6, 7].

Najczęściej stosowaną i najprostszą metodą w polioptymalizacji jest metoda ważonych kryteriów, polegająca na sprowadzeniu polioptymalizacji (optymalizacji wielokryterialnej) do optymalizacji (optymalizacji jednokryterialnej). Wykonuje się to poprzez wprowadzenie kryterium zastępczego, które jest sumą ważonych kryteriów:

$$Z = \sum_{q=1}^{M} (w_q \cdot f_q(\boldsymbol{X}) \quad (4)$$

gdzie:

$0 \leq w_q \leq 1$;

$\sum_{q=1}^{M} w_q = 1$;

$Z$ - kryterium zastępcze;

$w_q$ - waga $q$-tego kryterium;

$f_q$ - $q$-te kryterium cząstkowe;

$\boldsymbol{X}$ - wektor zmiennych decyzyjnych.

Dla zrównoważenie wpływu poszczególnych kryteriów diagnozowania wprowadza się znaczenie kryteriów. Na wyniki diagnozowania ma wpływ wybór wartości wag kryteriów.

Inną metodą jest zastosowanie polioptymalizacji docelowej, w której dąży się do tzw. rozwiązania docelowego, które jest rozwiązaniem nieosiągalnym. Polega na szukaniu takiego rozwiązania ze zbioru rozwiązań dopuszczalnych, dla którego odległość do rozwiązania docelowego osiąga w zbiorze w zbiorze celów osiągalnych minimum, czyli rozwiązaniem optymalnym jest rozwiązanie znajdujące się najbliżej wartości docelowej.

Metoda polioptymalizacji hierarchiczna leksykograficzna stosowana jest gdy można określić kolejność ważności kryteriów lub określić ich priorytety. Po określeniu najważniejszego i najmniej ważnego kryterium dokonuje się minimalizacji ze względu na najważniejsze kryterium. Pozwala to na określenie tylko jednego rozwiązania.

Z kolei polioptymalizacja zupełna pozwala określić cały zbiór rozwiązań polioptymalnych. Wybór najlepszego rozwiązania jest dokonywany autorytatywnie przez wykonujących analizę wg wybranych kryteriów. Najważniejsze znaczenie w wyborze rozwiązania ma doświadczenie, praktyka oraz intuicja wykonującego badania diagnostyczne. Wybór rozwiązania jest oczywiście subiektywny.

W diagnozowaniu dużych obiektów, systemów, stosuje się optymalizację wielopoziomową [1]. Dokonuje się wtedy dekompozycji systemu w celu diagnozowania mniejszych obiektów.

## 4 Podsumowanie

Optymalizacja jak i polioptymalizacja są dziedzinami wiedzy technicznej rozwijającymi się od lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku. Metody optymalizacji i polioptymalizacji rozwijają się w wielu dziedzinach wiedzy technicznej, w tym również w skromnej części dotyczącej diagnozowania maszyn.

Zastosowanie optymalizacji i polioptymalizacji charakteryzuje kilka sprzeczności, które dotyczą również diagnozowania maszyn i urządzeń technicznych, takich m.in. jak brak istotnych zastosowań optymalizacji i polioptymalizacji a stosowanie wyrafinowanych, kosztownych metod diagnozowania.

**Literatura:**


[1] Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A. *Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji*. PWN, Warszawa 1972

[2] Goldberg D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machnine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989

[3] Ostanin A. *Optymalizacja liniowa i nieliniowa*, Wydaw. Politechniki Białostockiej, Białystok 2005

[4] Osyczka A. *Evolutionary algorithms for single and multicriteria design optimization*, Studies in Fuzziness and Soft Computing, no. 79, 2002, Heidelberg, Physica-Verlag, 218 p., ISBN 3-7908-1418-0

[5] Stachurski A., Wierzbicki A. P. *Podstawy optymalizacji*. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999

[6] Tarnowski W. *Optymalizacja i polioptymalizacja w mechatronice*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2009

[7] Tarnowski W. *Równoczesna optymalizacja lub polioptymalizacja maszyny i procesu*. Problemy Eksploatacji, 2010/2, s. 17-34

# ZWIĘKSZENIE WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH KÓŁ ZĘBATYCH OBRÓBKĄ POWIERZCHNIOWĄ

# INCREASING THE MECHANICAL PROPERTIES OF GEARS BY SURFACE TREATMENT

**Stanisław MIKUŁA,** Politechnika Śląska, Gliwice, Polska [1]
**Daniel ADAMECKI,** Politechnika Śląska, Gliwice, Polska [2]
**Wojciech GRZEGORZEK,** Politechnika Śląska, Gliwice, Polska [3]

**Streszczenie:**

W pracy przedstawiono koncepcję urządzenia do umacniania kół zębatych obróbką nagniatania naporowego, stosowaną jako końcowa obróbka technologiczna w procesie wytwarzania kół zębatych w celu nadania im wyższej odporności na zmęczeniowe złamanie zębów. Urządzenie jest dedykowane zwłaszcza do obróbki kół zębatych o zębach skośnych, które są często stosowane w układach napędowych maszyn z uwagi na wysoką trwałość eksploatacyjną i cichobieżność.

**Annotation:**

The paper presents the concept of a device for strengthening gears by pressure burnishing used as the final technological treatment in the process of gears manufacturing in order to give them higher resistance to fatigue fracture of teeth. The device is dedicated especially to the processing of gears with helical teeth, which are often used in machine drive systems due to their high operational durability and quiet operation.

## 1 Wstęp

Przekładnie mechaniczne to urządzenia, które w maszynach górniczych, budowlanych, drogowych, rolniczych, przemysłowych oraz pojazdach, robotyce i energetyce znalazły powszechne zastosowanie do przekazywania i przekształcania energii mechanicznej. Głównym zadaniem przekładni jest zmiana prędkości obrotowej i momentu obrotowego, a także kierunku ruchu w celu dopasowania parametrów napędu do wymagań układu. Jednak najczęściej rolą przekładni mechanicznej w maszynach i pojazdach jest uzyskanie dużego momentu obrotowego, przy relatywnie niewielkiej prędkości obrotowej. Ze względu na łatwość wykonania, wysoką sprawność i trwałość oraz zdolność do przenoszenia dużych momentów obrotowych najczęściej stosuje się przekładnie o zarysie ewolwentowym zębów. Zęby takiej przekładni są ustawione pod kątem do osi obrotu wałów co powoduje, że styk zębów nie zachodzi równocześnie jak

[1] dr inż. Stanisław Mikuła
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 12 74, e-mail: RG2@polsl.pl
[2] dr inż. Daniel Adamecki
tel.: +48 32 237 20 80, mobil: +48 69 375 77 99, e-mail: daniel.adamecki@polsl.pl
[3] dr inż. Wojciech Grzegorzek
tel.: +48 32 237 22 34, e-mail: wojciech.grzegorzek@polsl.pl

w przypadku zębów prostych, lecz stopniowo. Takie rozwiązanie zapewnia przekładni cichobieżność i większą wytrzymałość mechaniczną.

Na obecnym etapie rozwoju przekładni zębatych stosowanych jest wiele metod zwiększania własności mechanicznych przekładni, które są kluczowe dla poprawy ich wytrzymałości, trwałości oraz efektywności pracy [1]. Zarówno zmiana konstrukcji [2, 3], odpowiedni dobór materiału [4, 5], technologia wytwarzania [6, 7, 8] i obróbka kół zębatych [9, 10, 11], a także rozbudowane systemy diagnostyczne do wczesnego wykrywania uszkodzeń [12, 13] zwiększają trwałość eksploatacyjną i bezpieczeństwo użytkowania przekładni.

Duże obciążenia eksploatacyjne przekładni zębatych mogą być przyczyną występowania uszkodzeń kół zębatych, spowodowanych ich zużyciem ściernym i erozyjnym, zmęczeniowym wykruszaniem warstwy wierzchniej powierzchni roboczych zębów (in. pitting), a niekiedy zjawiskiem zacierania się zębów. Szczególnie krytycznym jest wyłamywanie zębów przekładni, gdyż powoduje awarię i wymuszony postój, a w wielu przypadkach stwarza dodatkowo duże zagrożenie bezpieczeństwa pracy, zwłaszcza w przekładniach zębatych pojazdów i maszyn roboczych, w tym szczególnie maszyn dźwigowych. Zdecydowana większość przełomów zmęczeniowych zębów ma swój początek u ich podstawy, gdyż tam występuje stan największego wytężenia materiału. Dodatkowo niekorzystną okolicznością jest występowanie rys obróbczych, równoległych do linii zębów, które są następstwem stosowania typowych metod nacinania kół zębatych, takich jak metoda obwiedniowa, frezowanie kształtowe, czy dłutowanie metodą Fellowsa. Rysy obróbcze stanowią silne karby, i właśnie od nich rozpoczyna się proces rozwoju pęknięć zmęczeniowych zębów [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

Dużą poprawę odporności na wyżej wymienione działania niszczące uzębień kół zębatych daje ich obróbka plastyczna na zimno poprzez nagniatanie strumieniowe. Charakteryzuje się ono tym, że elementy nagniatające (np. śrut) są wyrzucane z urządzenia nagniatającego w postaci strumienia i uderzają z dużą energią w obrabianą powierzchnię. Oddziaływanie na powierzchnię obrabianą śrutu powoduje przemieszczenie nierówności i zgniot powierzchni, wpływające korzystnie na właściwości mechaniczne warstwy wierzchniej. Zabieg technologiczny w postaci umacniania zgniotem powierzchniowym poprzez śrutowanie wykorzystuje się najczęściej wtedy, gdy potrzebne jest jednoczesne zmniejszenie chropowatości powierzchni, zwiększenie udziału materiałowego jej profilu, wzmocnienie warstwy wierzchniej materiału i uzyskanie w niej korzystnego stanu naprężeń ściskających. Przykładowe cele tych zabiegów, to odpowiednio zwiększenie odporności na ścieranie, zapewnienie trwałości pasowania i zdolności przenoszenia większych nacisków powierzchniowych oraz poprawa wytrzymałości zmęczeniowej przedmiotów obrabianych. W przypadku kół zębatych zabieg nagniatania pozwala na polepszenie odporności na pęknięcia zmęczeniowe i eliminację niekorzystnego wpływu rys obróbczych u podstawy zębów [21, 22, 23].

## 2 Odkształcenie powierzchni jako metoda poprawy właściwości mechanicznych kół zębatych

Znane urządzenia do obróbki plastycznej na zimno elementów maszyn zostały opisane w pracach [21, 22, 23]. Sposoby i urządzenia tam opisane nie zapewniają wymaganej intensywności zgniotu, niezbędnej dla umocnienia kół zębatych wykonanych ze stali o większej wytrzymałości i twardości warstwy wierzchniej. Z kolei opisy patentów [24, 25] dotyczą urządzeń, w których strumień drobnych, stalowych kulek jest przyspieszany do dużej prędkości i kierowany za pomocą sprężonego powietrza na obrabiane powierzchnie.

Energia kinetyczna kulek powoduje zmiany struktury geometrycznej powierzchni oraz odkształcenia plastyczne materiału warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego. Takie zmiany stanu warstwy wierzchniej wpływają korzystnie na właściwości użytkowe, a głównie na wzrost wytrzymałości zmęczeniowej [26]. Powstające mikrodeformacje powierzchni materiału zwiększają jego odporność na zmęczenie i pękanie, poprawiając trwałość. Zmienia się także chropowatość powierzchni na skutek mikrościerania, której tekstura zależy od początkowej twardości przedmiotu obrabianego i energii kinetycznej uderzających kulek. Dobierając także odpowiednie warunki technologiczne nagniatania można uzyskać małą chropowatość obrobionej powierzchni, co rzutuje na jej nośność, czyli wytrzymałość na naciski. Jednakże przy obróbce powierzchni elementów o większej twardości urządzenia te napotykają na ograniczenia techniczne. Pneumatyczne wyrzucanie strumienia kulek charakteryzuje się ograniczoną możliwością uzyskania większej prędkości przepływu powietrza przez dysze strumieniowe, a więc uzyskania większych głębokości zgniotu.

Śrutowanie zębów kół zębatych wiąże się z dodatkowymi trudnościami wynikającymi z geometrii zębów oraz specyfiki tego procesu. Problemem jest chociażby trudniejszy dostęp do najbardziej obciążonych stref zębów. W rejonie nasady zębów, czyli na ich podstawie znajduje się strefa, która jest najbardziej obciążona w trakcie pracy przekładni zębatych, szczególnie w wyniku sił działających na zęby podczas ich zazębienia. W tej strefie dochodzi do maksymalnych naprężeń, które mogą prowadzić do uszkodzeń zębów, takich jak pęknięcia zmęczeniowe. Jednak ze względu na kształt i ułożenie zębów dostęp strumienia śrutu do tej strefy jest utrudniony. Większa jej odległość od wylotu dyszy śrutującej sprawia, że energia kinetyczna kulek ulega częściowej utracie na skutek rozproszenia, a tym samym skuteczność wzmocnienia tej strefy jest mniejsza. Zmniejszona energia kinetyczna skutkuje gorszym efektem śrutowania, co może prowadzić do niewystarczającego wzmocnienia tej szczególnie istotnej części zęba.

Innym problemem dotyczącym obróbki powierzchni przez śrutowanie są trudności w obróbce strefy promienia przejściowego. Promień przejściowy u nasady zębów, czyli między podstawą zęba a korpusem koła zębatego jest obszarem, który jest trudny do obróbki ponieważ wymaga on równomiernego rozkładu energii śrutu. W tej strefie może dochodzić do problemu z niedostatecznym wgnieceniem materiału na wymaganej głębokości, zwłaszcza jeśli strumień kulek nie trafia w odpowiedni sposób. Niewłaściwe wgniecenie tej strefy może prowadzić do niedostatecznego uformowania powierzchni, co skutkuje nierównomiernym rozkładem naprężeń i obniżeniem jakości uzębienia.

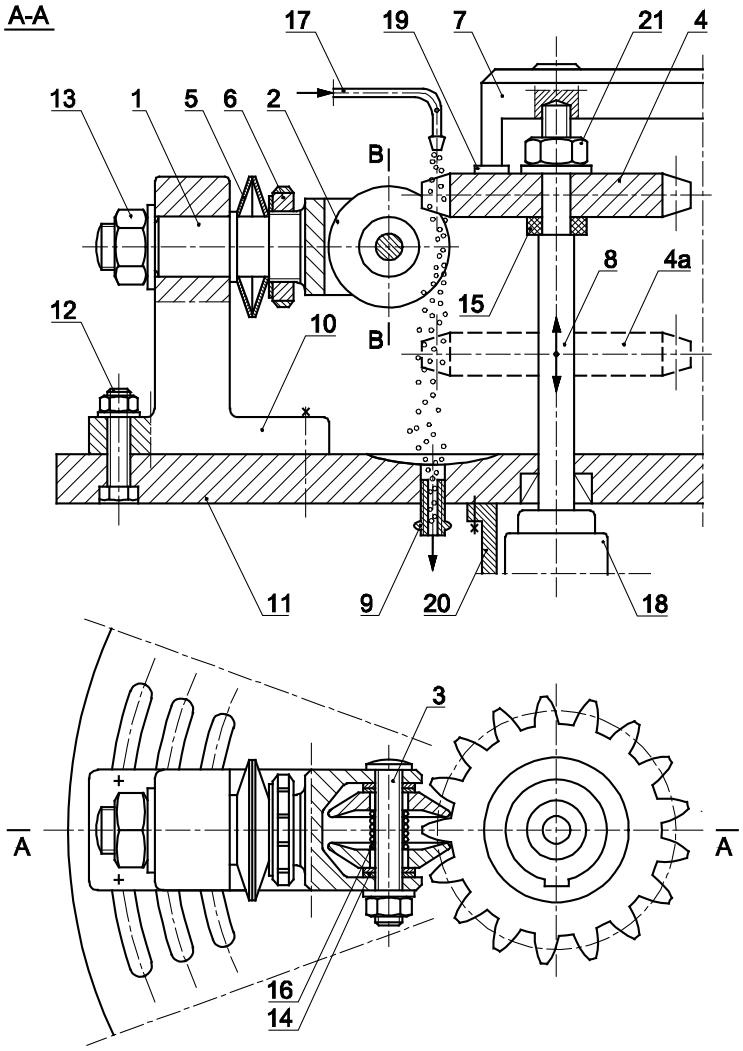
Ograniczenia stosowania śrutowania, związane z efektami nierównomiernej obróbki powierzchni kół zębatych w strefie nasady zębów i promienia przejściowego mogą wpływać na nierównomierność twardości powierzchni oraz strukturę materiału w tych newralgicznych miejscach. Przekłada się to na pogorszenie wytrzymałości i trwałości kół zębatych, zwłaszcza w obszarach najbardziej narażonych na duże siły ściskające i zmęczeniowe. Ponadto wszystkie znane urządzenia do obróbki zgniotem powierzchniowym elementów maszyn nie umożliwiają efektywnego chłodzenia strefy nagniatanej, co ogranicza korzystne skutki obróbki powierzchni tymi urządzeniami. Wyniki badań przedstawione w pracy [26] wskazują, że zastosowanie cieczy obróbkowej w procesie nagniatania korzystnie wpływa na właściwości warstwy wierzchniej oraz wytrzymałość zmęczeniową nagniatanych przedmiotów.

W związku z wymienionymi wyżej trudnościami obróbki powierzchni kół zębatych przez śrutowanie najlepszym sposobem na wygenerowanie odkształcenia o odpowiednio dużej głębokości jest nagniatanie naporowe. Jego cechą charakterystyczną jest występowanie stałej (w przybliżeniu) siły z jaką elementy nagniatające w kształcie bryły

obrotowej (np. rolki) wykonując ruch obrotowy toczą się po powierzchni obrabianego przedmiotu i na nią oddziałują. Pozwala to uzyskać dobre efekty wzmacniające na całej wysokości zębów, ze szczególnym uwzględnieniem strefy promienia przejściowego zarysu zęba. Wzmocnienie dna karbów ma szczególne znaczenie z punktu widzenia odporności zęba na pękanie zmęczeniowe. W tej strefie następuje zazwyczaj inicjacja, a następnie rozwój pęknięć zmęczeniowych zębów, najbardziej krytycznej formy uszkodzeń eksploatacyjnych kół zębatych [14].

## 3 Koncepcja urządzenia do obróbki powierzchniowej na zimno kół zębatych metodą nagniatania naporowego

Urządzenie do obróbki powierzchniowej kół zębatych, zwłaszcza o zębach skośnych metodą nagniatania naporowego opracowano w Katedrze Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa Politechniki Śląskiej. Urządzenie w przykładzie wykonania przedstawiano na rysunkach 1 - 2.

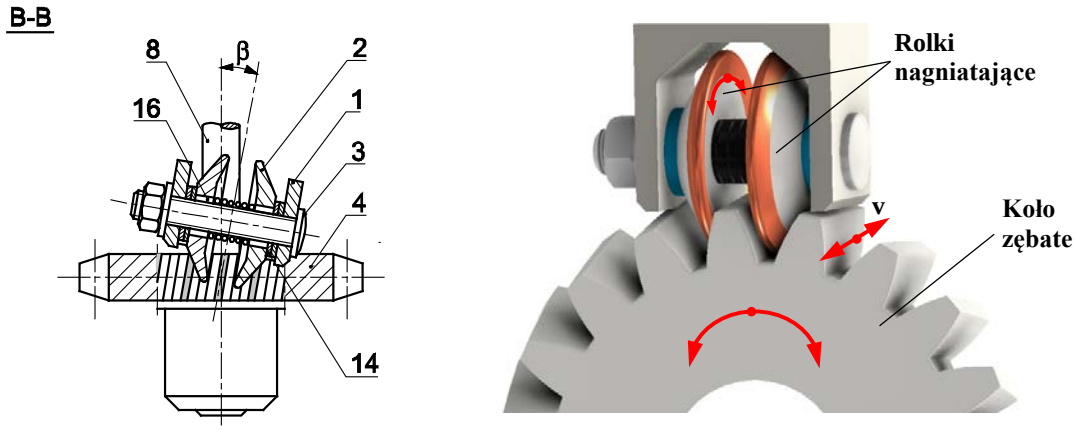



Rys.1 Urządzenie do nagniatania naporowego dna rowków kół zębatych [27]

Rysunek 1 zawiera przekrój pionowy urządzenia w płaszczyźnie A-A i widok urządzenia z góry, pokazano położenie obrabianego koła przed rozpoczęciem zabiegu obróbki powierzchniowej. Na rysunku 2 przedstawiono przekrój urządzenia w płaszczyźnie B-B pokazujący położenie rolek nagniatających względem linii zębów koła zębatego o zębach skośnych w skrajnym górnym położeniu obrabianego koła.

Urządzenie posiada mocowane do podstawy 11 oprawy 10, w których są osadzone głowice 1 z rolkami nagniatającymi 2 ułożyskowanymi na osiach 3. Korzystnym jest zastosowanie trzech opraw 10 równomiernie rozmieszczonych na obwodzie podstawy 11 tak, aby kąty ich położenia względem siebie były możliwie najbardziej zbliżone do 120º. Gdy liczba zębów obrabianego koła zębatego 4 jest podzielna przez trzy, to kąty między oprawami powinny wynosić dokładnie 120º. Takie usytuowanie opraw roboczych zapewnia pełne, wewnętrzne zrównoważenie sił w układzie urządzenia, bez wystąpienia siły poprzecznej działającej na tłoczysko 8.

Nagniatane koło zębate o zębach skośnych 4 jest umieszczane obrotowo na końcówce tłoczyska 8 siłownika hydraulicznego 18, i zabezpieczane nakrętką szybkomocującą 21. Głowice 1 z rolkami nagniatającymi 2 należy odchylić o kąt β odpowiadający kątowi pochylenia linii zębów koła o zębach skośnych (rys.2). W typowych kołach skośnych kąt β mieści się w granicach 7 - 15º. Nagniatanie promieni przejściowych u podstawy zębów odbywa się w wyniku ruchu tłoczyska 8 siłownika hydraulicznego dwustronnego działania 18 mocowanego w osłonie 20. Siłownik 18 przemieszcza obrabiane koło zębate 4 z pozycji wyjściowej do pozycji końcowej 4a i z powrotem (rys.1).




Rys.2 Położenie rolek nagniatających względem linii zębów koła o zębatych skośnych

W trakcie ruchu siłownika następuje samoczynny obrót wokół osi luźno osadzonego koła 4 o kąt zależny od szerokości koła, kąta pochylenia linii zębów i średnicy koła stóp zębów koła obrabianego. Po wykonaniu nagniatania jednocześnie sześciu promieni przejściowych trzech zębów (przy zastosowaniu trzech opraw 10) następuje obrót obrabianego koła 4 o kąt odpowiadający co najmniej jednej podziałce zębów. Obrót ten jest realizowany przez obrotnicę podziałową 7 łączącą obracane koło 4 z końcówką tłoczyska 8.

Podczas nagniatania stref stóp zębów następuje natrysk w strefę obróbki cieczy chłodząco-smarującej podawanej przez dyszę 17, a następnie odbieranej przez króciec 9. Jako ciecz chłodząco-smarująca może być zastosowana emulsja olejowo-wodna skutecznie odbierająca ciepło generowane w procesie nagniatania. Ciecz służy też

polepszeniu gładkości powierzchni obrabianej, co eliminuje groźne rysy obróbcze w strefie stóp zębów. Położenie koła 4 regulują elementy dystansowe 15 i 19.

Rolki nagniatające 2 powinny być wykonane ze stali o możliwie wysokiej twardości lub nawet węglików spiekanych, a powierzchnie czynne rolek powinny być polerowane. Rolki nagniatające mogą być łożyskowane tocznie (np. łożyska igiełkowe lub porowate samosmarne) na łożyskach 16, a położenie rolek regulują podkładki 14.

Siłownik hydrauliczny 18 należy wysterować w taki sposób, aby ruch w jednym kierunku odbywał się przy zwiększonej prędkości i z większym wybiegiem. Wówczas rolki nagniatające po wyjściu z kontaktu z obrabianym kołem obrócą się dodatkowo siłą bezwładności o pewien kąt, co zapewnia równomierność zużywania się rolek i zintensyfikuje ich chłodzenie.

Intensywność nagniatania kół zębatych jest regulowana siłą docisku rolek poprzez cechowane sprężyny talerzowe 5 z nakrętkami regulacyjnymi 6. Ustalanie siły nagniatania odbywa się w ten sposób, że po zluzowaniu nakrętek 13, po doprowadzeniu do kontaktu koła 4 z rolkami nagniatającymi, ustala się obciążenie nagniatania poprzez pokręcenie nakrętek regulacyjnych 6, po czym należy skasować luz między głowicami 1 a oprawami 10 dokręcając lekko nakrętki 13.

Po wykonaniu nagniatania strefy stóp wszystkich zębów koła możliwe jest powtórzenie całego zabiegu z kołem obróconym w poziomie o 180º i ewentualnie zwiększonym nacisku rolek 2.

Urządzenie do umacniania zgniotem wg proponowanego rozwiązania może być również wykorzystywane do obróbki kół o zębach prostych ($\beta = 0^o$). Można obrabiać koła korygowane i bez korekcji, koła modyfikowane i bez modyfikacji, koła o zazębieniu ewolwentowym i cykloidalnym.

Urządzenie dzięki swojej konstrukcji może być łatwo dostosowane do obróbki kół o różnych rozmiarach, różnych modułach i wykonanych z różnych materiałów, w tym kół stalowych poddanych nawęglaniu i hartowaniu, azotonawęglaniu i azotowaniu. Dla uzyskania wysokiej efektywności umacniania należy stosować rolki nagniatające o profilu roboczym odpowiadającym promieniom przejściowym dna zęba. Po obróbce urządzeniem może być dodatkowo wykonany znany zabieg śrutowania powierzchni roboczych zębów celem poprawy odporności na niszczenie pittingowe i zużycie ścierne kół zębatych.

## 4 Podsumowanie

Urządzenie do umacniania kół zębatych nagniataniem naporowym jest przeznaczone do końcowej obróbki kół zębatych w celu nadania im wyższej odporności na zmęczeniowe złamanie zębów i jest zalecane zwłaszcza do obróbki kół zębatych o zębach skośnych.

Dzięki dużym lokalnym naciskom stykowym rolek nagniatających we współpracy z umacnianym kołem zębatym urządzenie zapewnia dużą skuteczność umacniania strefy przejściowej dna wrębów kół zębatych.

Zastosowanie trzech równomiernie rozłożonych głowic z rolkami nagniatającymi zapewnia pełne równoważenie się sił w czasie obróbki, co dodatkowo sprzyja zachowaniu wysokiej dokładności obróbki, szczególnie istotnej w przypadku kół zębatych o cienkich wieńcach.

Równomierny rozkład sił działających na obrabiane zęby eliminuje niepożądaną zmianę kształtu zębów, która mogłaby niekorzystnie wpłynąć na funkcjonowanie przekładni.

Urządzenie pozwala na umacnianie zgniotem kół zębatych zarówno o zębach prostych, jak i o zębach skośnych bez konieczności modyfikacji układu.

Parametry obróbki nagniataniem należy dobrać metodą prób ze względu na występowanie dużej liczby rozmiarów kół zębatych, ich modułów, rodzajów materiałów, stosowanych metod obróbki zębów oraz parametrów obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej.

Zastosowanie urządzenia do umacniania zgniotem pozwala na osiągnięcie dużej poprawy odporności kół zębatych na złamanie zębów, co zwiększa trwałość i niezawodność eksploatacyjną układów napędowych, w których są stosowane koła zębate.

Urządzenie do umacniania zgniotem ma także walory ekologiczne, gdyż jest to obróbka powierzchni bez wiórów i pyłu, o małej emisji hałasu, która cechuje się niewielkim zużyciem energii oraz dużą wydajnością, gdyż jednocześnie jest obrabianych sześć promieni przejściowych u podstawy trzech zębów.

**Literatura:**


[1] Skoć, A., Świtoński, E. Przekładnie zębate: zasady działania, obliczenia geometryczne i wytrzymałościowe. *Państwowe Wydawnictwo Naukowe*, Warszawa 2017

[2] Qin, Z., Wu, YT. & Lyu, SK. A Review of Recent Advances in Design Optimization of Gearbox. *Int. J. Precis. Eng. Manuf*. 19, 2018, pp. 1753-1762

[3] Wang, S., Zhu, C., Song, C. et al. Effects of gear modifications on the dynamic characteristics of wind turbine gearbox considering elastic support of the gearbox. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 31, 2018, pp. 1079-1088

[4] Delibaş, H., Uzay, Ç., & Geren, N. Advanced Material Selection Technique For High Strength and Lightweight Spur Gear Design. *European Mechanical Science*. 1(4), 2017, pp. 133-140

[5] Pardhiv, G., Srinivas, P. Material Selection for Optimum Design of Planetary Gear Train used in Automobile Gear Box. *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*. 5(8),2019

[6] Boumediri, H., Touati, S., Debbah, Y. et al. Effect of carburizing time treatment on microstructure and mechanical properties of low alloy gear steels. *IOP Publishing. Materials Research Express*. 11, 2024, pp. 1-10

[7] Mengaroni, S., Bambach, M.D., Cianetti, F., Bleck, W. and Neri, S. Strengthening Improvement on Gear Steels. *Steel Research Int*. 87, 2016, pp. 608-613

[8] Blech, N., Güntner, C., Schurer, S. et al. Material influence on mechanical properties of gears with alternative microstructures. *Forsch Ingenieurwes*, 87, 2023, pp. 593-603

[9] Bagaiskov, Y. Machining quality improvement and noise reduction of vehicle gears. IOP Conf. Ser.: *Mater. Sci. Eng*. 918 012160, 2020, pp. 1-6

[10] Peng, J., Zhao, Y., Chen, D., Li, K., Lu, W., Yan, B. Effect of Surface Densification on the Microstructure and Mechanical Properties of Powder Metallurgical Gears by Using a Surface Rolling Process. *Materials*. 9(10)846, 2016, pp. 1-9

[11] Li, G., Bie, W., Zhao, B., Chen, F., Zhao, C., Zhang, Y. Ultrasonic assisted machining of gears with enhanced fatigue resistance: A comprehensive review. *Advances in Mechanical Engineering*. 14(4), 2022, pp. 1-31

[12] Mukherjee, S., Kumar, V., Sarangi, S., Bera, T. K. Gearbox Fault Diagnosis using Advanced Computational Intelligence. *Procedia Computer Science*. 167, 2020, pp.1594-1603

[13] Kundu, P., Darpe, A. K., Kulkarni, M.S. A review on diagnostic and prognostic approaches for gears. *Structural Health Monitoring*. 20(5), 2021, pp. 2853-2893

[14] Adamecki, D., Grzegorzek, W., Mikuła, J., Mikuła, S., Mechanizmy zniszczeń kół zębatych w napędach maszyn roboczych i ich diagnostyka w warunkach eksploatacyjnych. *KOMTECH*. 2020, pp. 59-70

[15] Augustynowicz, J., Dudek, K., Figiel, A. Wykorzystanie termowizji w diagnostyce maszyn górnictwa odkrywkowego. *Węgiel Brunatny 2000 wyd. spec*.

[16] Bartelmus,, W. Diagnostyka Maszyn Górniczych. Górnictwo Odkrywkowe. *Wyd. Śląsk, Katowice* 1998

[17] Capdessus, C., Sidahmed, M., Lacoume, J.L. Cyclostationary processes: Application in gear faults early diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 14, (3), 2000, pp. 371-385

[18] Radkowski, S. Low energy components of vibroacoustic signal as the basis for diagnosis of defect formation*. Machine Dynamics Problems*. 12, 1995

[19] Szweda, S., Mikuła, J., Mikuła, S. Magnetic-and-powder Method in Diagnostics of Welded Joints in Powered Roof Supports. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 545. 012015. DOI: 10.1088/1757-899X/545/1/012015. 2019

[20] Wilk, A., Łazarz, B., Madej, H. Diagnozowanie wczesnych stadiów rozwoju uszkodzeń kół zębatych. *Diagnostyka*. 24, 2001, pp. 46-53

[21] Przybylski, W. Technologia obróbki nagniataniem. *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*. Warszawa, 1987

[22] Łunarski, J. Wytrzymałość zmęczeniowa części maszyn po wybranych sposobach obróbki powierzchniowej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*. nr 17. Rzeszów: Politechnika Rzeszowska, 1988

[23] Mikuła, St. Zastosowanie technologii śrutowania w wytwarzaniu elementów maszyn górniczych. Gliwice: Pol. Śl., 2002

[24] Pat.139508. Urządzenie do nagniatania dynamicznego powierzchni zewnętrznych przedmiotów walcowych. *Politechnika Rzeszowska, Rzeszów*, Pl. (Korzyński, M.)

[25] Pat.150864. Urządzenie do umacniania metodą pneumokulkowania przedmiotów metalowych. *Politechnika Rzeszowska, Rzeszów*, Pl. (Łunarski, J., Wójcik, A., Zielecki, W.)

[26] Zaleski K.: Technologia nagniatania dynamicznego. *Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej*. Lublin 2018

[27] Pat.242074. Urządzenie do umacniania kół zębatych, zwłaszcza o zębach skośnych. *Politechnika Śląska, Gliwice*, Pl. (Mikuła, J.; Adamecki, D.; Grzegorzek, W.; Mikuła, S.)

# WZMOCNIENIE ZAWORÓW SILNIKOWYCH OBRÓBKĄ POWIERZCHNIOWĄ

# STRENGTHENING THE ENGINE VALVES WITH SURFACE WORK

**Stanisław MIKUŁA,** Politechnika Śląska, Gliwice, Polska [1]
**Wojciech GRZEGORZEK,** Politechnika Śląska, Gliwice, Polska [2]
**Daniel ADAMECKI,** Politechnika Śląska, Gliwice, Polska [3]

**Streszczenie:**

W pracy przedstawiono innowacyjną koncepcję urządzenia do umacniania zgniotem powierzchniowym wszystkich newralgicznych stref zaworów silników spalinowych benzynowych, gazowych i wysokoprężnych ze zwiększoną skutecznością śrutowania dla uzyskania wyższych efektów w zakresie trwałości zmęczeniowej i odporności na zużycie ścierne. Urządzenie do śrutowania zaworów silnikowych w stanie wstępnego naprężenia może być łatwo przystosowane do wzmocnienia także innych elementów maszyn, zwłaszcza sprężyn naciskowych, w tym także sprężyn zaworów silników spalinowych.

**Annotation:**

The paper presents an innovative concept of a device for surface crush strengthening of all sensitive valve zones of gasoline, gas and diesel internal combustion engines with increased blasting efficiency for higher fatigue life and abrasion wear resistance. The device for shot blasting of engine valves in a prestress condition can be easily adapted to strengthen other machine components as well, especially compression springs, including internal combustion engine valve springs.

## 1 Wstęp

Zawory silników spalinowych są narażone na znaczne obciążenia zmienne o relatywnie dużej liczbie cykli zmian [1, 2], szok termiczny [3] oraz zużycie ścierne [4, 5]. Rolę ścierniwa spełniają tu pyłowe zanieczyszczenia powietrza dolotowego [6] oraz stałe produkty spalania paliw silnikowych. Pęknięcie zaworu w silniku spalinowym [7] oznacza natychmiastową jego awarię, często o dużych skutkach, w tym również związanych z bezpieczeństwem. Wzmocnienie elementów wysoko obciążonych maszyn i pojazdów poprzez zabiegi technologiczne w postaci specjalnych rodzajów obróbki cieplnej, czy też cieplno-chemicznej, pozwala znacznie poprawić odporność na wspomniane intensywne

[1] dr inż. Stanisław Mikuła
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 12 74, e-mail: RG2@polsl.pl
[2] dr inż. Wojciech Grzegorzek
tel.: +48 32 237 22 34, e-mail: wojciech.grzegorzek@polsl.pl
[3] dr inż. Daniel Adamecki
tel.: +48 32 237 20 80, mobil: +48 69 375 77 99, e-mail: daniel.adamecki@polsl.pl

procesy destrukcyjne. Wciąż jednak w niewielkim stopniu wykorzystuje się dodatkowe duże możliwości, jakie daje obróbka plastyczna na zimno.

Umocnienie zgniotem poprzez śrutowanie w stanie wstępnego obciążenia [8] powoduje, że w warstwie wierzchniej wywoływane są naprężenia własne ściskające o większej wartości. Rośnie również twardość obrabianego materiału w porównaniu ze śrutowaniem w stanie swobodnym. Wymienione wyżej argumenty stanowią przesłanki do uzyskania zdecydowanie wyższych efektów wzmocnienia zaworów silnikowych przez śrutowanie sposobem według proponowanego rozwiązania, niż ma to miejsce w przypadku znanych sposobów umacniania zgniotem powierzchniowym.

Znane sposoby umacniania warstwy wierzchniej [9] elementów maszyn narażonych na oddziaływania zmęczeniowe i zużycie ścierne polegają na wykorzystaniu nagniatania statycznego [10] lub dynamicznego rolkami lub kulkami obciążonych mechanicznie [11, 12], czy też kulkami miotanymi strumieniem sprężonego powietrza [13]. Wyniki badań [14] wskazują na aż o 94% wzrosta wytrzymałość zmęczeniowa elementów poddanych procesowi śrutowania. Najczęściej stosowane sposoby umacniania śrutowaniem polegają na uderzaniu strumieniem śrutu w postaci stalowych kulek w obrabianą powierzchnię elementu pozostającego podczas zabiegu śrutowania w stanie swobodnym, tj. bez wstępnego naprężenia. Powoduje to, że skuteczność zabiegu jest ograniczona, zwłaszcza w przypadku elementów wykonanych ze stali stopowych poddanych umacniającej obróbce cieplnej, a więc posiadających podwyższoną twardość.

Obróbka przez śrutowanie elementów o większej twardości napotyka na szereg ograniczeń technicznych. Wyrzutniki pneumatyczne strumienia kulek, w których zwiększenie intensywności procesu śrutowania odbywa się poprzez wzrost prędkości strumienia śrutu, mają ograniczoną prędkość przepływu powietrza przez dysze strumieniowe. Natomiast w przypadku wirnikowych wyrzutników mechanicznych, ze wzrostem prędkości obrotowej wyrzutników silnie rośnie zużycie ścierne śrutu, wirników i dysz. Dodatkowo tworzy to dużą ilość pyłu metalicznego, co powoduje niebezpieczeństwo wybuchu. Niekiedy zastosowanie cieczy obróbkowej (np. olej transformatorowy lub nafta) do strumienia kulek może ograniczyć niektóre z wyżej wymienionych procesów. Jednakże niekorzystnym skutkiem stosowania cieczy obróbkowych jest zmniejszenie prędkości spadających kulek wskutek „hamującego” działania warstwy cieczy, przez którą kulki muszą się przebić. Przekłada się to na zmniejszenie energii uderzenia kulek w powierzchnię obrabianego przedmiotu, co znacznie obniża efektywność śrutowania [15].

Przegląd znanych rozwiązań urządzeń do śrutowania elementów maszyn zawierają prace [16, 17, 18]. Natomiast zagadnienie umacniania zaworów silników spalinowych omówiono w pracy [19], gdzie przedstawiono koncepcję przyrządu do nagniatania statycznego rolkami jedynie części cylindrycznej trzonka zaworu. Zaprezentowano też schemat innego urządzenia do nagniatania rolkami stożkowymi przylgni grzybków zaworów bez chłodzenia i smarowania.

Wszystkie znane rozwiązania urządzeń do śrutowania nie zapewniają dostatecznie wysokiej efektywności obróbki, wymaganej dla zaworów współczesnych silników spalinowych. Znane urządzenia do śrutowania zaworów silnikowych nie umożliwiają ograniczenia temperatury, która w czasie obróbki wzrasta wskutek zamiany pracy odkształcenia plastycznego na ciepło, nie zabezpieczają więc przed niekorzystną relaksacją naprężeń własnych. Przy stałym dążeniu do zwiększania osiągów, a więc stopnia wytężenia elementów silników, przy jednoczesnym zmniejszaniu ich wymiarów (tzw. down sizing), koniecznym jest poszukiwanie, testowanie i wdrażanie nowych rozwiązań w zakresie umacniania podstawowych elementów silników, zwłaszcza stosowanych w pojazdach. Zwiększone wymagania dotyczące efektywności umacniania

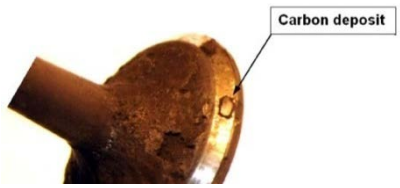
spełnia urządzenie według proponowanego rozwiązania przeznaczone do śrutowania zaworów silnikowych w stanie wstępnego naprężenia.

## 2 Formy uszkodzeń eksploatacyjnych zaworów silnikowych

Charakter cyklu pracy każdego zaworu silnikowego (ssącego i wydechowego) jest zeropulsacyjny co oznacza, że otwieranie i zamykanie zaworu zachodzi w sposób ciągły, a zmiany ciśnienia i przepływu gazu są stopniowe, bez wyraźnych, nagłych zmian. Przejścia między kolejnymi fazami cyklu (np. od ssania do sprężania) są realizowane bez gwałtownych, skokowych zmian, w sposób kontrolowany przez mechanizmy rozrządu. Podczas otwierania i zamykania zaworu ciśnienie i przepływ gazów (powietrza, mieszanki paliwowo-powietrznej lub spalin) zmieniają się stopniowo począwszy od obciążenia zerowego, gdy zawór jest otwarty do obciążenia dynamicznego (prawie udarowego), gdy pod działaniem sprężyn zaworowych dochodzi do jego zamknięcia. Zawory o ruchu posuwisto-zwrotnym i dużych przyspieszeniach/opóźnieniach są poddawane działaniu dużych sił bezwładności, stąd dążenie do zmniejszania masy zaworów, co skutkuje wzrostem obciążenia mechanicznego przekrojów nośnych [20].

Zawory silnikowe składają się z dwóch zasadniczych części: grzybka oraz trzonka. Przeciętnie w ciągu minuty każdy zawór otwiera się i zamyka ok. tysiąc razy, a podczas intensywnego przyspieszania nawet dwukrotnie częściej. Grzybki zaworów ssących rozgrzewają się do temperatury w zakresie 300 - 600 ºC, a wylotowych nawet do 1000 ºC. Grzybek posiadający przylgnie pod kątem 30º lub 45º, która (gdy zawór jest zamknięty) szczelnie przylega do stożkowej powierzchni gniazda zaworowego. Zadaniem grzybków jest więc uszczelnienie komory spalania w suwie pracy i kierowanie przepływem gazów w suwach pozostałych. Z kolei trzonek prowadzi zawór poruszając się w prowadnicy zaworowej, a także odprowadza ciepło z grzybka zaworowego. Zawór jest dociskany do gniazda zaworowego sprężyną zaworową, umocowaną na końcu trzonka zaworu za pomocą zamka. W tak trudnych warunkach pracy zawory muszą utrzymywać określone parametry geometryczne, a ich rozszerzalność cieplna musi być zgodna z tym, na co pozwala prowadnica zaworowa i gniazdo [21].

Zużywanie eksploatacyjne zaworów silnikowych obejmuje głównie dwa różne mechanizmy. Pierwszym z nich jest uderzenie zaworu w gniazdo zaworowe podczas jego zamykania, a drugi mechanizm to mikropoślizg, który jest spowodowany elastycznym odkształceniem styku gniazda i zaworu, gdy grzybek zaworu jest dociskany do gniazda przez wysokie ciśnienie podczas spalania [22, 26]. Są to obciążenia mechaniczne wysokocyklowe prowadzące do zmęczenia materiału, które w połączeniu z innymi czynnikami mogą powodować pęknięcia zmęczeniowe zaworów. Badania [23] przedwczesnego pękania zaworów wydechowych w silniku wysokoprężnym wykazały, że pochodzące ze spalin nieregularne osady (in. nagar) na powierzchni przylgni zaworu (rys.1) powodują dużą amplitudę naprężeń zginających w trzonku zaworu, co przyczynia się do uszkodzenia zmęczeniowego skutkującego pęknięciem trzonka (rys.2).




Rys.1 Osad węglowy przyczepiony do przylgni zaworowej [23].

Wskutek wnikania gorących gazów mogą powstawać znaczne ilości nagaru w obszarze prowadzenia trzonka. Ruch zaworu jest wówczas utrudniony, nie zamyka się i występują przegrzania (nadpalenia, kanały wyrzutowe) na powierzchni gniazda [25]. Gromadzące się w gnieździe zaworowym osady mają istotny wpływ na przepływ ciepła. Mogą nie tylko prowadzić do wzrostu temperatury zaworu, ale również odrywać się lokalnie i tworzyć tzw. ścieżkę wycieku, prowadząc do nieszczelności zaworu. Oprócz wysokocyklowych obciążeń mechanicznych o charakterze zmęczeniowym występują także przeciążenia termiczne zaworów, i inne niekorzystne odziaływania, takie jak zużycie ścierne, adhezyjne i korozyjne [4].

Rys.2 Pęknięcie zmęczeniowe trzonka zaworu wydechowego [23].

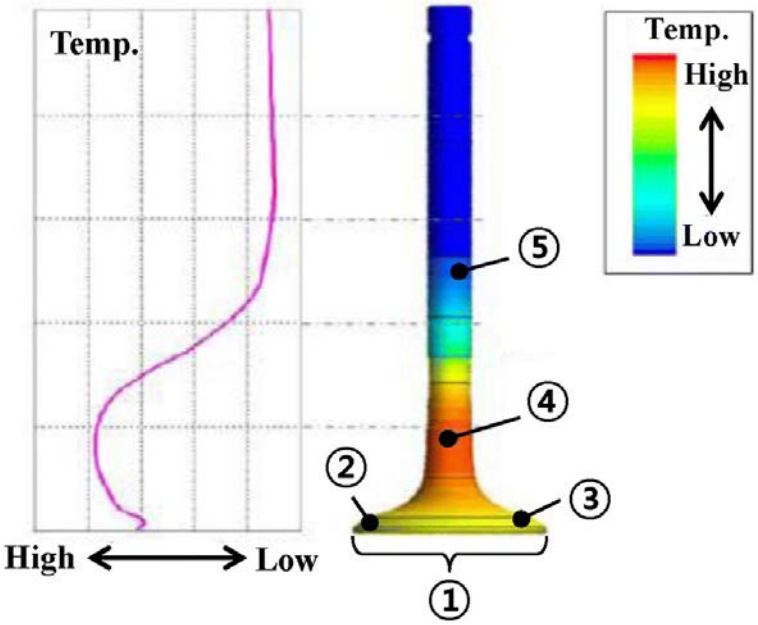
Zużycie ścierne można zaobserwować w zaworze wydechowym poprzez obecność wyżłobień i rys na powierzchniach współpracujących, czyli stykających się z gniazdem zaworu oraz prowadnicą. Czynnikami wpływającymi na ten charakter zużycia są: poślizg względny, cząstki zużycia powierzchni współpracujących oraz stałe produkty spalania paliwa, oleju i powietrza [4, 22]. Natomiast zużycie adhezyjne współpracujących powierzchni można określić jako mikrospawanie i mikrosczepianie. W trakcie wciskania zaworu w gniazdo przy wysokiej temperaturze, odkształcone plastycznie wypukłości lub występy nierówności obecne na powierzchniach współpracujących mogą się łączyć ze sobą przez tzw. mikrospawanie [24]. Niewłaściwie dobrane materiały zaworu i gniazda, krytycznie wysoka temperatura, minimalne smarowanie filmem stałym i wysokie ciśnienie kontaktowe powodują zużycie adhezyjne [22].

Na rysunku 3 pokazano różne rodzaje typowych uszkodzeń zaworów silnikowych. Widoczne jest tam wygięcie i pęknięcie zaworu w obszarze zamka (rys.3a) spowodowane uderzeniem tłoka w grzybek zaworu, do którego przyczyniło się przeskoczenie paska rozrządu o jeden ząb. Pęknięcie zaworu w obszarze zamka może być też spowodowane niepoprawnie działającą sprężyną zaworową (rys.3b). Gdy opory ruchu trzonka zaworu na skutek tarcia o prowadnicę stają się większe niż siła sprężyny zaworu, to pozostaje on stale otwarty, a tłok uderzając w grzybek zaworu powoduje trwałe wygięcie lub pęknięcie trzonka (rys.3c) i wyłącza pracę cylindra lub nawet silnika [20].

Zawory wydechowe często ulegają awarii z powodu przegrzania, które przyczynia się do utraty właściwości mechanicznych, takich jak twardość i wytrzymałość zmęczeniowa oraz postępującej erozji, korozji i utleniania powierzchni zaworu. Zawory wydechowe są stale narażone na działanie gorących gazów korozyjnych przy temperaturze w zakresie od 750 do 950 ºC (rys.4) [27]. Ponadto, zawory wydechowe są narażone na znacznie wyższą temperaturę niż zawory ssące, ponieważ dopływająca świeża mieszanka paliwowa o temperaturze powietrza atmosferycznego chłodzi zawory ssące [28]. Gdy temperatura powierzchni zaworu lub powierzchni gniazda zaworu jest zbliżona do temperatury topnienia materiału zaworu może powodować przedwczesny

zapłon. Jest to spowodowane gorącą powierzchnią zaworu lub cząstkami osadu, które działają jak "świeca żarowa" i zapalają mieszankę paliwowo-powietrzną podczas cyklu sprężania wcześniej niż świeca zapłonowa. Jest to zjawisko charakterystyczne dla silników gazowych. Spalające się gazy są przepuszczane przez kanały przeciekowe zaworu i gniazda na skutek wysokiej różnicy ciśnień nieprawidłowego spalania, podgrzewając powierzchnię do temperatury topnienia.

Rys.3 Rodzaje typowych uszkodzeń zaworów silnikowych [25,26]: a) wygięcie i pęknięcie zaworu w obszarze zamka, b) pęknięcie zaworu w obszarze zamka spowodowane niepoprawnie działającą sprężyną zaworową, c) uderzenie tłoka w grzybek zaworu, d) intensywne zużycie erozyjno-korozyjne zapoczątkowane „gorącym punktem”, e) przegrzanie grzybka zaworu, f) zatarcie trzonka zaworu w prowadnicy, g) zmęczeniowe pęknięcie trzonka zaworu, h) zmęczeniowe pęknięcie grzybka zaworu




Rys.4 Rozkład temperatury zaworu wydechowego, gdzie [3]: 1 - grzybek zaworu, 2 - krawędź zaworu, 3 - przylgnia zaworu, 4 - strefa przejścia cylindrycznego trzonka w grzybek zaworu, 5 - trzonek zaworu

Obecność wysokich temperatur pracy, wysokiego poziomu popiołu i składników korozyjnych pochodzących z produktów spalania prowadzą do korozyjnego zużycia zaworów wydechowych [29]. Korozja międzykrystaliczna atakuje granice ziaren metalu prowadząc do przyspieszonej degradacji zaworów wydechowych powodując cofanie się zaworu, erozję-korozję oraz przepalanie [4]. Gaz ziemny ma wyższą zawartość ciepła właściwego niż paliwa płynne, takie jak benzyna lub olej napędowy, dlatego spala się w wyższej temperaturze, co przyspiesza proces zużywania się zaworów silnikowych. Ponadto gaz ziemny nie zawiera środka smarnego, ani też nie schładza powietrza dolotowego przez parowanie, tak jak w przypadku kropli paliwa ciekłego. Wpływa to niekorzystnie na trwałość zaworów ssących i wydechowych. W związku z tym silniki gazowe są zależne wyłącznie od popiołu smarującego, który zapewnia smar między gorącą powierzchnią zaworu a współpracującym z nim gniazdem. Popiół jest częścią, która pozostaje jako osad po całkowitym spaleniu oleju. Zbyt mała ilość popiołu lub jego niewłaściwy rodzaj może przyspieszyć zużycie zaworu i gniazda, podczas gdy zbyt duża ilość popiołu może prowadzić do zakłóceń w dopasowaniu geometrycznym zaworu i jego gniazda, prowadząc do odkształceń, wycieków, powstawania gorących punktów i erozji, co w konsekwencji prowadzi do przepalenia zaworu [29].

Osady gromadzące się na powierzchni czołowej zaworu i gniazdach zaworów prowadzą do pogorszenia stanu chłodzenia, a jeśli osad gromadzi się na powierzchni czołowej zaworu w jednym miejscu, to dochodzi do jego nieszczelności. Skutkiem nieszczelności zaworu jest wyciek spalin i tworzenie się tzw. gorącego punktu na powierzchni uszczelniającej zaworu, co z kolei prowadzi do rozwoju erozji przylgni zaworowej. W przypadku nieprawidłowego osadzenia zaworu spowodowanego jego odkształceniem lub ingerencją osadów stałych, ciśnienie wewnątrz cylindra zostanie utracone w postaci niepożądanej „ścieżki” wycieku spalin [30]. Ten niekontrolowany wyciek prowadzi do strat materiałowych w zaworze i jego gnieździe za pomocą

mechanizmu erozyjno-korozyjnego [29]. W powtarzających się cyklach pracy silnika wyciek ten „ścieżka” będzie się poszerzać i ostatecznie doprowadzi do powstania głębokich rowków w grzybku zaworu (rys.3d) [31]. Badania dotyczące osadzania się popiołu lub nagaru na powierzchni uszczelniającej zaworu jednoznacznie potwierdziły ich niekorzystny wpływ w procesie pojawiania się mechanizmu erozyjno-korozyjnego [22]. Osad (nagar) pochodzący z zanieczyszczonego paliwa i oleju, składający się prawie w całości ze związków nieorganicznych, przyczynia się do wytrącania cząsteczek soli, które z kolei powodują rozwój korozji międzykrystalicznej i prowadzą do erozji powierzchni uszczelniającej zaworu. Badania nad charakterystyką osadów lub popiołu na powierzchniach uszczelniających zaworów i gniazd wykazały, że odgrywają one ważną rolę w procesie erozji przylgni zaworowej [32]. Nadmierny luz w prowadnicy zaworu (rys.3e) powoduje napływ gorących gazów i tworzenie się osadu na trzonku. W efekcie zawór sztywnieje i nie zamyka się prawidłowo, przez co dochodzi do przegrzania gniazda i rozwoju erozji-korozji grzybka zaworu. Na rysunku 3f pokazano zatarcie trzonka zaworu w prowadnicy spowodowane nadmierną sztywność tego węzła tarcia przez niewystarczający luz prowadnicy zaworu i niedostateczne smarowanie. Rysunek 3g przedstawia pęknięcie zmęczeniowe zaworu w strefie przejścia cylindrycznego trzonka w grzybek zaworu [20], a rysunek 3h pokazuje pęknięcie zmęczeniowe samego grzybka zaworu.

Znaczną poprawę w zakresie zwiększenia własności mechanicznych zaworów, zapobiegających powstawaniu większości z wyżej opisanych mechanizmów uszkodzeń zaworów można osiągnąć poprzez zastosowanie zabiegów wzmacniających warstwę wierzchnią zaworów silnikowych.

## 3 Koncepcja urządzenia do śrutowania zaworów silnikowych w stanie wstępnego naprężenia

W Katedrze Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa Politechniki Śląskiej opracowano szereg koncepcji urządzenia do wzmacniania zaworów silników spalinowych poprzez obróbkę powierzchniową. Jedną z nich jest urządzenie do śrutowania zaworów silnikowych w stanie wstępnego naprężenia [33]. Urządzenie charakteryzuje się tym, że wywołuje w warstwie wierzchniej obrabianego zaworu stan naprężeń własnych ściskających o wartości większej, niż ma to miejsce w przypadku śrutowania zaworów w stanie swobodnym. Zabieg umacniania zgniotem powierzchniowym przez śrutowanie wszystkich newralgicznych stref zaworu, ze szczególnym uwzględnieniem strefy zamka zaworowego, trzonka i strefy przejścia trzonka w grzybek zaworu z jednoczesnym nagniataniem statycznym przylgni zaworowej jest realizowany w jednym ciągłym cyklu obróbczym. Urządzenie posiada samozaciskające się szczęki mocujące obrabiany zawór, zwierane sprężyną i osadzone w przesuwnej wzdłużnie oprawie, która stanowi tłok przemieszczany w cylindrze hydraulicznym obracanym wokół osi wspólnie z oprawą. Dodatkowo urządzenie jest wyposażone w co najmniej jedną dyszę rozpylającą ciecz obróbkową chłodząco-smarującą.

Urządzenie do śrutowania zaworów silnikowych wg proponowanego rozwiązania pozwala uzyskać wiele korzystnych cech użytkowych obrabianych zaworów. Bardzo duża efektywność polepszenia trwałości zmęczeniowej wynika z tego, że uderzenia kulek śrutujących w powierzchnię obciążonego siłą rozciągającą zaworu powoduje znaczne zwiększenie chwilowej siły uderzenia, gdyż usztywniony zawór ma pozornie większą masę. Jednocześnie istniejący w wyniku obciążenia zaworu stan naprężeń rozciągających współdziała ze złożonym stanem naprężeń lokalnych pochodzących od uderzeń kulek, co powoduje efekt rozleglejszego uplastycznienia materiału zaworu pod działaniem silnie niesymetrycznego rozkładu naprężeń.

Stan uplastycznienia warstwy wierzchniej zaworu sięga na większą głębokość, stąd wyższe są naprężenia własne ściskające, formujące się ostatecznie po zdjęciu obciążenia wstępnego. Eksploatacyjne naprężenia rozciągające w trzonku zaworu są w warstwie wierzchniej pomniejszane o naprężenia własne ściskające. W efekcie wzrasta trwałość zmęczeniowa, gdyż pęknięcia zmęczeniowe zawsze rozpoczynają się od warstwy wierzchniej zaworu. W proponowanym rozwiązaniu te efekty są osiągane przez wykonywanie śrutowania trzonka zaworu, poddawanego jednocześnie w trakcie zabiegu działaniu odpowiednio dobranej siły rozciągającej, która dodatkowo wywołuje efekt statycznego nagniatania przylgni grzybka zaworu. Całość wyżej wymienionych zabiegów jest realizowana w jednym cyklu obróbczym, co stanowi dużą dogodność korzystania z urządzenia wg proponowanego rozwiązania.

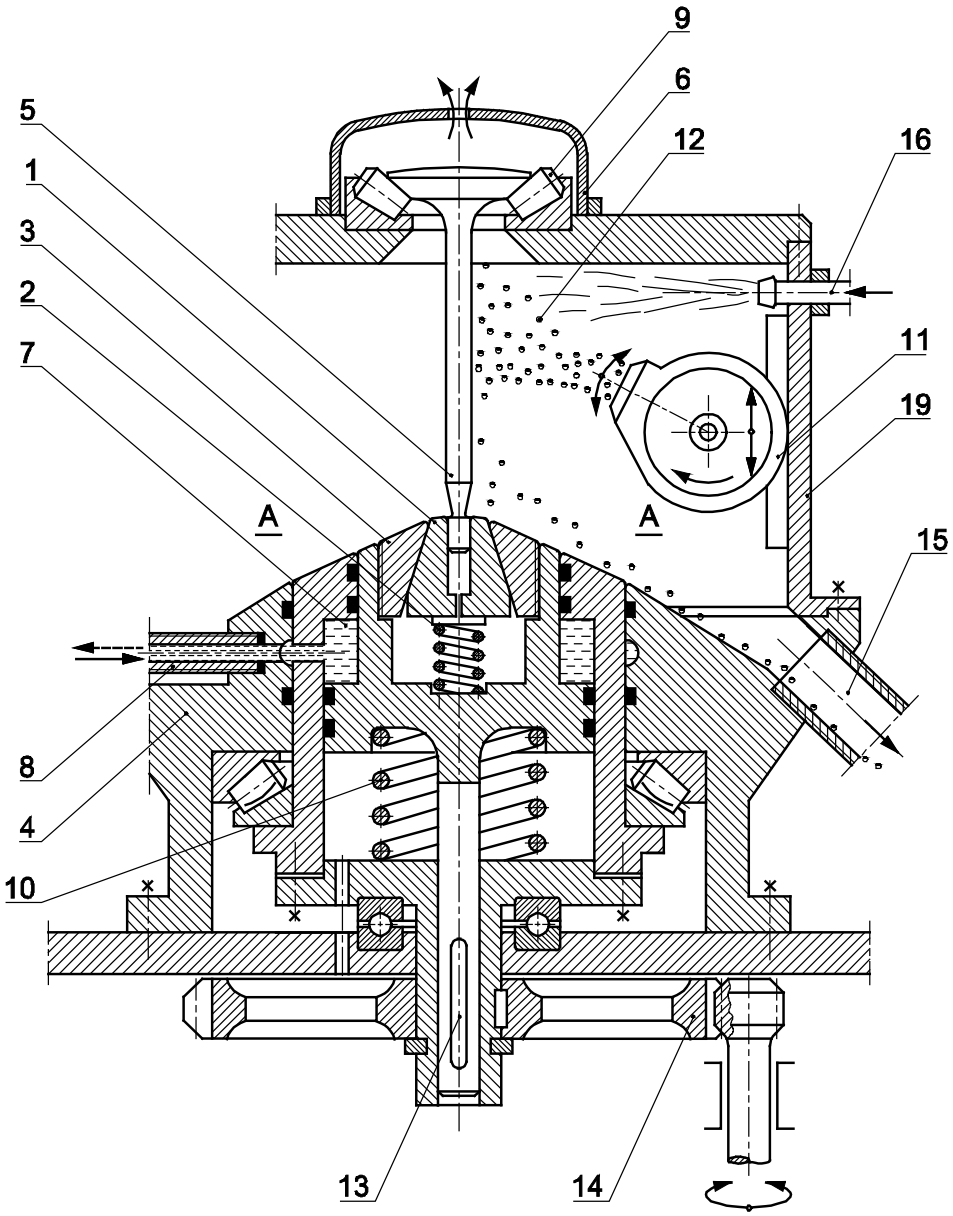
Śrutowanie dodatkowo zwiększa twardość obrabianej warstwy wierzchniej zaworu, co powoduje wzrost odporności na zużycie ścierne. Ponadto efektem śrutowania jest także korzystna zmiana faktury powierzchni z licznymi, nachodzącymi na siebie, kulistymi zagłębieniami. Pełnią one funkcje mikrokieszeni smarnych sprzyjających występowaniu efektu smarowania elastohydrodynamicznego we współpracy trzonka zaworu z prowadnicą zaworową, co zmniejsza opory ruchu i w znacznym stopniu ogranicza zużycie ścierne, a także skutkuje lepszym uszczelnieniem połączenia trzonek - prowadnica.

Parametry procesu obróbki zaworów urządzeniem można łatwo regulować w szerokich granicach, a efekt końcowy śrutowania zależy od doboru siły wstępnego napinania zaworu, doboru średnicy i materiału śrutu, prędkości jego wyrzutu, czasu obróbki i krotności przejść obróbczych. Korzystnym jest dobrać siłę obciążenia wstępnego odpowiadającą 50 - 85% siły wynikającej z granicy proporcjonalności materiału, z którego wykonany jest zawór.

Urządzenie do śrutowania zaworów wg proponowanego rozwiązania może być również stosowane w procesie regeneracji zaworów po pewnym okresie ich eksploatacji, niezależnie od zastosowanych podczas produkcji zaworów zabiegów technologicznych. Dużą korzyścią wynikającą z regeneracji zaworów przez śrutowanie jest pewien wzrost średnicy trzonka zaworu. Chociaż wzrost ten jest relatywnie niewielki, to jednak służy częściowej kompensacji ubytków powstałych na skutek zużycia eksploatacyjnego zaworów, a więc poprawia ich szczelność. Wzrost odporności na zużycie i poprawa szczelności zaworów ogranicza dostawanie się oleju silnikowego do komory spalania silnika, którego produkty spalania wraz ze spalinami zanieczyszczają powietrze atmosferyczne. Zastosowanie obróbki zaworów w wymieniony sposób ma więc także walory ekologiczne. Obróbka zaworów wg proponowanego rozwiązania zapewnia dużą wydajność przy niewielkim zużyciu energii i bardzo dużych efektach poprawy niezawodności zaworów silników spalinowych.

Urządzenie do śrutowania zaworów silnikowych w stanie wstępnego naprężenia może być z łatwością przystosowane do śrutowania także innych elementów maszyn, zwłaszcza sprężyn naciskowych, w tym także sprężyn zaworów silników spalinowych. Duże możliwości przystosowywania urządzenia do obróbki zaworów o różnych rozmiarach, jak również do obróbki innych elementów maszyn ułatwia modułowa, dzielona w wielu płaszczyznach poziomych konstrukcja obudowy urządzenia.

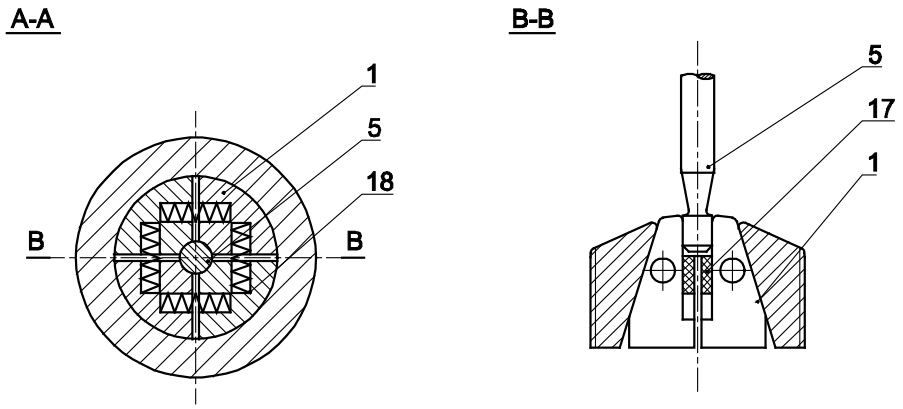
Urządzenie do śrutowania zaworów wg proponowanego rozwiązania w przykładzie realizacji ilustruje rysunek 5, na którym przedstawiono przekrój pionowy przez urządzenie. Na rysunku 6 zamieszczono szczegół mocowania końcówki zaworu w szczękach urządzenia oraz przekrój przez szczęki samozaciskowe.




Rys.5 Urządzenia do śrutowania zaworów silników spalinowych w stanie wstępnego naprężenia w przykładzie realizacji [33]

Urządzenie jest zamknięte w obudowie 19, w której odbywa się proces obróbki powierzchniowej zgniotem przez śrutowanie całego trzonka zaworu silnikowego 5 wraz ze strefą przejścia w grzybek, wykonywany w stanie wstępnego naprężenia zaworu siłą wzdłużną o regulowanej wartości. Jednocześnie realizowany jest proces statycznego nagniatania przylgni grzybka obrabianego zaworu 5, co polepsza jej odporność na zużycie i korzystnie zwiększa sztywność kontaktową zaworu. Obrabiany zawór 5 po zdjęciu pokrywy 6 urządzenia jest wkładany końcówką trzonka w samozaciskowe szczęki 1, osadzone w oprawie 3 i zaciskane sprężyną 2. Następnie obrabiany zawór 5 jest poddawany działaniu siły rozciągającej, wywołanej przez układ hydrauliczny z jednoczesnym śrutowaniem i obracaniem wokół osi. Prawidłowe pozycjonowanie trzonka zaworu 5 ułatwia wymienny silikonowy ogranicznik 17 (rys.2). Oprawa 3 pełni funkcję tłoka przesuwnego względem cylindra hydraulicznego 4, wywołującego obciążenie zaworu wzdłużną siłą rozciągającą.

Po zasileniu przestrzeni 7 cieczą hydrauliczną pod ciśnieniem, regulowanym przez króciec 8, następuje wywołanie wzdłużnej siły rozciągającej w trzonku zaworu 5, którego grzybek opiera się wówczas o rolki stożkowe 9. Następuje jednocześnie mocne zaciśnięcie szczęk 1 oraz ściśnięcie sprężyny 10. Wówczas dochodzi do uruchomienia wyrzutników 11 śrutu 12, najlepiej rozmieszczonych równomiernie na całym obwodzie obudowy 19 urządzenia. Wyrzutniki 11 mają możliwość przemieszczania się wzdłuż ściany obudowy 19 oraz wychylenia kątowego dysz strumieniowych. Wyrzucany strumień śrutu 12 uderzając w powierzchnię zaworu 5 umacnia go, ze szczególnym uwzględnieniem strefy zamka i trzonka zaworu 5 wraz ze strefą przejścia w grzybek. Dla zapewnienia równomiernego stopnia umocnienia warstwy wierzchniej zaworu 5 następuje włączenie jego obrotu wraz z oprawą 3 wokół osi. Obrót jest realizowany przy pomocy przekładni mechanicznej 14 poprzez przesuwne połączenie wpustowe 13. Korzystne jest obracanie zaworu 5 ruchem wahadłowo-nawrotnym. W wyniku obracania zaworu 5 następuje jednocześnie statyczne nagniatanie przylgni grzybka zaworu 5 poprzez rolki 9 pod działaniem siły rozciągającej zawór 5. W przypadku rezygnacji z nagniatania przylgni grzybka zaworu 5 rolki 9 mogą być zastąpione łożyskiem tocznym stożkowym.




Rys.6 Szczegół mocowania końcówki zaworu w szczękach urządzenia oraz przekrój B-B przez szczęki samozaciskowe [33]

W trakcie śrutowania do komory urządzenia jest podawana ciecz obróbkowa chłodząco-smarująca rozpylana przez dyszę 16. Śrut 12 po uderzeniu w obrabiany zawór 5 jest usuwany wraz z cieczą obróbkową na zewnątrz komory przez wysyp 15. Śrut po przepłukaniu i ewentualnym schłodzeniu wraca do wyrzutników 11 w układzie zamkniętym. Użycie cieczy obróbkowej chłodząco-smarującej, najlepiej w postaci emulsji olejowo-wodnej, polepsza jakość umacnianej powierzchni zaworu oraz ogranicza niekorzystne zjawisko relaksacji naprężeń własnych ściskających, wywołanych zabiegiem umacniania. Ciecz obróbkowa ogranicza także zjawisko rekrystalizacji odkształconej struktury warstwy wierzchniej zaworu, które intensyfikuje się w podwyższonej temperaturze. Gwałtowny wzrost temperatury w strefie uderzenia wynika z zamiany pracy odkształcenia plastycznego materiału umacnianego na ciepło. Dodatkowo ciecz obróbkowa zwilża powstające produkty zużycia, co chroni przed niebezpieczeństwem wybuchu pyłu metalicznego, tworzącego się podczas śrutowania. Ciecz obróbkowa po filtracji może być ponownie kierowana do układu zraszania w obiegu zamkniętym. Po zakończeniu śrutowania zaworu 5 wyłączane są wyrzutniki 11 śrutu 12, zatrzymywany jest obrót zaworu 5 i zmniejszane jest ciśnienie cieczy hydraulicznej pod tłokiem 3. Wówczas ściśnięta sprężyna 10 cofa oprawę 3 do pozycji wyjściowej, zwalniane zostaje wstępne

naprężenie zaworu 5, który może być łatwo wyjęty ze szczęk 1 i zastąpiony kolejnym zaworem przeznaczonym do śrutowania. Wyjęcie obrobionego zaworu ułatwiają sprężynki 18 luzujące szczęki 1. Zabieg śrutowania kolejnego zaworu w stanie wstępnego naprężenia można rozpocząć ponownie w sposób jak opisano wyżej. Pokrywa 6 zabezpiecza przed rozbryzgiwaniem cieczy obróbkowej umożliwiając stałe odpowietrzanie wnętrza komory roboczej urządzenia.

## 4 Podsumowanie

Urządzenie posiada innowacyjną konstrukcję i służy do umacniania zgniotem powierzchniowym przez śrutowanie wszystkich newralgicznych stref zaworów silników spalinowych, ze szczególnym uwzględnieniem strefy zamka i trzonka zaworowego, strefy przejścia trzonka w grzybek zaworu z jednoczesnym nagniataniem statycznym przylgni zaworowej, realizowanych w jednym ciągłym cyklu obróbczym.

Kompleksowa obróbka powierzchni zaworów silnikowych przez śrutowanie w stanie wstępnego naprężenia siłą rozciągającą pozwala uzyskiwać znacznie polepszone własności użytkowe trzonków i gniazd zaworów, a w szczególności trwałość zmęczeniową i odporność na zużycie ścierne. Poprawa twardości i sztywności styku przylgni i gniazda zaworu wydłuża jego żywotność.

Zabieg umacniania zgniotem przez śrutowanie urządzeniem wg proponowanego rozwiązania może być wykonywany zarówno na etapie wytwarzania zaworów, jak również można go powtórzyć nawet po pewnym okresie ich eksploatacji w celu pełnego lub częściowego przywrócenia utraconych własności użytkowych.

Korzystnym efektem śrutowania zaworu jest także zmiana jego faktury powierzchni, która pełni funkcje mikrokieszeni smarnych poprawiających warunki smarowania we współpracy trzonka zaworu z prowadnicą zaworową. Zmniejszone opory ruchu, a także w znacznym stopniu ograniczone zużycie ścierne skutkują lepszym uszczelnieniem połączenia trzonek - prowadnica.

Urządzenie do śrutowania zaworów silnikowych w stanie wstępnego naprężenia charakteryzuje się tym, że posiada samozaciskające się szczęki mocujące obrabiany zawór, zwierane sprężyną, osadzone w przesuwnej wzdłużnie oprawie stanowiącej tłok przemieszczany w cylindrze hydraulicznym obracanym wokół osi wspólnie z oprawą. Dodatkowo urządzenie jest wyposażone w co najmniej jedną dyszę rozpylającą ciecz obróbkową chłodząco-smarującą.

Urządzenie może być łatwo przystosowane do śrutowania także innych elementów maszyn w stanie wstępnego naprężenia, zwłaszcza sprężyn naciskowych, w tym także sprężyn zaworów silników spalinowych. Duże możliwości przystosowywania urządzenia do obróbki zaworów o różnych rozmiarach, jak również innych elementów maszyn ułatwia modułowa, dzielona w wielu płaszczyznach poziomych konstrukcja obudowy urządzenia.

**Literatura:**


[1] Kazymyrovych, V. Very high cycle fatigue of engineering materials (A literature review). *Karlstad University Studies*. 22, 2009, pp. 1-34

[2] Chun, K. J., Kim, J. H., Hong, J. S. A study of exhaust valve and seat insert wear depending on cycle numbers. *Wear*. 263, 2007, pp. 1147–1157

[3] Choi, J., Lee, J., Jun, N. et al. Development of Laboratory Fatigue Testing Apparatus for Automotive Vehicle Engine Valve *Simulating Actual Operating Conditions. Int. J. Precis. Eng. Manuf*. 20, 2019, pp. 1241–1253

[4] Forsberg, P., Hollman, P., Jacobson, S. Wear mechanism study of exhaust valve system in modern heavy duty combustion engines. *Wear*. 271(9), 2011, pp.2477-2484

[5] Rynio, C., Hattendorf, H., Klöwer, J., Eggeler, G. The evolution of tribolayers during high temperature sliding wear. *Wear*. 315 (1), 2014, pp. 1-10

[6] Dziubak, T.; Dziubak, S.D. A Study on the Effect of Inlet Air Pollution on the Engine Component Wear and Operation. *Energies*. 15 (3), 1182, 2022, pp. 1-50

[7] Raghuwanshi, N. K., Pandey, A., Mandloi, R. K. Failure Analysis of Internal Combustion Engine Valves: A Review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 1 (2), 2012, pp. 173-181

[8] Shot Peening, Applications. *Metal Improvement Company Green Book 9th edition. A Subsidiary of Curtiss-Wright Corporation*. 2015, pp. 1-61

[9] Schulze, V., Bleicher, F., Groche, P., Guo, Y.B., Pyun, Y.S. Surface modification by machine hammer peening and burnishing. *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 65 (2), 2016, pp. 809-832

[10] Maximov, J.T., Duncheva, G.V., Anchev, A.P. et al. Slide burnishing-review and prospects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 104, 2019, pp. 785–801

[11] Raza, A., Kumar, S. A critical review of tool design in burnishing process. *Tribology International*. 174, 107717, 2022, pp. 1-20

[12] Mahajan, D., Tajane, R. A Review on Ball Burnishing Process. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 3 (4), 2013, pp. 1-8

[13] Świetlicki, A., Szala, M., Walczak, M. Effects of Shot Peening and Cavitation Peening on Properties of Surface Layer of Metallic Materials - A Short Review. *Materials*. 15, 2476, 2022, pp. 1-26

[14] Jaramillo, S.H., de Sánchez, N.A., Avila, D. J. Effect of the shot peening process on the fatigue strength of SAE 5160 steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 233 (12), 2019, pp. 4328-4335

[15] Zaleski, K. Technologia nagniatania dynamicznego. *Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej*. Lublin 2018.

[16] Kalman, R. Mechaniczne umacnianie powierzchni części maszyn. *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*. Warszawa 1965

[17] Szulc, St., Stefko, A. Obróbka powierzchniowa części maszyn. *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*. Warszawa 1976.

[18] Przybylski, W. Technologia obróbki nagniataniem. *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*. Warszawa 1987

[19] Doleckij, W. A. (red.) Uwieliczenije resursów maszin tiechnologiczeskimi mietodami. *Maszinostrojenie*, Moskwa 1978

[20] Filipowicz, K., Kuczaj, M., Mikuła, S. Use of surface working for improving the working life of Piston valves of combustion engines. *Transport Problems*. 15 (3), 2020, pp. 107-116

[21] Budowa pojazdów samochodowych. Cz. 2. Silniki. *Projekt "Model systemu wdrażania i upowszechniania kształcenia na odległość w uczeniu się przez całe życie*". https://zsckrjablon.pl/wp-content/uploads/2020/05/uklad-rozrzadu.pdf (Data dostępu: 30.12.2024 r.)

[22] Lewis, R., Dwyer-Joyce, R.S. Combating automative engine valve recession. *Tribology and Lubrication Technology*. 59 (10), 2003, pp. 48-51

[23] Witek, L. Failure and thermo-mechanical stress analysis of the exhaust valve of diesel engine, *Eng. Fail. Anal*. 66, 2016, pp. 154–165

[24] Zhao, R., Barber, G. C., Wang, Y. S., & Larson, J. E. Wear Mechanism Analysis of Engine Exhaust Valve Seats with a Laboratory Simulator. *Tribology Transactions*. 40 (2), 1997, pp. 209–218

[25] Valve damage and causes. *MS Motorservice International GmbH*. Available at: https://www.ms-motorservice.com/int/en (Data dostępu: 30.12.2024 r.)

[26] Khan, M. I., Khan, M. A., Shakoor, A. A failure analysis of the exhaust valve from a heavy duty natural gas engine. *Engineering Failure Analysis*. 85, 2018, pp. 77-88

[27] Wang, Y.S., Narasimhan, S., Larson, J.M., Larson, J.E., Barber, G.C. The effect of operating conditions on heavy duty engine valve seat wear. *Wear*. 201 (1), 1996, pp. 15-25

[28] Vardar, N., Ekerim, A. Investigation of exhaust valve failure in Heavy - duty diesel engine. *Gazi University Journal of Science*. 23 (4), 2010, pp. 493-499

[29] Scott, C.G., Riga, A.T., Hong, H. The erosion-corrosion of nickel-base diesel engine exhaust valves. *Wear. 10th International Conference on Wear of Materials*. 181-183, 1995, pp. 485-494

[30] Pyle, W. and Smrcka, N. The Effect of Lubricating Oil Additives on Valve Recession in Stationary Gaseous-Fueled Four-Cycle Engines. *SAE Technical Paper* 932780 1-25 (1993).

[31] Arnold, E. B., Bara, M. A., Zang, D. M., Tunnecliffe, T. N., & Oltean, J. Development and Application of a Cycle for Evaluating Factors Contributing to Diesel Engine Valve Guttering. *SAE Transactions*. 97, 1988, pp. 1243–1256

[32] Scott, R. Stationary natural gas engine lubrication. *Machinery Lubrication, Noria, Tulsa*, OK, USA. 5, 22, 2015

[33] Pat.240149. Urządzenie do śrutowania zaworów silników spalinowych. *Politechnika Śląska*, Gliwice, Pl. (Mikuła, J., Grzegorzek, W., Adamecki, D., Mikuła, S.)

# MONITORING AKO NÁSTROJ PREDIKCIE PORÚCH POTRUBNÉHO DOPRAVNÍKA

# MONITORING AS A TOOL FOR PREDICTING PIPE CONVEYOR FAILURES

**Marek MORAVIČ**, Technická univerzita v Košiciách, FBERG, Slovensko [1]
**Janka ŠADEROVÁ**, Technická univerzita v Košiciách, FBERG, Slovensko [2]

**Anotace:**

Článok poukazuje na dôležitosť monitorovania vibrácií, čo má význam z hľadiska bezpečnosti a výkonnosti potrubného dopravníka. Vibrácie síce nie je možné úplne eliminovať, ale pomocou metód minimalizovať ich negatívny vplyv na zariadenie v prevádzke. Cieľom článku je prezentovať výsledky experimentálneho výskumu. V rámci experimentálneho výskumu boli monitorované vibrácie na nerotujúcich konštrukčných častiach potrubného dopravníka podľa normy ČSN ISO 20816-1. V tomto článku sú uvedené výsledky merania na kužeľočelnej prevodovke. Na monitoring jej stavu bol použitý štvorkanálový analyzátor zvuku a vibrácií od spoločnosti Svantek. Výstupom je grafické znázornenie meraných veličín, t.j. ekvivalentná hladina A zvuku a stredná efektívna hodnota rýchlosti vibrácií. Získané veličiny boli použité na stanovenie kritických otáčok potrubného dopravníka.

**Annotation:**

The article highlights the importance of vibration monitoring, which is relevant to pipe conveyor safety and performance. Although vibration cannot be completely eliminated, methods can be used to minimize its negative impact on the equipment in operation. The aim of this paper is to present the results of experimental research. Within the experimental research, vibrations on the non-rotating structural parts of the pipe conveyor were monitored according to ČSN ISO 20816-1 standard. In this paper, the results of measurements on a bevel helical gearbox are presented. A four-channel sound and vibration analyzer from Svantek was used to monitor its condition. The output is a graphical representation of the measured quantities, i.e. the A-weighted equivalent continuous sound level and the RMS of a velocity signal. The obtained quantities were used to determine the critical speed of the pipe conveyor.

## 1 Úvod

V súčasnom stále vyvíjajúcom sa svete techniky, kde zohrávajú kľúčovú úlohu efektívnosť a zabezpečenie výrobných procesov, nie je možné podceniť význam dôkladného monitorovania technického stavu strojov a zariadení. Medzi rôznymi

[1] Ing. Marek Moravič, PhD.
Technická univerzita v Košiciách, Fakulta baníctva, ekológie, riadenia a geotechnológií
Letná 9, 042 00 Košice, Slovenská republika
tel.: +421 55 602 3146, mobil:+421 950 286 486, e-mail: marek.moravic@tuke.sk, https://www.tuke.sk
[2] doc. Ing. Janka Šaderová, PhD.
tel.: +421 55 602 3444, mobil:+421 944 009 786, e-mail: janka.saderova@tuke.sk

diagnostickými metódami sa zvýšená pozornosť venuje monitorovaniu vibrácií, čo považujeme za spoľahlivú technológiu, ktorá umožňuje nielen včas rozpoznávať opotrebovávanie až prípadné poškodenia strojov a zariadení, ale zároveň nám umožňuje aj zabezpečiť optimalizáciu ich spoľahlivej funkcie, čím sa samozrejme predlžuje ich prevádzková životnosť a zároveň sa znižuje riziko havárií na minimálny úroveň. Touto oblasťou sa zaoberá vibrodiagnostika, ktorá umožňuje aktuálne posúdiť stav stroja na základe jeho mechanických charakteristík.

## 2 Monitoring vibrácií

Pre posudzovanie funkčnosti každej mechanickej sústavy sa využíva monitoring vibrácií. Je to periodické, prípadne kontinuálne sledovanie meraného objektu a získavanie tak aktuálnych informácií a údajov o technickom stave v reálnom čase. Pojem vibrácie sú v technickej praxi úzko späté s pojmom technická diagnostika. Tento druh diagnostiky sa musí vykonávať nielen pri prevádzkovej odstávke stroja, ale aj za jej chodu, aby sme obsiahli, čo najväčšie množstvo činiteľov ovplyvňujúcich technický stav. Správna diagnostika a dynamická analýza totiž prispieva k možnostiam znižovania vibrácií [1], alebo k ich včasnému predchádzaniu.

Základným cieľom prevádzky dopravných systémov je zvýšenie ich produktivity a zníženie nákladov na ich údržbu. Zmena charakteru vibrácií, ku ktorej došlo počas práce potrubného dopravníka môžu mať rôzne príčiny.

Výskyt vibrácií nad prípustnou mierou, vopred určené pre konkrétne miesto prevádzkovaného zariadenia môže spôsobiť vznik poruchy, prípadne inú nebezpečnejšiu situáciu v mieste jej nasadenia. Pomocou pravidelného prípadne nepretržitého monitorovania a vyhodnocovania nameraných hodnôt vibrácií potrubného dopravníka je možné identifikovať aj ešte nerozvinuté poruchové stavy a včas im tak predchádzať.

Pre efektívnu technickú diagnostiku sa pracuje v tejto oblasti s jestvujúcimi technickými normami, ktoré stanovujú všeobecné podmienky a zásady merania kmitania pre bezpečný a bezporuchový stav sústavy. Jednou z nich je norma ČSN ISO 20816-1 Vibrace - Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 1: Obecné pokyny [2]. Meraním sa určí veľkosť kmitania v stanovenom smere a mieste merania.

## 3 Charakteristika skúmanej sústavy

Potrubné dopravníky zohrávajú dôležitú úlohu v oblasti ťažby a spracovania nerastných surovín, pretože slúžia na dopravu hromadných substrátov na veľké vzdialenosti. Potrubný dopravník je zložený z pomerne nízkeho počtu druhov stavebných prvkov akými sú pohon, dopravný pás, hnacia a vratná stanica, korýtková valčeková stolica. Niektoré druhy sú v konštrukcii potrubného dopravníka prítomné v niekoľko desiatok rovnakých prvkov akými sú prstencové valčekové stolice.

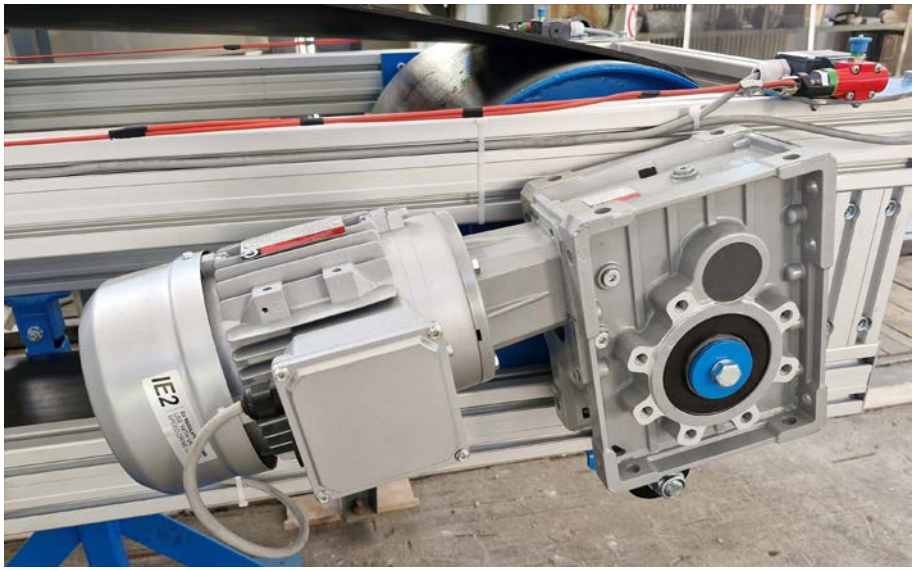
Voľba vhodnej koncepcie kontroly vibrácií potrubného dopravníka má zahŕňať, ako druhovosť aj početnosť jej konštrukčných prvkov. Na obr.1 je funkčný laboratórny model potrubného dopravníka, na ktorom sa vykonali merania vibrácií a hluku.

Obr.1  Laboratórny potrubný dopravník

## 4 Popis meracieho miesta

Autori [3] pomocou metódy AHP (Analytický hierarchický proces) určili pohon ako najdôležitejší konštrukčný prvok.

Hlavným objektom experimentálneho merania je pohon, konkrétne kužeľočelná prevodovka CHO82 s prevodovým pomerom i = 40 a elektromotorom o výkone P = 1,1 kW (obr.2). Výkon prenášaný z elektromotora na hriadeľ hnacieho bubna zabezpečuje pružná spojka. Meranie vibrácií a hluku na tomto mieste nám môže poskytnúť informáciu o poruche na niektorom z komponentov prevodovky [4].




Obr.2  Pohon potrubného dopravníka

Meracia aparatúra a vyhodnocovacie prostriedky:

- súprava na meranie zvuku SV 208,
- štvorkanálový analyzátor SVAN 958A,
- triaxiálny akcelerometer SV 85,
- kábel SV 55,
- softvér SvanPC++.

Merané veličiny:

- akustický tlak p [Pa],
- rýchlosť vibrácií v [$mm \cdot s^{-1}$].

Vyhodnocované veličiny:

- ekvivalentná hladina A zvuku LAeq [dB],
- stredná efektívna hodnota rýchlosti vibrácií RMS v [$mm.s^{-1}$],
- frekvencia f [Hz],
- veľkosť amplitúdy rýchlosti vibrácií FFT Vel RMS v [$mm.s^{-1}$].

Rozsah otáčok $n_M$: 0 - 1400 $min^{-1}$.
Čas merania: 14:49:22 - 14:56:36.
Trvanie: 7 min. a 14 sek. (3 min. a 37 sek. - nárast a pokles otáčok)

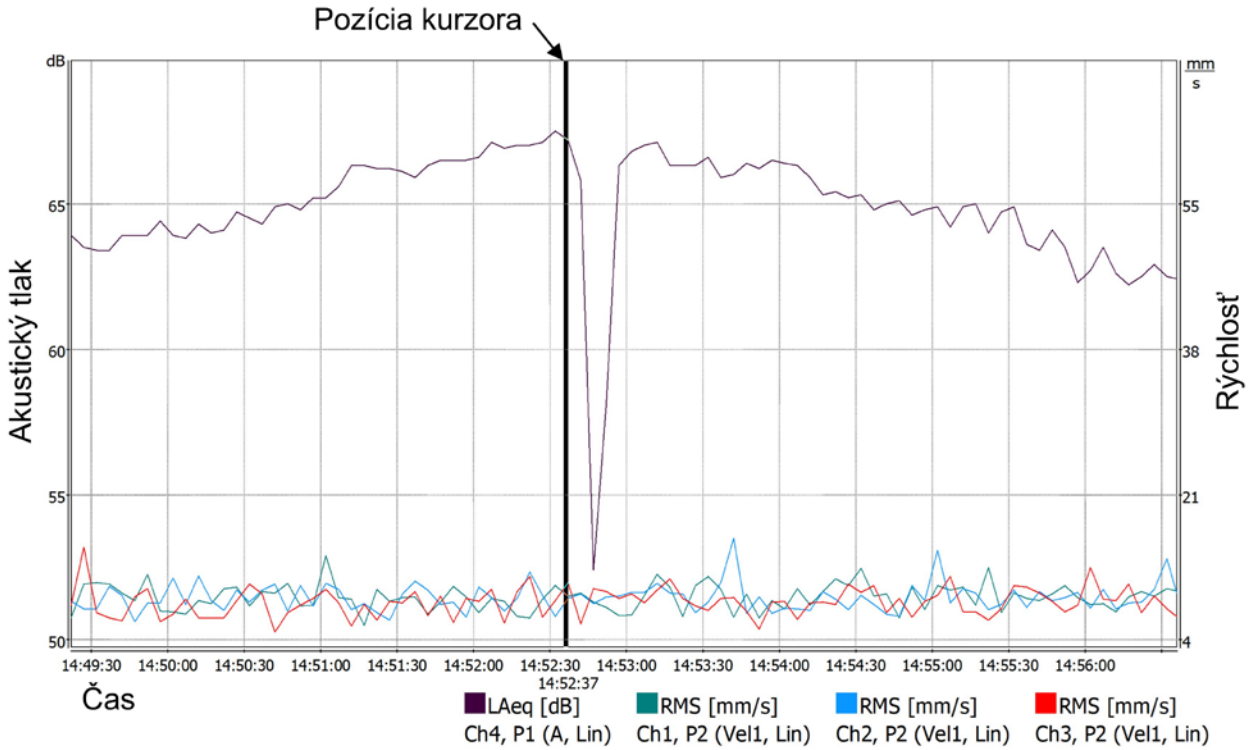
Na obr.3 je znázornené umiestenie triaxiálneho akcelerometra SV 85 na prevodovke pohonu potrubného dopravníka a jeho smery.

Obr.3 Umiestnenie snímača na prevodovke

## 5 Zhodnotenie merania

Meranie sa uskutočnilo s kolektívom Klub ZPS vo vibroakustike, s.r.o. [5], ktorá nám na záver poskytla grafické výstupy (obr.4 a obr.5) spracované v softvéri SvanPC++. Veličiny boli zaznamenané pri chode potrubného dopravníka bez prepravovaného materiálu a pri zmene otáčok pohonu. Zmenu otáčok elektromotora zabezpečoval frekvenčný menič.

Na obr.4 je znázornená charakteristika akustického tlaku a vibrácií v čase od 14:49:22 do 14:56:36. Pomocou meracieho rozsahu je možné zistiť, ako sa akustický tlak mení v súvislosti s jednotlivými prevádzkovými podmienkami pohonu. Najvýraznejšia vrcholová hodnota 67,2 dB je v čase 14:52:37 (pozícia kurzora v softvéri SvanPC++), kedy pohon bežal pri maximálnych otáčkach.




Obr.4 Hladina A zvuku a rýchlosť vibrácií

Hladina A zvuku vykazuje nárast a pokles pri zmene otáčok od 0 do 1400 $min^{-1}$. Naopak efektívna rýchlosť vibrácií nevykazuje nárast a pokles pri zmene otáčok.

Tab.1 obsahuje hodnoty rýchlosti vibrácií v mieste kurzora.

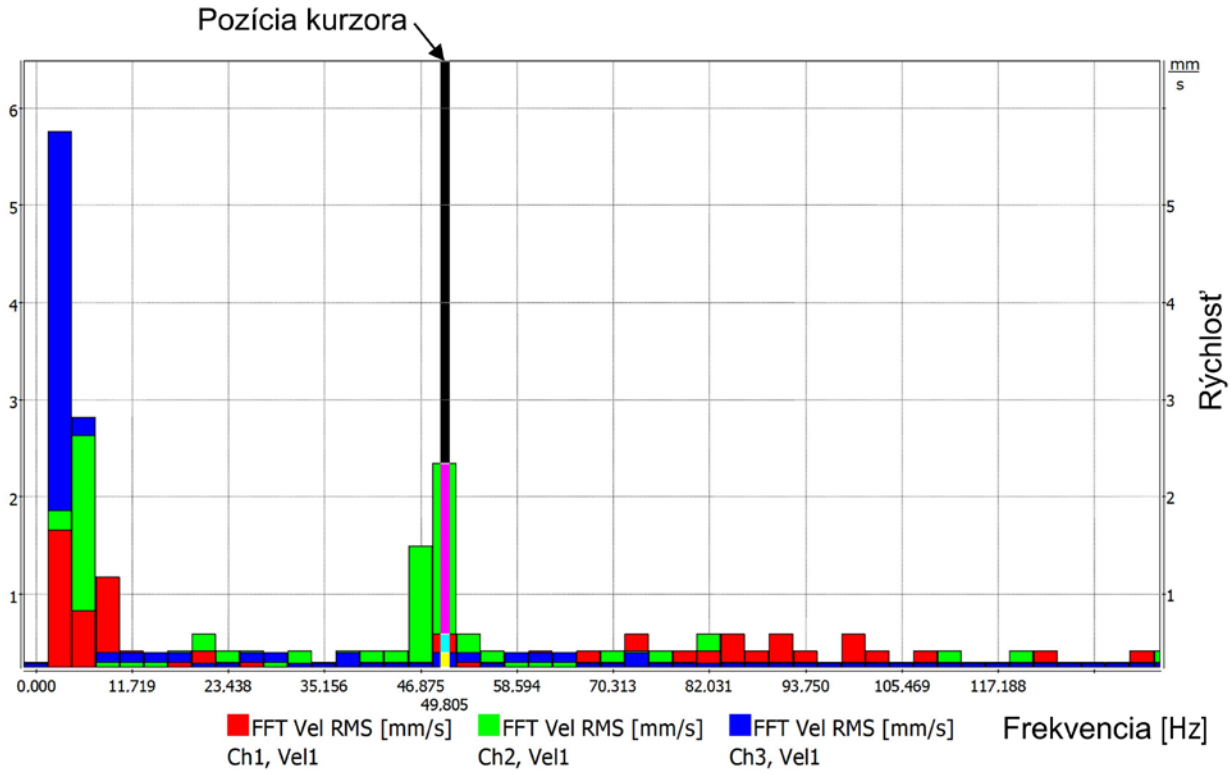
Tab.1 Hodnoty rýchlosti vibrácií RMS v mieste kurzora v čase 14:52:37

| Kanály | RMS [$mm.s^{-1}$] |
|---|---|
| CH1 | 9,22571 |
| CH2 | 8,91251 |
| CH3 | 10,83927 |

Triaxiálne meranie vibrácií cez kanály CH1, CH2 a CH3 ukázalo detailný prehľad s rôznymi vibračnými rýchlosťami. Na základe týchto získaných údajov sa dá zhodnotiť nielen celkový technický stav stroja, ale aj lepšie porozumieť dynamike chodu stroja v závislosti od zmeny jeho pracovných pomerov.

Namerané výsledky sú spracované použitím metódy Fourierovej transformácie (FFT), pomocou ktorej sa zobrazujú jednotlivé frekvencie a veľkosti amplitúd rýchlosti vibrácií. Takto sa dajú zistiť prípadné zdroje nerovnováhy alebo mechanické porušenie.

Frekvenčné vrcholy na obr.5 poukazujú na význam dôkladného monitorovania a analýzy charakteristík vibrácií.




Obr.5 FFT analýza z časového záznamu

V tab.2 sú zaznamenané v mieste kurzora hodnoty veľkosti amplitúd rýchlosti vibrácií.

Tab.2 Hodnoty veľkosti amplitúd rýchlosti vibrácií RMS v mieste kurzora pri frekvencii 49,805 Hz

| Kanály | FFT Vel RMS [mm.s$^{-1}$] |
|---|---|
| CH1 | 0,58884 |
| CH2 | 2,34423 |
| CH3 | 0,40272 |

Pri niektorých otáčkach FTT analýza vykazuje odozvu na hnacom bubne od prevodovky.

Pohon potrebuje prekonať odpory v prstencových valčekových stoliciach. V našom prípade je ich počet šesť. Tiež počas prevádzky potrubného dopravníka dochádza ku náhodnému otvoreniu pásu v prstencových valčekových stoliciach.

Rozdielne hodnoty vibračnej rýchlosti v troch na seba kolmých osiach identifikujú smer, v ktorom je monitorovaný prvok počas svojej činnosti najviac zaťažený kmitmi. Je to smer pohybu dopravného pásu potrubného dopravníka.

## 6 Záver

Súčasná generácia meracej aparatúry určená na monitorovanie vibrácií otvára nové možnosti na poli prevádzkovania dopravnej techniky.

Skúmaním možnosti aplikácie merania vibrácií v laboratórnych podmienkach na funkčnom modeli potrubného dopravníka umožní získanie cenných poznatkov o správaní sa tohto druhu “kinematickej sústavy”, ktoré neskôr bude možné s nemalým ekonomickým úžitkom etablovať do reálnej prevádzky v náročných banských podmienkach.

Analýza zobrazuje súčinnosť medzi zvukovým výkonom a vibráciami pohonu počas určitého zvoleného časového obdobia.

V budúcom výskume sa zameriame na komplexné meranie, t.j. súčasne na viacerých miestach potrubného dopravníka, aby sme lepšie pochopili správanie celého systému, meranie pri zaťaženom stave potrubného dopravníka a verifikáciu s podrobnou dynamickou analýzou.

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantových projektov APVV-23-0342, APVV SK-PL-23-0052 a KEGA 013TUKE-4/2023.

**Literatura:**

[1] Moravič, M. 2016. Zmena tuhosti ako prostriedok eliminácie nebezpečných vibrácií. In: *Novus Scientia 2016*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, s. 125-128. ISBN 978-80-553-2495-1

[2] ČSN ISO 20816-1:2016, Vibrace - Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 1: Obecné pokyny

[3] Andrejiová, M., Grinčová, A., Marasová D. and P. Grendel. 2015. *Multicriterial assessment of the raw material transport*. Acta Montanistica Slovaca, 20(1), 26-32. https://doi.org/10.3390/ams20010026

[4] Łazarz, B., Wojnar, G. and P. Czech. 2011. Early fault detection of toothed gear in exploitation conditions, Eksploatacja i Niezawodnosc - *Maintenance and Reliability*, 49(1), 68-77

[5] Klub ZPS vo vibroakustike, s.r.o., Ing. Ján Šimo, CSc. Dostupné na internete: https://www.vibroakustika.sk

# ŘEŠENÍ VYSOKÉHO THD FAKTORU SPOJENÉHO S OTEPLENÍM VÝVODNÍCH VODIČŮ SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU

**Petr NAHODIL**, ELVITED-NAHODIL, Lomnice [1]

**Anotace:**

Nulové proudy třetí harmonické mohou být vytvářeny jak generátory, tak také transformátory a spotřebiči v síti. Fázová napětí generátorů mají hlavně výraznou 3. harmonickou frekvenci sítě. Uzemní-li se nulový bod generátoru, mohou protékat vyrovnávací proudy 3. harmonické. To stejné platí také pro spotřebiče v síti (např. transformátory). Tento jev pak velmi nepříznivě působí na oteplení jak generátoru, tak vodičů, dále způsobuje silné zkreslení sinusového průběhu síťové frekvence.

## 1 Úvod

V mnoha případech, zvláště pak u synchronních generátorů nízkého napětí, se setkáváme s problémem přehřívání vývodních vodičů z vinutí generátoru a také připojovacích vodičů generátoru. Tento článek popisuje důvody tohoto problému a naznačuje možné řešení. Synchronní nízkonapěťové generátory známé také jako synchronní alternátory jsou základními prvky pro výrobu elektrické energie v mnoha elektrárnách, například v malých vodních elektrárnách na vodních tocích. Tyto generátory produkují střídavý elektrický proud, jehož frekvence je synchronizována s kmitočtem otáčení rotoru generátoru. V praxi však dochází ke vzniku nežádoucích harmonických frekvencí, které mohou ovlivnit kvalitu elektrické energie a výkon celého systému. Jedním z těchto harmonických je třetí harmonická frekvence, jejíž vznik má specifické příčiny a dopady.

## 2 Co jsou harmonické frekvence

Harmonické frekvence jsou vyšší frekvence, které jsou násobky základní frekvence (fundamentální frekvence) generátoru. Například u generátoru s kmitočtem 50 Hz může být třetí harmonická frekvence 150 Hz (3 x 50 Hz). Tyto harmonické komponenty nejsou žádoucí, protože mohou způsobit různé problémy v elektrických rozvodech, jako je zhoršení účinnosti, zvýšení ztrát nebo poškození zařízení.

## 3 Příčiny vzniku třetí harmonické frekvence

Třetí harmonická frekvence se u synchronních generátorů objevuje z několika důvodů. Mezi hlavní patří:

- **Nelineární charakteristika zátěže**: Nejčastější příčinou vzniku harmonických je nelineární chování elektrických zařízení, jako jsou usměrňovače, měniče nebo

[1] Ing. Petr Nahodil, Ph.D., CTD
ELVITED - Ing. Petr Nahodil
Tišnovská 6, 679 23 Lomnice
tel.: +420 737 275 354, e-mail: elvited@seznam.cz, https://elvited.webnode.cz/

zátěže s nízkým výkonovým faktorem. Tyto zátěže, které se obvykle používají v průmyslových aplikacích, mohou způsobit deformaci křivky proudu, což vede k tvorbě harmonických frekvencí.

- **Nesymetrie napájecího systému**: Pokud je v systému přítomna asymetrie, například v napětí nebo v konfiguraci fází, může to vyústit ve vznik harmonických frekvencí. Synchronní generátory jsou citlivé na změny v symetrii napětí, a i malé odchylky mohou vést k vyšším harmonickým.
- **Vlastnosti rotorového vinutí**: U generátorů s konkrétními konstrukčními vlastnostmi, jako je typ vinutí rotoru, může docházet k tvorbě třetí harmonické frekvence. U některých typů generátorů, zejména u těch s vyššími stupni výkonu, mohou být harmonické generovány přímo v samotném stroji.
- **Interakce mezi generátorem a systémem**: Při provozu generátoru v síti může docházet k interakcím mezi synchronním generátorem a zbytkem elektrické sítě, což vede k vzniku nežádoucích harmonických. Tato interakce je obzvláště významná při připojení generátorů s nelineárními zátěžemi k systému, zvláště pak pokud je generátor napojen na transformátor.

## 4 Důsledky přítomnosti třetí harmonické frekvence

Třetí harmonická frekvence, stejně jako ostatní harmonické, má několik negativních důsledků pro celý elektrický systém:

- **Zvýšení ztrát v transformátorech a vodičích**: Harmonické proudy mohou způsobit vyšší ztráty v transformátorech, kabelech a jiných elektrických zařízeních. To vede ke snížení celkové účinnosti a zvýšeným nákladům na energii.
- **Zkreslení napětí**: Třetí harmonická může způsobit zkreslení napětí, což má negativní vliv na zařízení citlivá na kvalitu napájecího napětí, jako jsou počítače, citlivé měřicí přístroje nebo telekomunikační zařízení.
- **Vyšší teploty a vibrace**: Vysoký obsah harmonických frekvencí může způsobit vyšší teploty a vibrace v elektromotorech a dalších zařízeních, což vede k jejich předčasnému opotřebení a selhání.
- **Omezení výkonu generátoru**: U synchronních generátorů může přítomnost harmonických vést k omezení jejich maximálního výkonu, protože harmonické mohou ovlivnit stabilitu a účinnost generátoru.

Obr.1 Tepelné ovlivnění vývodních kabelů

Obr.2 Tepelné ovlivnění vývodních kabelů - snímek termokamery

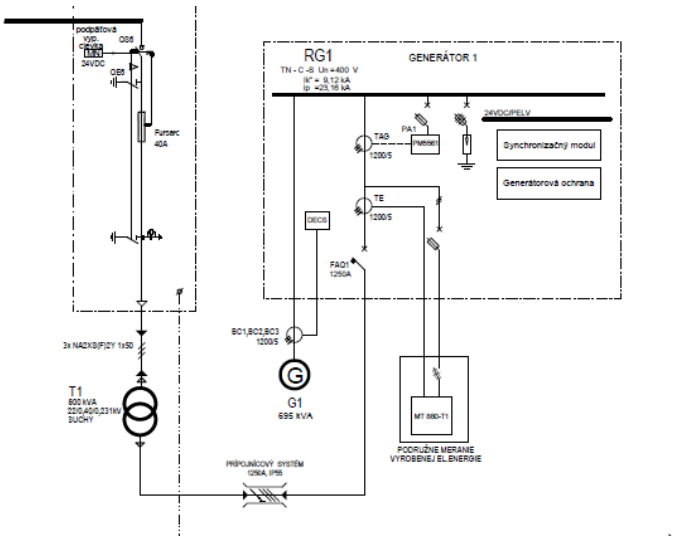
## 5 Prevence a odstranění třetí harmonické frekvence

Existují různé metody, jak minimalizovat nebo odstranit vliv třetí harmonické frekvence na elektrický systém:

- **Filtrace harmonických**: Použití filtrů, jako jsou pasivní nebo aktivní filtry harmonických, může efektivně odstranit třetí harmonickou a další harmonické frekvence z napájecího systému.
- **Použití transformátorů se speciálním vinutím**: Transformátory s usměrněným vinutím nebo trojfázovými transformátory s deltovým zapojením mohou pomoci redukovat harmonické frekvence v systému.
- **Správné dimenzování a volba zátěží**: Při navrhování systému je důležité brát v úvahu typ zátěže a zajistit, že použitá zařízení nebudou generovat vysoký obsah harmonických. To může zahrnovat i volbu zátěží, které mají lineární charakteristiky.
- **Použití synchronních generátorů s nižšími harmonickými**: Moderní generátory mohou být navrženy tak, aby produkovaly menší množství harmonických. Využití nových technologií a konstrukcí generátorů může výrazně snížit vliv těchto frekvencí.

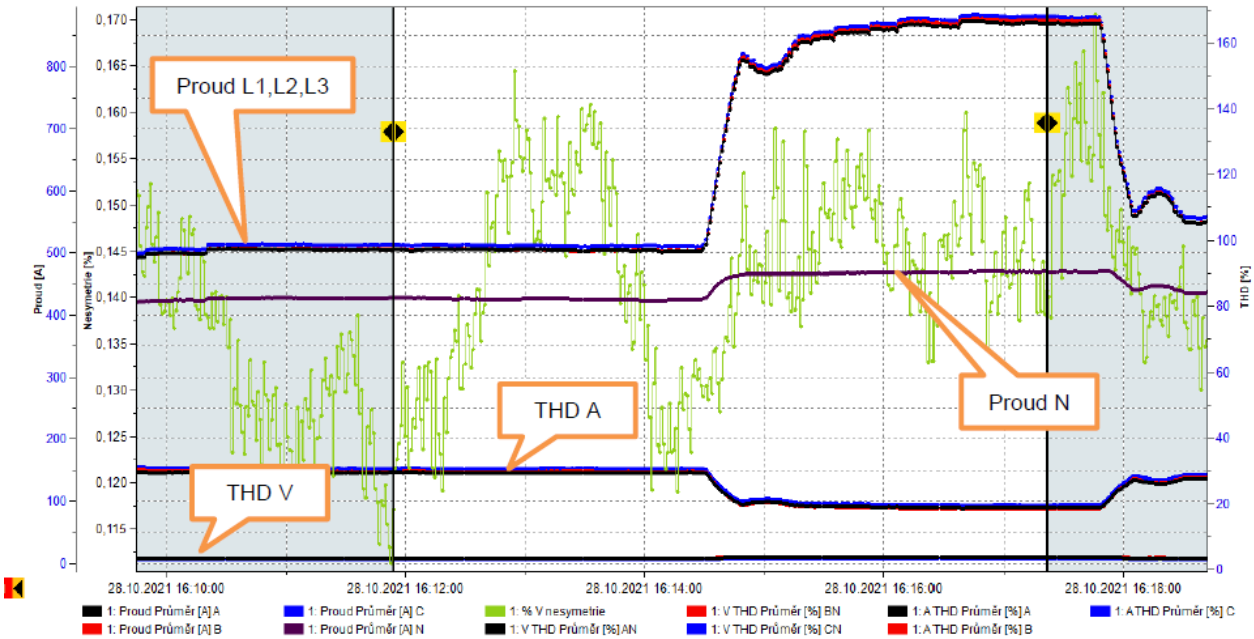
## 6 Diagnostika generátoru

Jako příklad je zde uvedena diagnostika synchronního generátoru malé vodní elektrárny nízkého napětí 400 V o výkonu 450 kVA zapojený do hvězdy a spojen s transformátorem 0,4kVY/22kVD, viz následující schéma na obr.3.



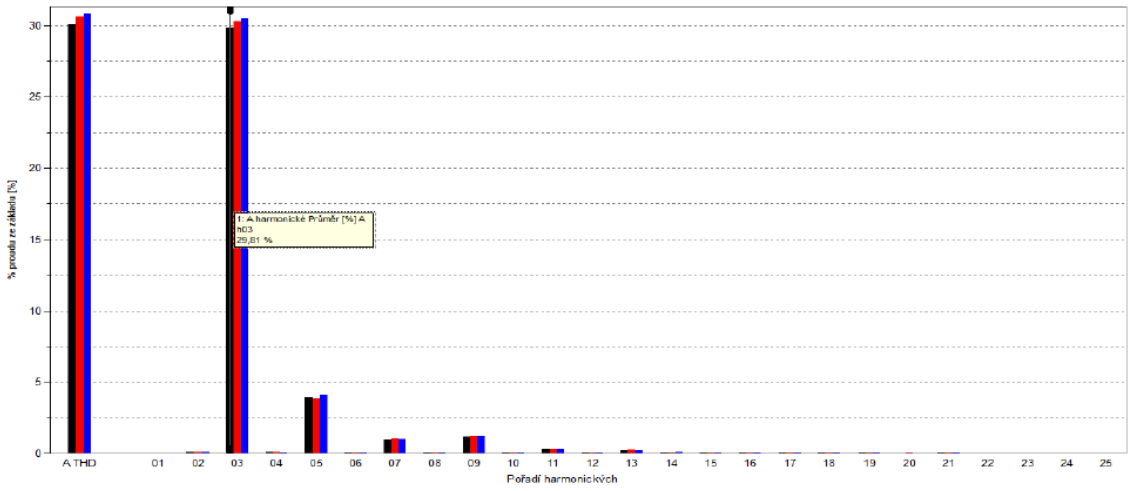

Obr.3 Schéma zapojení generátoru s transformátorem

Ve svorkovnici generátoru byla provedena analýza proudu, výsledky diagnostiky jsou popsány v následujících krocích.



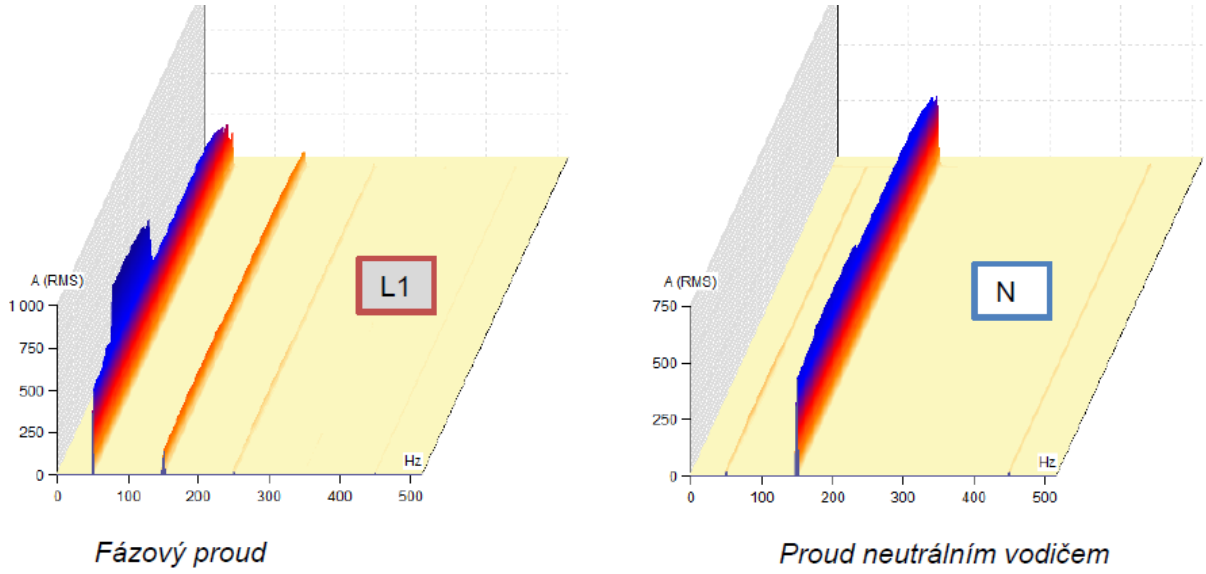

Obr.4 Záznam proudu ve fázových vodičích, v nulovém vodiči a napěťového a proudového faktoru zkreslení THD

Z obrázku 4 vyplývá poměr mezi prouden v jednotlivých fázích a v neutrálním (nulovém) vodiči. Z grafu je zřejmé, že proudový faktor zkreslení THDa dosahuje hodnot 30%, což je velmi vysoká hodnota podílu vyšších harmonických složek proudu, viz obr.5.




Obr.5 Podíl harmonických složek ve fázovém proudu

Pokud provedeme frekvenční a časovou analýzu proudu, je vidět, že ve fázovém proudu je velký podíl 3x harmonického násobku 150 Hz a v nulovém vodiči dominuje především tento 3x harmonický násobek 150 Hz (obr.6), jako součet třetích harmonických ve fázích.

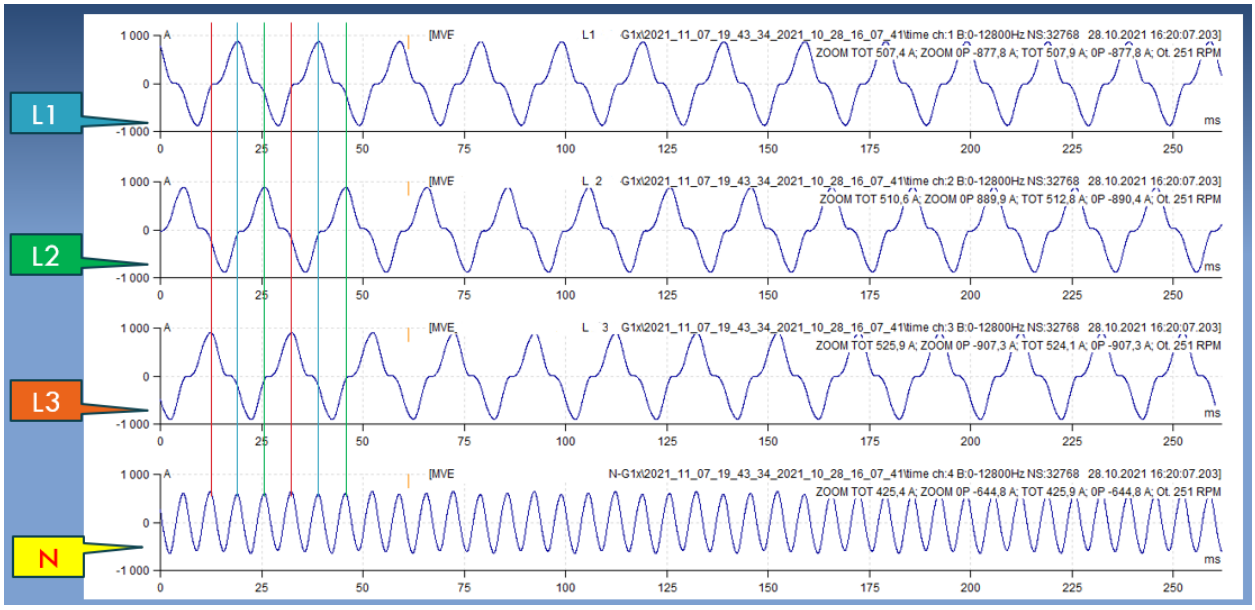



Obr.6 Frekvenční spektrum neutrálního a fázového vodiče

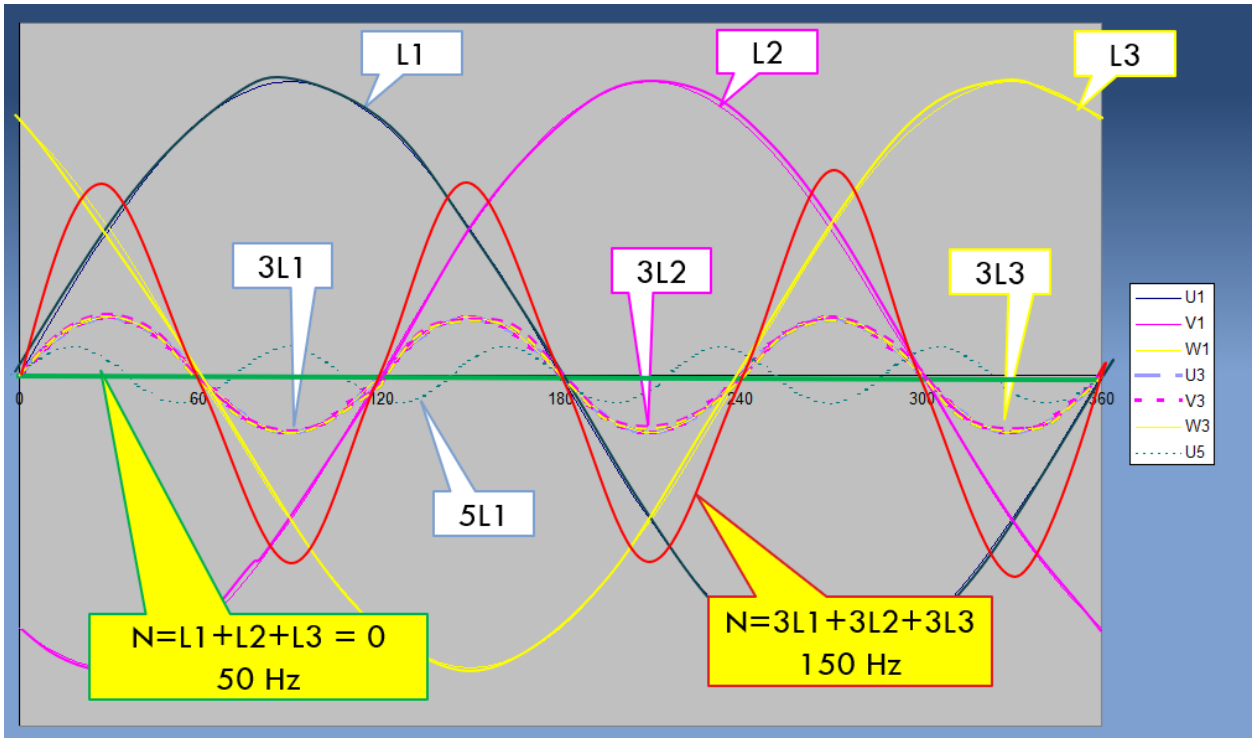
Z grafů na obrázku 7 je vidět zkreslení sinusového průběhu fázového proudu 3x harmonickým násobkem. V nulovém vodiči je vidět sinusový průběh o frekvenci 150 Hz.

Pokud vektorově sečteme amplitudy o frekvenci sítě 50 Hz ze všech třech fází, jejich součet je nulový. Při symetrickém zatížení pak nulovým vodičem neprotéká žádný proud. Pokud však máme nelineární zatížení (i když symetrické vzhledem k jednotlivým fázím), může nám vzniknou 3x harmonický násobek v proudu. Pokud sečteme amplitudy těchto 3x harmonických násobků o frekvenci 150 Hz, jejich amplitudy se nevyruší, ale

sčítají se a v nulovém vodiči nám poteče proud daný součtem těchto hodnot o frekvenci 150 Hz viz obr.8. To nám způsobuje, že 3x harmonický násobek zatěžuje vedení fázových vodičů a dále pak neúměrně zatěžuje nulový vodič, což má nepříznivý vliv na oteplení, ztráty, a i životnost dotčených součástí systému.

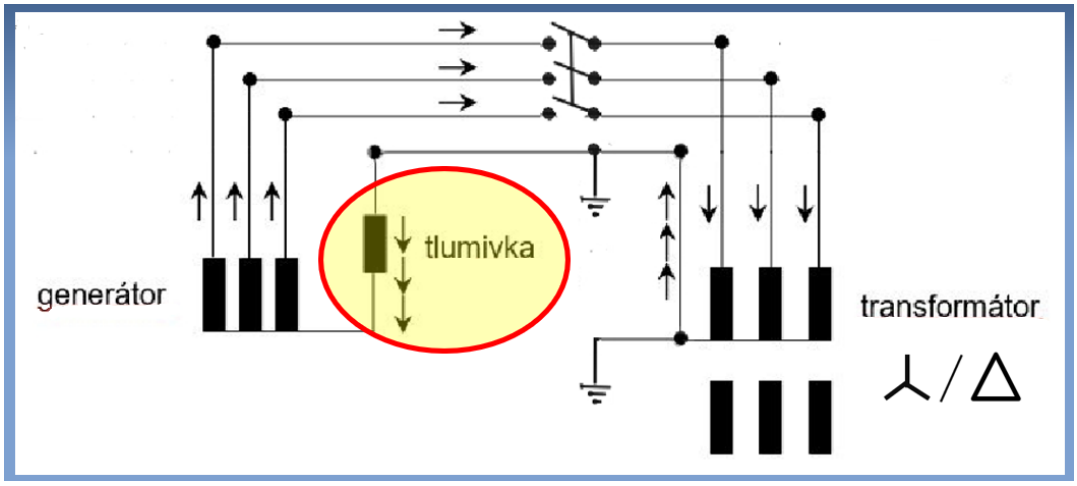



Obr.7 Schéma zapojení generátoru s transformátorem




Obr.8 Sinusový průběh 1x a 3x harmonického násobku

Zapojí-li se ve čtyřvodičové síti generátor se svými třemi fázovými vodiči (U, V, W) a s nulovým vodičem (N), vznikají napětí vyšších harmonických 150 Hz a proudy tekoucí přes fázové vodiče ke spotřebičům zapojených do hvězdy (např. transformátory). Tam se tyto proudy vyšších harmonických stejné fáze sčítají v jeden nulový proud značné velikosti. Tento 150 Hz nulový proud můžeme potlačit zařazením nulové tlumivky do obvodu nulového (neutrálního) vodiče (obr.9). Pro dimenzování tlumivky je potřeba zohlednit výkon generátoru a maximální proud fázových vodičů.




Obr.9 Zařazení tlumivky do obvodu mezi generátor a transformátor

Cívka tlumivky je dimenzována tak, aby nevyvolala v oblasti 50 Hz při zatížení 10% jmenovitého proudu generátoru v důsledku asymetrického zatížení fází žádné snížení napětí větší než 5% fázového napětí generátoru (při 231 V tedy UD = 11,5 V). To by vyvolalo vychýlení nulového bodu u nesymetrického zatížení. Lineární oblast magnetické charakteristiky přitom dosahuje až 15% jmenovitého proudu generátoru. Navíc dojde ke zlomení magnetické charakteristiky, takže se už neutlumí zkratové proudy. Toto chování je nutné pro bezpečné odpojení u jednopólových poruch. Vinutí nulových tlumivek je dimenzováno na schopnost dlouhodobě vést proud ve výši 90% proudu generátoru a dimenzování se provede podle jmenovitého výkonu generátoru.

Obr.10 Namontovaná tlumivka na neutrálním vodiči v generátoru

Dalším možným opatřením je mít objednaný generátor se speciálně upraveným vinutím s 2/3 krokem. To však již nelze, pokud generátor je již osazen, nebo řešíme již vzniklý problém se zatížením vodičů 3x harmonickým násobkem. Při použití generátoru s 2/3 krokem zcela potlačíme vznik 3x harmonických násobků, ale musíme počítat s nižší účinností a menším výkonem. Z toho důvodu se již s tímto opatřením musí počítat v projektu a generátor s 2/3 krokem na požadovaný výkon objednat.

## 7 Závěr

Třetí harmonická frekvence, stejně jako ostatní harmonické složky, představuje vážný problém pro kvalitu elektrické energie a spolehlivost zařízení. Je důležité nejen identifikovat příčiny jejího vzniku, ale i implementovat opatření k jejímu snížení, a to jak na úrovni generátorů, tak na úrovni celého elektrického systému. Zajištění kvalitní a stabilní dodávky energie je klíčové pro efektivní fungování všech typů elektrických zařízení a systémů.

**Literatura:**


[1] Weedy, B. M. and Cory, B. J. *Electric Power Systems*. John Wiley & Sons, England 1998, ISBN 0-471-97677-6

[2] IEEE Std 519-2014: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems

# DIAGNOSTIKA POMALUBĚŽNÝCH LOŽISEK A LINEÁRNÍCH VEDENÍ

# DIAGNOSIS OF LOW-SPEED BEARINGS AND LINEAR GUIDE

**Jan OTOUPALÍK**, 4dot Mechatronic Systems, s.r.o., Brno [1]

**Anotace:**

Příspěvek se bude zabývat reálnými ukázkami monitorování pomaluběžných aplikací pomocí patentovaných MUSA analýz, které využívají simultánního zpracování signálu z více senzorů. Budou také popsány vhodné aplikace pro nasazení, specifika provozů, specifika zpracování a vyhodnocení dat při tomto způsobu monitorování.

**Annotation:**

This article will discuss real-world examples of monitoring low-speed applications using patented MUSA analyses that use simultaneous signal processing from multiple sensors. Suitable applications for deployment, specifics of operations, data processing and evaluation in this monitoring method will also be described.

## 1 Úvod

Diagnostika pomaloběžných ložisek a lineárních vedení je ve 4dot založena na MUSA analýzách, které využívají simultánního zpracování signálu z více senzorů. MUSA (MUlti Sensor Algorithms) analýzy byly poprvé použity pro monitorování geometrie broušení ložiskového kroužku, následně monitorování valivých ložisek kovacích lisů, dále analýzy byly rozvíjeny převážně pro nerotační stroje, kde jsou použity pro sledování rámů, kontrolu nástrojů nebo monitorování výrobního procesu. Hlavními výhodami MUSA analýz je, že neexistuje omezení otáčkami a jdou nasadit také do prostředí, kde je velký šum od výrobního procesu.

Patenty chránící MUSA analýzy byly podány v roce 2018, dnes je tato technologie chráněna v Evropě, USA a Indii. Technologie byla uvedena na trh v roce 2020, uvedení bylo však pozastaveno opatřeními spojenými s covidem, v praxi se k novým uživatelům tato technologie začala dostávat až po pandemii.

## 2 Vhodné aplikace

Popisovaná technologie není omezená rozsahem otáček a může být použita také na nerotační stroje. Má však jiná specifika, která způsobují, že se například nepřekrývá s pochůzkovou diagnostikou. Jedním ze specifik je, že MUSA analýzy se ve většině případů upravují pro potřeby daného stroje. MUSA analýzy tak nacházejí uplatnění v provozech s nízkými otáčkami a vysokým šumem od výrobního procesu. V obou

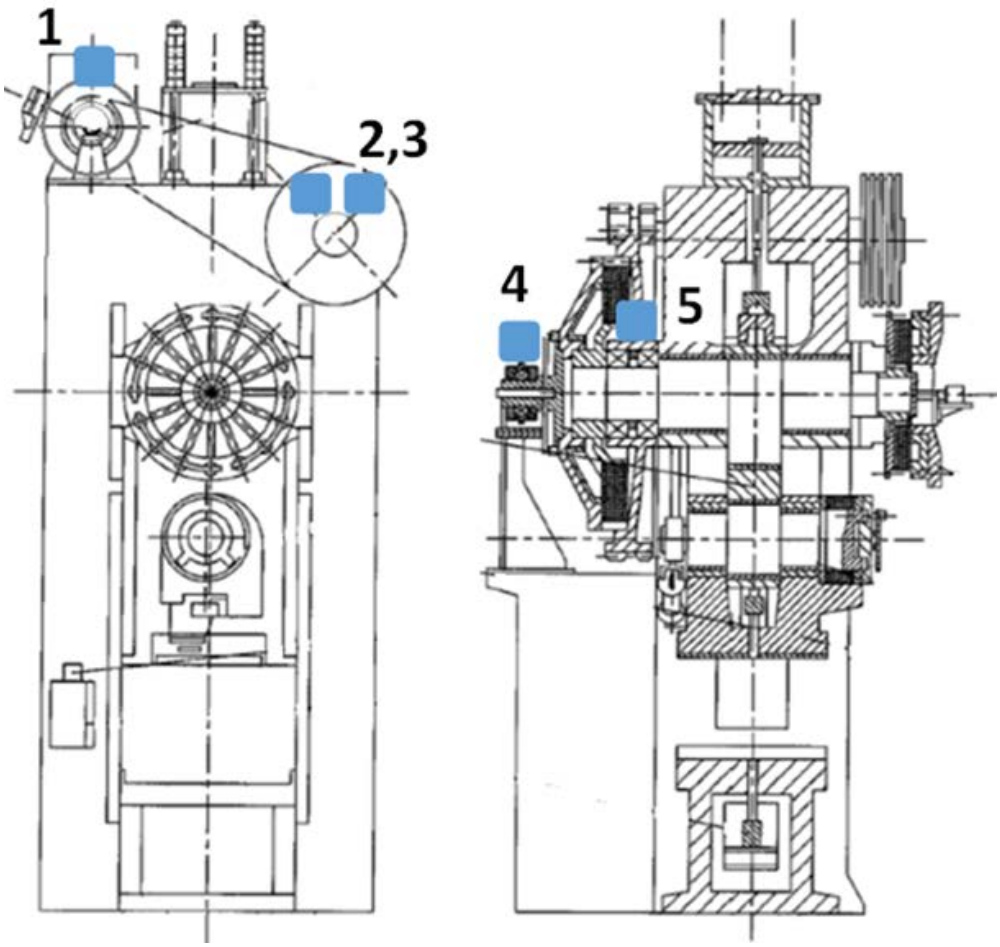
[1] Ing. Jan Otoupalík
4dot Mechatronic Systems, s.r.o.
Polní 780/92, 639 00 Brno
mobil: +420 778 455 090, +420 602 284 505, e-mail: jan.otoupalik@4dot.cz, http://www.4dot.cz/cz

případech analýza umí dobře oddělit signál od šumu i v situacích, kdy procesní šum převyšuje signál například u poškozeného ložiska. Sledování ložisek pomocí MUSA analýz jde nasadit i na nepřímo sledovaná ložiska, tedy případy, kdy nejde senzor umístit přímo na uložení ložiska, například ve spojce lisu.

Dalším specifikem je, že pro automatické zpracování a vyhodnocování je třeba velké množství dat, bavíme se tedy o desítkách až stovkách GB za měsíc. Jedná se tedy o online zpracování, které probíhá na serverech 4dot nebo ve specifických případech přímo na monitorovací jednotce. Monitorovací jednotka je průmyslový počítač zajištující sběr a zpracování dat. Z výše uvedeného také plyne, že nasazení je vhodné na aplikace, kde je dostupné připojení k internetu.

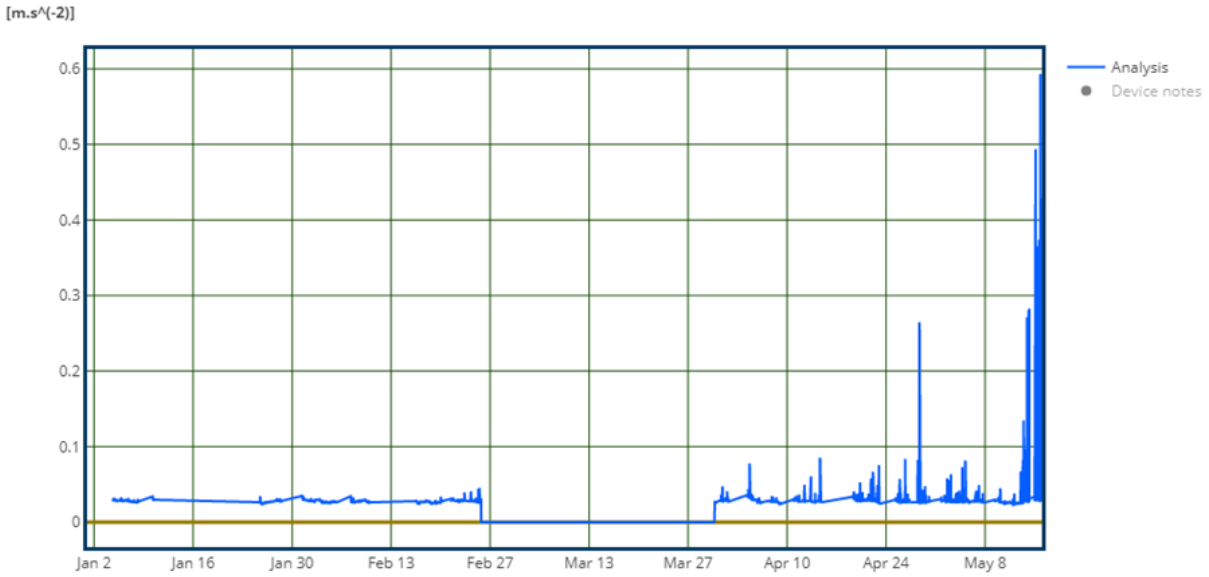
## 3 Sledování pomaloběžných ložisek kovacího lisu

Jednou z aplikací, kde 4dot poprvé nasadilo MUSA analýzy, je sledování valivých ložisek lisů. Tato aplikace se vyznačuje jak relativně pomaloběžnými ložisky a vysokým šumem od procesu, tak i nepřímým sledováním ložiska ve spojce. U ložiska ve spojce se otáčí vnitřní i vnější kroužek a nejde na toto ložisko přímo umístit senzor a kabel. Ukázka rozmístění monitorovaných ložisek na lisu je na obrázku 1.




Obr.1 Sledovaná ložiska klikového kovacího lisu konstrukce firmy Šmeral. 1 - ložiska motoru (běžné otáčky motoru), 2, 3 - ložiska předlohy (300 $min^{-1}$), 4 - pomocné ložisko (60 $min^{-1}$), 5 - ložiska spojky, nepřímo sledovaná přes senzor na pomocném ložisku (60 $min^{-1}$)

Obr.2 Záznam kondice předlohy od ustáleného stavu po výměnu ložiska; na svislé ose je teplota ve °C pro modrou křivku a kondice ložiska v $ms^{-2}$ pro fialovou křivku [2]




Obr.3 Záznam kondice ložiska spojky od dobré kondice po rozvoj poruchy; jedná se o nepřímo sledované ložisko ve spojce lisu

## 4 Sledování lineárních vedení

Z pohledu MUSA analýz je lineární vedení stejné jako pomaloběžné ložisko neboli pomaloběžné ložisko se sleduje stejně jako nerotační zařízení. Již bylo zmíněno, že nasazení MUSA analýz není omezeno otáčkami ani způsobem pohybu. Implementace a způsob sledování jsou také podobné. Pro nastavení MUSA analýz je třeba mít na stroji více senzorů, z hlediska analýzy je jeden hlavní a další jsou pomocné. Hlavní senzor se umisťuje poblíž sledováno uzlu, a není třeba jej za každou cenu dát co nejblíže. Pomocné senzory jsou rozmístěny dle konkrétní aplikace, tak, aby byly splněny požadavky na zpracování MUSA analýz.

Na obrázku 4 je umístění hlavního senzoru pro monitorování lineárního vedení na svařovací lince. Na obrázku 5 je detekce poškození pomocného ložiska na lineárním vedení. Z hlediska monitorování šlo o nepřímo sledované ložisko, vzdálené několik metrů od nejbližšího senzoru. Díky způsobu sběru, zpracování dat a MUSA analýzám šlo dobře odlišit problém a najít poškozené ložisko.

Obr.4 Umístění hlavního senzoru vibrací na lineárním vedením svařovací linky karoserií osobních aut

Obr.5 Detekce poškození pomocného ložiska při monitorování lineárního vedení

## 5 Závěr

MUSA analýzy jsou vhodné pro aplikace, kde běžné pochůzkové nebo online systémy neposkytují potřebné množství informací pro řízení údržby a zajištění výroby. Sledovat ložiska, ale i jiné části strojů, je možno i nepřímo pomocí senzorů, které nejsou přímo na sledovaném dílu. Nasazení nebrání ani vysoký šum od procesu nebo okolních strojů. Pomocí MUSA analýz jde například sledovat také valivá ložiska kovacího mechanického lisu, kde vyhodnocování neovlivní rázy od procesu ani chodu stroje.

**Literatura:**


[1] Otoupalík J. and J. Burian. *Diagnostic system of machines*. US 11,543,329 B2. 3. 1. 2023

[2] Otoupalík J. a J. Burian. Implementace technické diagnostiky a procesního monitoringu - zpracování, vyhodnocení a předávání dat. In *Kovárenství číslo 81*. Ostrava 2024

# THE IMPACT OF ROAD TRANSPORT ON AIR POLLUTION

**Martin PAUMER,** Slovak university of Agriculture in Nitra [1]
**Michal LOMAN,** University of Zilina [2]
**Ján KOSIBA,** Slovak university of Agriculture in Nitra [3]
**Martin NAGY**, Slovak university of Agriculture in Nitra [4]

**Annotation:**

Currently, air pollution is becoming an important, but often overlooked problem, which results not only in short-term health complications, but also in long-term respiratory problems. One of the main sources of this pollution is road transport. The efforts of the European Union and the Slovak Republic are aimed at reducing greenhouse gas emissions and looking for sustainable alternatives. To improve air quality, it is crucial to identify the main sources and problem areas of pollution. Monitoring using air pollution measuring stations is one of the ways to ensure compliance with the set values. The aim of this study is to analyze the current location of measuring stations monitoring air quality in the context of road transport. The main focus of the paper is to point out the excessive air pollution with particulate matters $PM_{2.5}$ and $PM_{10}$, which is caused by heavy road transport. The analytical part of the research was carried out at 11 selected locations in the territory of the Slovak Republic. The results show an increased concentration of particulate matters in areas with a high volume of freight traffic. As part of the nationwide monitoring system, it was possible to identify places that suffer from a frequent decrease in air quality.

## 1 Introduction

A pollutant is any substance caused directly or indirectly by human activity that is released into the air and has or may have harmful effects on human health or the environment. According to the World Health Organization, PM (Particulate Matter) was responsible for 3 million premature deaths worldwide in 2016 (World Health Organization, 2016).

Particulate matter are secondary, that is, they are formed in the atmosphere from precursor gases through chemical reactions and microphysical processes, as stated by Calvo et al. (2013).

Khan et al. (2018) and Schibuola et al. (2020) found in their research the state of PM pollution, which in most cases exceeded the global air quality guidelines. For this

[1] Ing. Martin Paumer
Slovak university of Agriculture in Nitra, Faculty of Engineering
Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra, Slovak Republic
tel.: +421 37 641 5776, e-mail: xpaumer@uniag.sk
[2] Ing. Michal Loman, PhD.
University of Zilina, Faculty of Operation and Economics of Transport and Commencartions
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovak Republic
tel.: +421 41 513 3503, e-mail: michal.loman@uniza.sk
[3] doc. Ing. Ján Kosiba, PhD.
Slovak university of Agriculture in Nitra, Faculty of Engineering
tel.: +421 37 641 5400, e-mail: jan.kosiba@uniag.sk
[4] Ing. Martin Nagy
Slovak university of Agriculture in Nitra, Faculty of Engineering
tel.: +421 37 641 5774, e-mail: xnagy@uniag.sk

reason, air quality has become an important measure of the quality of life in cities and industrial areas.

The results of recent studies Fenger (2009) have found that air quality in cities has deteriorated due to the increasing concentration of human activities that produce polluting emissions. The main cause of current air pollution is mainly emissions from household heating and emissions from transport. Studies Kendrick et al. (2015) and Anjum et al. (2021) have shown that particulate matter and nitrogen oxides contribute to excessive pollution. Their increased concentration is particularly observable in metropolitan areas with an extreme number of cars. According to Graham et al. (2020), in such environmental conditions, pollutants begin to accumulate, especially particulate matter $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$. These are very small particles that are hardly visible to the naked eye. Particulate matter from city roads contains toxic metals and act as carriers of pollutants released into the air as well as carcinogens, which pose a potential risk to human health as stated in the studies Zeng et al. (2020) and Dietrich et al. (2019). When investigating the concentration of particulate matter, size is important. A study by Schneider et al. points to the formation and impact of particles smaller than 1 μm in metropolitan areas. Particles that are larger than $PM_{10}$ are already filtered out in the nasal cavity and do not pose a considerable risk to human health. However, smaller particles ($PM_{2,5}$) penetrate the larynx and lower respiratory tract, subsequently settling in the bronchi. Because of their small sizes, $PM_{2.5}$ particles can remain in the air for days after being emitted or formed in the atmosphere and can be transported long distances from their source, state in the studies Turner et al. (2020), Ali et al. (2019) and Prospero et al. (2003). According to the World Health Organization, PM was responsible for 3 million premature deaths worldwide in 2016. Decreasing $PM_{2.5}$ levels by 10 $\mu g.m^{-3}$ could increase life expectancy by 0.61 years, Héroux et al. (2015). Moreover, the results of studies Bell et al. (2014) and Mar et al. (2004) have shown a significant positive association between the quantities of $PM_{2.5}$ in road dust and the frequency of hospitalization due to cardiovascular and respiratory complications.

The article evaluates the data provided by the Slovak Hydrometeorological Institute (SHMÚ), the only institution in the Slovak Republic that deals with air quality monitoring and assessment.

## 2 Assessment and measurement of air pollution

The main target in air quality is to maintain or improve air quality in places where the measurement results are good, and in other cases to improve air quality. The territory of the Slovak Republic is divided into agglomerations and zones for the purpose of air quality assessment. These zones and agglomerations form large territories and cover the entire territory of Slovakia. The distribution of pollutants in each zone is relatively variable, i.e. it contains territories with significant sources of emissions and degraded air quality, but also relatively clean areas without sources. The selected type of air quality assessment in agglomerations and zones is reviewed by the Ministry, or in the case of an authorized organization, at least once every five years.

The national air quality monitoring network consists of 52 automatic monitoring stations, of which 3 are mobile stations, namely Rovinka, Ivanka pri Dunaji and Hencovce.

Fig.1 Location of air pollution monitoring stations in Slovakia (SHMÚ, 2022)

The urban monitoring station should be located in a place where the level of pollution is affected by all sources. In addition, the stations should be located in places where there is no obstacle to the flow of air from any direction. When determining the height of the location of the monitoring station, the meteorological conditions of the area, such as wind speed and direction, are taken into account. Measurements at these stations should present the air quality in several square kilometres or in a certain radius determined by the station. PM - $PM_{10}$ - $PM_{2.5}$ are droplets or fine particles with an aerodynamic diameter of less than 10 μm or 2.5 μm. PM concentration is influenced by natural sources, regional anthropogenic sources, long-range transport and numerous local anthropogenic sources. The regional background of pollution in cities is mainly increased by transport, diesel engines, industry, household heating and other sources. The following figure describes the development of PM particles in Slovakia.

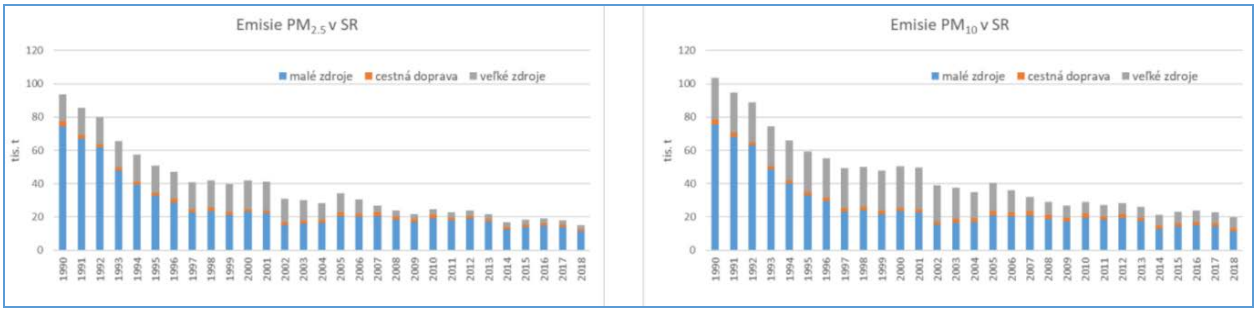



Fig.2 Emissions of $PM_{10}$, $PM_{2.5}$ in SR in the period 1990 - 2018

There are particles in the air from several sources and there is a mixing of inputs from different sources. We can identify the origin of a particle by its size, shape and chemical composition.

The toxicity and danger of PM particles increases in direct proportion as their size decreases. From the point of view of impact on health, fine particulate matter and ozone are considered to be very unfavorable. Long-term exposure to these substances at high levels can lead to numerous health effects, from minor irritations of the respiratory system to premature death.

According to Act no. 137/2010 Coll. on air, SHMÚ monitors basic pollutants. Every year SHMÚ publishes yearbooks in which it reports on air quality and its sources in the Slovak Republic, as well as a complete analysis of air pollution and its development in a given period. SHMÚ also publishes monthly reports in which it describes the average concentrations of pollutants for specific days of the month and compares them with measurements from previous years or months. Current information on air quality is published on the SHMÚ website, which, however, is only informative, as it is not immediately evaluated. The data is checked and evaluated based on the technical parameters of the device the next working day in the morning. The following table shows PM values with respect to air quality. (SHMÚ, 2022)

Tab.1 SHMÚ air quality assessment (SHMÚ, 2024)

| Air quality evaluated according to Slovak Hydrometeorological Institute [$\mu g.m^{-3}$] | | |
|---|---|---|
| Quality level | $PM_{2.5}$ | $PM_{10}$ |
| very good | 0 - 14 | 0 -20 |
| good | 14 - 25 | 20 - 40 |
| worse | 25 - 70 | 40 - 100 |
| bad | 70 - 140 | 100 - 180 |
| very bad | > 140 | > 180 |

## 3 Methodology

The data for the years 2019, 2020, 2021 provided by SHMÚ were analyzed. The data consists of measured hourly average values for the following pollutants: $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$. The measured values were measured at the stations in the period from 1/1/2019 0:00 a.m. until 31/12/2021 12:00 p.m. We focused on data from stations where the PM level can influence the share of freight traffic: Malacky (MA) - Mierové námestie, Bratislava (BA) - Trnavské mýto, Trnava (TT) - Kollárová, Trenčín (TN) - Hasičská, Nitra (NR) - Štúrova, Banská Bystrica (BB) - Štefánikovo nábrežie, Martin (MT) - Jesenského, Košice (KE) - Štefánikova, Prešov (PO) - Armádneho generála L. Svobodu, Krompachy (KR) - SNP, Senica (SE) - Hviezdoslavova.

The total share of emissions from transport is high, especially in the case of NOx, but the direct impact on NOx and PM concentrations is mainly in close proximity to roads. The exception is big cities, where roads and traffic intensity are often concentrated in a small area of the centers, where pollution can accumulate. We obtained traffic data from the Slovak Road Administration (SSC) and the strategic plan for the development of transport in the Slovak Republic. Finally, average monthly, annual PM concentrations, exceeded values and proportions of freight traffic were compared. Based on the results of the analysis, the pollution by PM particles in the monitored cities was compared and evaluated.

## 4 Measurement results

Emissions from road transport and from small sources (household heating) are mostly released near the breathing zone (i.e. relatively low above the ground, as family houses have chimneys lower than industrial sources or power plants), therefore they have an impact on the exposure of residents, especially near residences. The following figures show average monthly PM concentrations. Low temperatures during the heating season

result in higher demands for heat production for household heating, associated with higher PM emissions, while the situation is complicated by the frequent occurrence of temperature inversions in winter, especially in mountain valleys. This fact can also be seen in Figures 4 ÷ 6, where PM reached the highest values in the winter months (December, January, February), especially in stations located in mountain valleys such as Martin, Krompachy and Banská Bystrica.

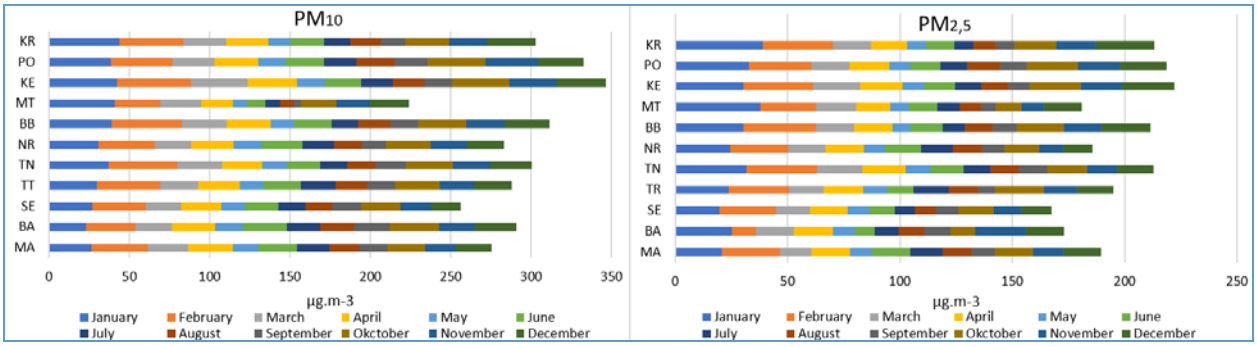



Fig.3 Average monthly concentrations of PM in monitored stations in 2019

In Figure 3, we follow the development of PM concentration during the year 2019. In this period, the highest concentration values in both cases were recorded for the Košice station, followed by the Prešov and Krompachy stations. Conversely, the smallest values were recorded at the Martin and Senica stations.

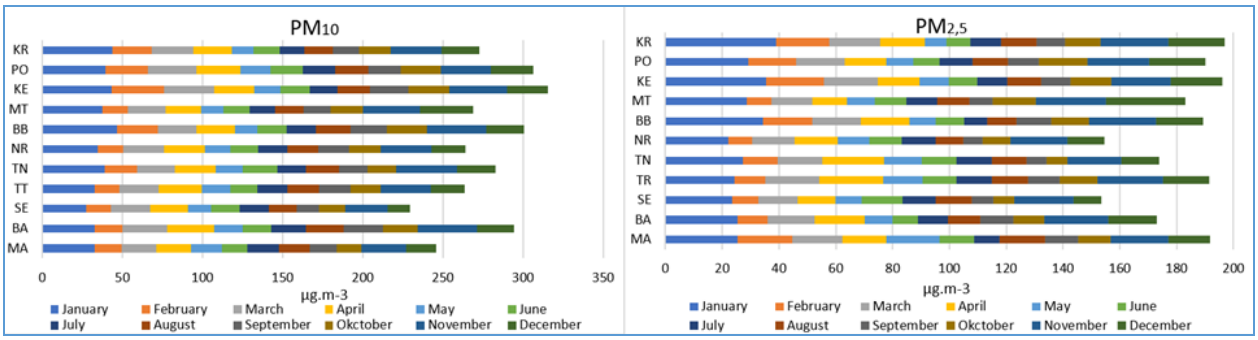



Fig.4 Average monthly concentrations of PM in monitored stations in 2020

Figure 4 shows the development of emissions in 2021. During this period, the values decreased slightly, which could have been caused by the decrease in traffic intensity due to COVID-19. The lowest values for $PM_{10}$ were shown by stations in Senica and Malacky, for $PM_{2.5}$ it was in Nitra and Senica. On the other hand, the station in Košice recorded the highest values for $PM_{10}$. For $PM_{2.5}$, the highest value was recorded at the station in Krompachy.

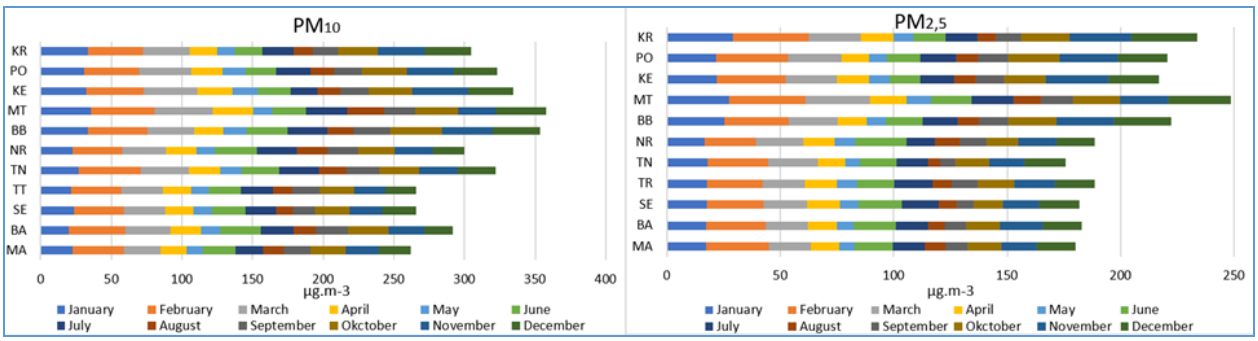



Fig.5 Average monthly concentrations of PM in monitored stations in 2021

Figure 5 shows the increase in monitored values. The values increased in 2021 at almost all stations, but the most at the station in Martin, which showed the lowest PM values in 2019. The reason may be an increase in the share of freight transport, but also a change in weather conditions. Malacky station achieved the lowest $PM_{10}$ values and Trenčín station for $PM_{2.5}$.

The following figure describes the average annual concentrations of PM particles in the monitored years.

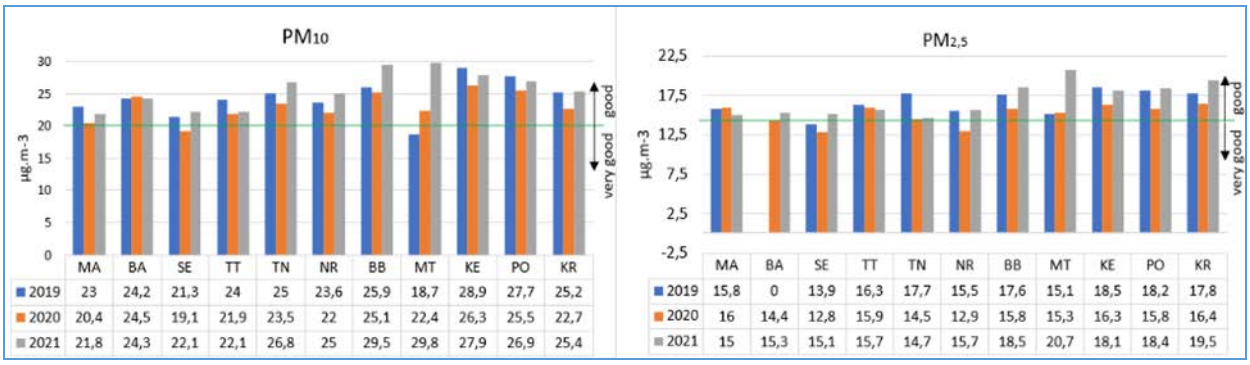



Fig.6 Average annual concentration of PM in monitored stations

In 2020 (Figure 6) there is a visible decrease in the average annual concentration compared to 2019 and 2021. Its values in that year reached an average of 23 and 15.1 $\mu g.m^{-3}$ for $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$. This means, on average, $PM_{10}$ decreased by 5.65% (2019) and increased by 9.93% (2021) compared to 2020. $PM_{2.5}$ in 2019 was higher by 9.93% compared to 2020 and increased again in 2021 by 12.58%. Figure 7 also shows the boundary between values that fall into very good and good values (green line). For 2019, the average annual concentration of PM particles reached a very good limit in one station, namely Martin ($PM_{10}$) and Senica ($PM_{2.5}$). The station in Bratislava showed an error rate in the measurement, therefore no values are available. In 2020, the values at several stations decreased, but a year later all stations recorded a good level.

The following Figures 8-9 represent the cumulative number of exceeded values per hour that are considered good. Thus, they exceeded the limit of 25 $\mu g.m^{-3}$ for $PM_{2.5}$ and 40 $\mu g.m^{-3}$ for $PM_{10}$ per hour.

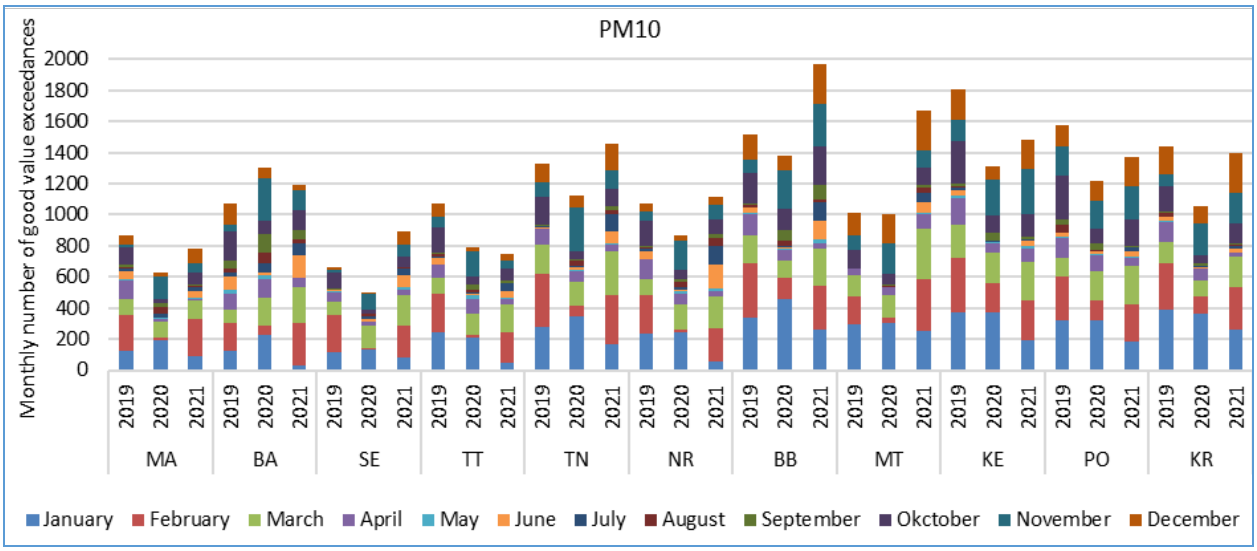



Fig.7 Exceeded $PM_{10}$ values in monitored stations

Figure 7 shows the $PM_{10}$ values, how many times the limit of the value that is considered good was exceeded, and thus how many times the air quality was deteriorated according to SHMÚ. As can be seen during the monitored period, the most frequent violations were recorded in Banská Bystrica. This exceedance was on average 1,622 times per year and reached a maximum value of 1,973 times in 2021. If it were converted into days, then 51 days a year. The station in Senica showed the fewest exceedances in 2020, 502 times.

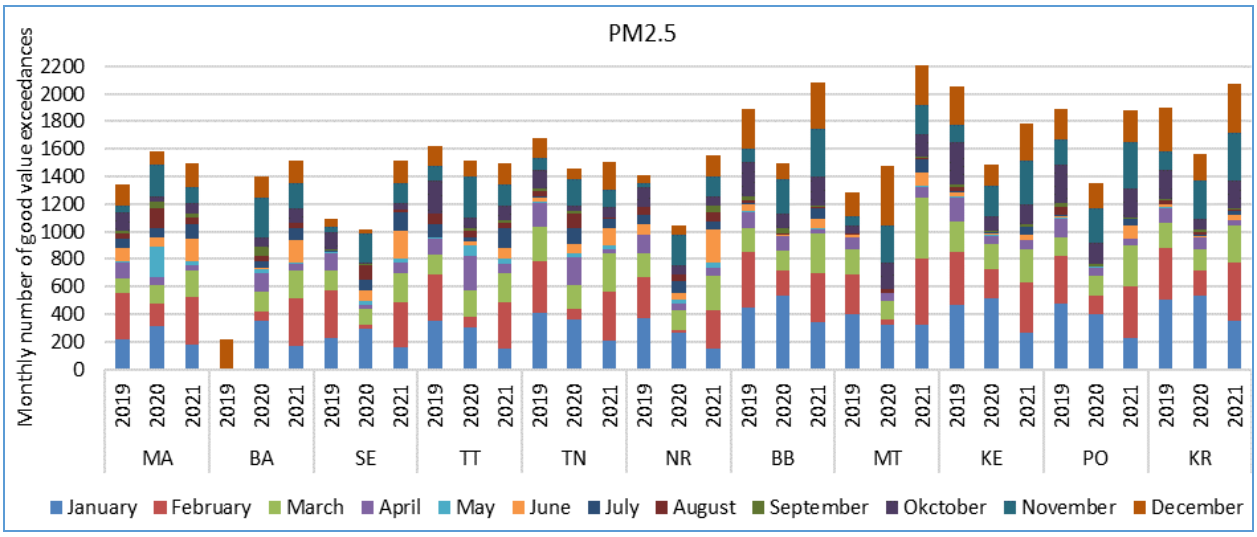



Fig.8 Exceeded $PM_{2.5}$ values in monitored stations

For $PM_{2.5}$, the least frequent exceedances were recorded again at the Senica station in 2020. The highest exceedance was achieved by the Martin station in 2021, 2,249 times per year. However, during the monitored period, the highest exceedances

were recorded in Krompachy station (on average 1,845 per year) followed by Banská Bystrica (on average 1,824 per year). It is interesting that only one of the evaluated stations showed a gradual decrease in both cases, namely the station in Trnava.

## 5 Conclusion

Concentrations of basic pollutants at most locations in Slovakia increased slightly in 2021 compared to the previous year, which is a consequence of the colder winter (higher emissions from heating during colder winters, less favorable scattering conditions). The most significant problem remains air pollution $PM_{10}$, $PM_{2.5}$, while the heating of households with solid fuel plays an important role here. The situation is most complicated in mountain valleys. Of interest in 2021 were several long-distance transports of dust from the Sahara and other dry regions, which were manifested by increased PM concentrations in February and in the summer months. Considering the ongoing energy crisis, we can probably expect a deterioration of air quality in the winter months due to an increase in the consumption of solid fuels.

The research results point to the possibility of air pollution due to traffic activity. However, it is not unequivocally possible to attribute the total pollution to this effect only. A significant part of pollution and substances that permanently harm the health of the population is produced by the influence of industrial activity and the economy. However, the results represent an overall picture of the development of particulate matter emissions over the last 3 years. From the location of the stations, it is possible to discuss their addition in the future. Another serious case is infrastructure. Vehicles moving near the built-up area. Every passing vehicle can cause an increase in emissions. For this reason, it is necessary to consider the diversion of traffic and thereby reduce the negative impact on the health of the population. The research can be considered as a background study for a tool for the permanent reduction of emissions and the negative impact of road transport on the health of the population.

**References:**


[1] Ali, M. U., Liu, G., Yousaf, B., Ullah, H., Abbas, Q., Munir, M. A. M. (2019). A systematic review on global pollution status of particulate matter-associated potential toxic elements and health perspectives in urban environment. *Environ. Geochem. Health*, 41, 1131-1162

[2] Anjum, M. S., Ali, S. M., Subhani, M. A., Anwar, M. N., Nizami, A. S., Ashraf, U., Khokhar, M. F. (2021). An emerged challenge of air pollution and ever-increasing particulate matter in Pakistan; a critical review. J. *Hazard. Mater*, 402, 123943

[3] Bell, M. L., Ebisu, K., Leaderer, B. P., Gent, J. F., Lee, H. J., Koutrakis, P., Wang, Y., Dominici, F., Peng, R. D. (2014). Associations of PM2.5 constituents and sources with hospital admissions: Analysis of four counties in Connecticut and Massachusetts (USA) for persons ≥ 65 years of age. *Environ. Health Perspect*, 122, 138-144

[4] Ben-Chaim, M., Shmerling, E., & Kuperman, A. (2013). Analytic modeling of vehicle fuel consumption. *Energies*, 6(1), 117-127

[5] Calvo, A. I., Alves, C., Castro, A., Pont, V., Vicente, A. M., & Fraile, R. (2013). Research on aerosol sources and chemical composition: Past, current and emerging issues. *Atmospheric Research*, 120, 1-28

[6] Dietrich, M., Wolfe, A., Burke, M., Krekeler, M. P. (2019). The first pollution investigation of road sediment in Gary, Indiana: Anthropogenic metals and possible health implications for a socioeconomically disadvantaged area. *Environ. Int.*, 128, 175-192

[7] Fenger, J. (2009). Air pollution in the last 50 years–From local to global. Atmos. *Environ*, 43, 13-22

[8] Héroux, M. E., Anderson, H. R., Atkinson, R., Brunekreef, B., Cohen, A., Forastiere, F., Hurley, F., Katsouyanni, K., Krewski, D., Krzyzanowski, M.; et al. (2015). Quantifying the health impacts of ambient air pollutants: Recommendations of a WHO/Europe project. Int. *J. Public Health*, 60, 619-627

[9] Jagelčák, J., Gnap, J., Kostrzewski, M., Kuba, O., & Frnda, J. (2022). Calculation of an average vehicle's sideways acceleration on small roundabouts. *Sensors*, 22(13), 4978

[10] Kendrick, C. M., Koonce, P., George, L. A. (2015). Diurnal and seasonal variations of NO, NO2 and PM2.5 mass as a function of traffic volumes alongside an urban arterial. *Atmos. Environ*, 122, 133-141

[11] Khan, R. K., & Strand, M. A. (2018). Road dust and its effect on human health: a literature review. *Epidemiology and health*, 40

[12] Mar, T. F., Larson, T. V., Stier, R. A., Claiborn, C., Koenig, J. Q. (2004). An analysis of the association between respiratory symptoms in subjects with asthma and daily air pollution in Spokane, Washington*. Inhal. Toxicol*, 16, 809-815

[13] Prospero, J. M., Lamb, P. J. (2003). African droughts and dust transport to the Caribbean: Climate change implications. *Science*, 302, 1024-1027

[14] SHMÚ <https://www.shmu.sk/sk/?page=224> (cited: 05.03.2022)

[15] Schibuola, L. & Tambani, C. (2020). Indoor environmental quality classification of school environments by monitoring PM and CO2 concentration levels. *Atmo spheric Pollution Research*, 11(2), 332-342

[16] Schneider, I. L., Teixeira, E. C., Dotto, G. L., Pinto, D., Yang, C. X., Silva, L. F. (2022). Geochemical study of submicron particulate matter (PM1) in a metropolitan area. *Geosci. Front*., 13, 101130

[17] *Strategický plán rozvoja dopravy SR do roku 2030 – Fáza II* (2016). <https://www.mindop.sk/ministerstvo-1/doprava-3/strategia/strategicky-plan-rozvoja-dopravy-sr-do-roku-2030

[18] Tan, Y., Wang, H., Zhu, B., Zhao, T., Shi, S., Liu, A., & Cao, L. (2022). The interaction between black carbon and planetary boundary layer in the Yangtze River Delta from 2015 to 2020: Why O3 didn't decline so significantly as PM2.5. *Environmental Research*, 214, 114095

[19] Turner, M. C., Andersen, Z. J., Baccarelli, A., Diver, W. R., Gapstur, S. M., Pope III, C. A., Prada, D., Samet, J., Thurston, G., Cohen, A.; et al. (2020). Outdoor air pollution and cancer: An overview of the current evidence and public health recommendations. *CA A Cancer J. Clin*., 70, 460-479

[20] Zeng, Y., Bi, C., Jia, J., Deng, L., Chen, Z. (2020). Impact of intensive land use on heavy metal concentrations and ecological risks in an urbanized river network of Shanghai. *Ecol. Indic*, 116, 106501

# DEFEKTOSKOPIA MAGNETYCZNA W EKSPLOATACYJNEJ DIAGNOSTYCE KÓŁ ŁAŃCUCHOWYCH UKŁADÓW CIĄGNIENIA MASZYN GÓRNICZYCH

# MAGNETIC DEFECTOSCOPY IN OPERATIONAL DIAGNOSTICS OF CHAIN SPROCKETS IN MINING MACHINES

**Eryk REMIORZ**, Silesian University of Technology, Poland [1]
**Stanisław MIKUŁA** [2]

**Streszczenie:**

Koła łańcuchowe są ważnym elementem układów ciągnienia maszyn górniczych takich jak przenośniki zgrzebłowe ścianowe i podścianowe, strugi węglowe oraz kombajny ścianowe z łańcuchowym układem ciągnienia (np. GUŁ- 500 firmy Famur). Przekazują one siłę uciągu wywołaną napędem do łańcucha pociągowego przenosząc obciążenia dynamiczne o bardzo dużych wartościach. Dodatkowo narażone są na intensywne oddziaływanie ścierne i korozyjne. Awaria koła łańcuchowego skutkuje zatrzymaniem produkcji w wyrobisku ścianowym co generuje olbrzymie straty ekonomiczne. Dlatego też skuteczna diagnostyka kół łańcuchowych prowadzona w warunkach eksploatacyjnych jest bardzo ważna dla całego procesu produkcyjnego. W artykule przedstawiono podstawowe problemy eksploatacyjne kół łańcuchowych oraz omówiono główne procesy niszczące te elementy. Przedstawiono problematykę uszkodzeń możliwych do wykrycia metodami magnetycznymi i penetracyjnymi. Zaprezentowano zmodyfikowany przyrząd diagnostyczny służący do wykrywania uszkodzeń powierzchni zębów kół łańcuchowych wykorzystujący metodę magnetyczno-proszkową oraz innowacyjny induktor przeznaczony do magnesowania elementów o skomplikowanej powierzchni.

**Annotation:**

Chain sprockets are important elements of the haulage systems of mining machines such as scraper conveyors, coal plows and longwall shearers with a chain haulage system (e.g. GUŁ-500 by Famur). They transfer the pulling force caused by the drive to the link chain, transferring dynamic loads of very high values. Additionally, they are exposed to intense abrasive and corrosive wear. A chain sprocket failure results in a production stoppage in the longwall excavation, which generates huge economic losses. Therefore, effective diagnostics of chain sprockets conducted in operating conditions is very important for the entire production process. The article presents the basic operating problems of chain sprockets and discusses the main processes destroying these elements. The issue of damage that can be detected by magnetic and penetration methods is presented. A modified diagnostic device for detecting damage to the surface of a chain sprocket teeth using the magnetic-particle method and an innovative inductor designed for magnetizing elements with a complex surface are presented.

[1] dr hab. inż. Eryk Remiorz, prof. PS
Silesian University of Technology
Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Poland
tel.: +48 32 237-14-44, e-mail: eryk.remiorz@polsl.pl
[2] dr inż. Stanisław Mikuła, Poland

## 1 Wprowadzenie

Bębny łańcuchowe górniczych ścianowych i podścianowych przenośników zgrzebłowych urobku w kopalniach węgla kamiennego pracują w bardzo trudnych warunkach eksploatacyjnych. Przenoszą one szczególnie duże obciążenia o silnie zmiennym charakterze oraz narażone są na intensywne oddziaływanie ścierne i korozyjne. Warunki pracy bębnów łańcuchowych powodują, że ich własności użytkowe często w szybkim tempie ulegają degradacji. Głównymi procesami niszczącymi prowadzącymi do utraty zdolności eksploatacyjnej są złamania zębów, głównie o charakterze zmęczeniowym, zużycie ścierno-erozyjne oraz inne zjawiska wywołane dużymi obciążeniami dynamicznymi i tarciem w warunkach technicznie suchych. W wyrobiskach podziemnych, w których występują zasolone wody złożowe istotnym czynnikiem degradującym własności są procesy korozyjne intensyfikowanie dużymi gradientami temperatury wynikającymi z pracy tarcia zębów bębnów łańcuchowych w kontakcie z ogniwami łańcuchów pociągowych. Pęknięcia zębów, tak o charakterze zmęczeniowym jak i w przypadku gwałtownych przeciążeń, doraźnych złamań powodują występowanie nagłych awarii o dużych skutkach technicznych i ekonomicznych. Stanowią też duże zagrożenie bezpieczeństwa.

Wspomniane główne procesy niszczące w przypadku bębnów łańcuchowych podlegają bardzo często złożonemu synergicznemu wzajemnemu wzmacnianiu się, co dodatkowo przyspiesza proces utraty zdatności eksploatacyjnej. Szybko postępująca degradacja własności użytkowych bębnów skłania do poszukiwania efektywnych metod diagnozowania stanu technicznego bębnów częściej, niż to ma miejsce w odniesieniu do innych elementów układów mechanicznych maszyn górniczych. Ocena diagnostyczna w tych warunkach z konieczności musi odbywać się bezpośrednio w miejscu użytkowania przenośników, w miarę możliwości wykorzystując krótkie przerwy w ich pracy. Warunki pracy przenośników górniczych wykluczają możliwość stosowania wielu metod diagnostyki z powodzeniem wykorzystywanych w innych dziedzinach budowy maszyn. Zagrożenia wybuchem pyłu węglowego i metanu dodatkowo ograniczają możliwości stosowania metod diagnostycznych w tym i opartych na analizie drgań i hałasów, również z powodu wielu czynników zakłócających, pochodzących od działania innych maszyn, wysokich kosztów aparatury i wymagania specjalistycznych kwalifikacji obsługi. Metody radiologiczne i ultradźwiękowe również w opisanych warunkach nie dają wymaganych rezultatów. Duże możliwości stwarzają natomiast metody diagnostyki magnetycznej bębnów łańcuchowych wytwarzanych z ferrytycznych stopów żelaza, takich jak staliwa stopowe i żeliwa ADI. Umożliwiają one ujawnianie wielu rodzajów uszkodzeń eksploatacyjnych bębnów łańcuchowych z wyłączeniem ubytków wynikających ze zużycia ścierno-erozyjnego. Metody diagnozowania zmian geometrycznych bębnów łańcuchowych wynikających ze zużycia zostały zaprezentowane w pracach [1, 2, 3, 7]. W niniejszym opracowaniu diagnostyka zużycia ściernego będzie pominięta.

## 2 Eksploatacyjne uszkodzenia bębnów łańcuchowych możliwe do ujawnienia metodami magnetycznymi i penetracyjnymi

Cykle zmian obciążenia zębów bębnów łańcuchowych wynikające z częstotliwości obrotów bębnów i drgań wzdłużnych przenoszonych przez cięgna łańcuchowe wywołują zarodkowanie, a następnie rozwój pęknięć zębów o charakterze zmęczeniowym. Główna składowa obciążenia zębów ma charakter odzerowo-tętniący o szczególnie dużej amplitudzie. Pęknięcia zmęczeniowe zębów wywoływane przez obciążenia zmienne są trudne do ujawniania poprzez wzrokowe oględziny, zwłaszcza na początkowym etapie ich rozwoju. Trudności te wynikają z tego, że na ogół nie towarzyszą tym pęknięciom wyraźne odkształcenia plastyczne zębów, gdyż materiały, z których wykonywane są bębny

łańcuchowe mają niewielką plastyczność, a proces ich pękania jest charakterystyczny dla materiałów o zwiększonej kruchości. Kolejnym czynnikiem utrudniającym obserwację rozwoju pęknięć zmęczeniowych jest to, że najczęściej mają one swój początek w strefie kontaktu zębów z ogniwami łańcuchów.

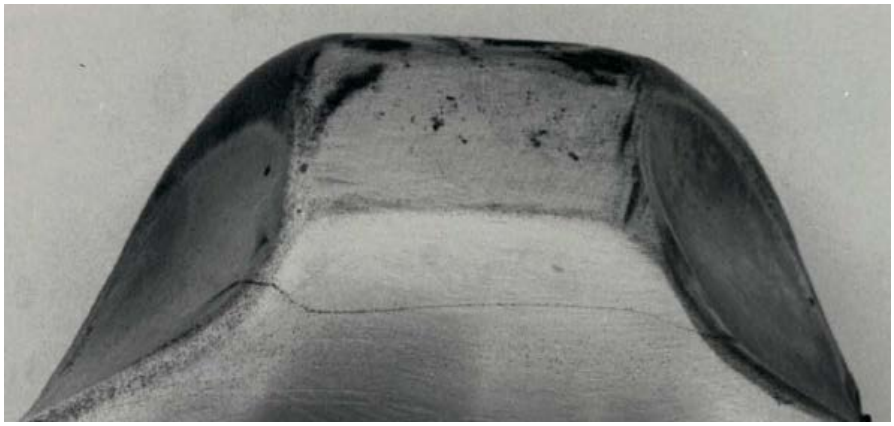
Bardzo duże naciski stykowe w tej strefie zębów w połączeniu z dużymi siłami tarcia powodują, że rozwijająca się szczelina zmęczeniowa jest "zawalcowywana" przez powierzchniowe deformacje plastyczne w warstwie wierzchniej zębów. Powierzchnie pęknięć zmęczeniowych są bardzo aktywne chemicznie i w warunkach wyrobisk podziemnych szybko pokrywają się produktami korozji, które szczelnie wypełniają zaistniałe pęknięcia zmęczeniowe utrudniając ich ujawnianie, nawet z użyciem metod penetrantowych. W opisanej sytuacji ujawnia się silna synergia procesów niszczących zęby bębnów łańcuchowych. Objętość produktów korozji jest znacznie większa od objętości skorodowanych stopów Fe, produkty korozji powodują więc swoiste "rozklinowanie" pęknięć zmęczeniowych. W przypadku obecności wód złożowych wnikających w zaistniałe pęknięcia o zwiększonej aktywności chemicznej ujawnia się tak zwany efekt Rebindera [4] czyli destrukcyjny wpływ aktywnych środków ciekłych na postępujące pękanie zmęczeniowe. Obecność jonów chlorkowych w wodach złożowych powoduje też duży spadek odporności konstrukcyjnych stopów żelaza na pękanie kruche wyrażane wartością krytycznej intensywności naprężeń KIc [6]. Stosowane czasami powierzchniowe podtrawianie dla ujawniania pęknięć może sytuację dodatkowo pogorszyć. Kwasy zawarte w cieczach trawiących łatwo wytrawiają część produktów korozji na wejściu do szczelin zmęczeniowych powodując ich szybkie ujawnianie, ale część z nich pozostaje w szczelinach zmęczeniowych wzmagając proces destrukcji zębów bębnów łańcuchowych.

Z opisanych powodów łatwe i wygodne w stosowaniu metody penetrantowe polegające na nanoszeniu na badane powierzchnie cieczy o małym napięciu powierzchniowym dobrze wnikającej w szczeliny zmęczeniowe i inne defekty powierzchniowe, a które po wytrawieniu są dobrze widoczne zwłaszcza w świetle ultrafioletowym mogą być zawodne. Inną niedogodnością metod penetrantowych jest ograniczenie ich skutecznego stosowania do pęknięć i wad materiałowych wychodzących na powierzchnię badanych elementów. Tych ograniczeń nie mają metody magnetyczne opisane w dalszej części pracy.

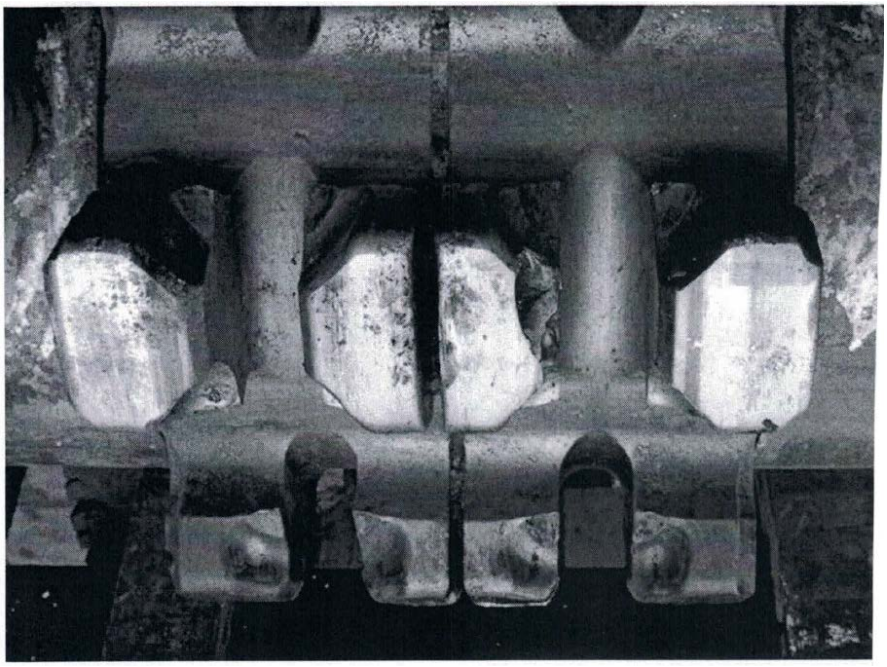
Pęknięcia zmęczeniowe zębów bębnów łańcuchowych biorące swój początek od ognisk zmęczeniowych dość szybko rozwijają się ze wzrastającą prędkością do wielkości krytycznej, przy której następuje przełom resztkowy (dołom), najczęściej o zdecydowanie kruchym charakterze. Rolę ognisk zmęczeniowych mogą spełniać różnego rodzaju defekty materiałowe i obróbcze. Mogą to być rysy obróbcze, pęknięcia hartownicze czy odlewnicze, wtrącenia niemetaliczne powierzchniowe i podpowierzchniowe, karby strukturalne oraz inne wady trudne do pełnego uniknięcia w procesie wytwarzania i eksploatacji bębnów łańcuchowych.

W ekstremalnie trudnych warunkach pracy bębnów zapoczątkowane pęknięcia zmęczeniowe rozwijają się ze zmienną prędkością przy często zmieniającym się kierunku głównego pęknięcia. Wynika to z różnych na przebiegu pęknięcia własności mechanicznych materiału, stanu naprężeń własnych i zmieniającego się w miarę zmniejszania się przekroju nośnego stanu naprężeń wywołanych obciążeniami eksploatacyjnymi. Przy okresowym spadku obciążenia możliwe jest czasowe zahamowanie rozwoju pęknięcia. Obserwowane jest również zjawisko lokalnego umocnienia się materiału pod wpływem odkształceń plastycznych na czole pęknięcia zmęczeniowego. Tworzy to charakterystyczne linie przystankowe na powierzchni przełomów. Gdy pęknięcie "pokona" lokalnie umocnioną strefę na ogół zdecydowanie

przyspiesza swój rozwój, czemu często towarzyszy zmiana kierunku pękania. Stąd też obrazy przełomów zmęczeniowych cechują się licznymi uskokami i liniami przystankowymi. Analiza mikroskopowa umożliwia ujawnienie charakterystycznych wąskich prążków zmęczeniowych wynikających z przyrostu pęknięcia od kolejnych cykli obciążenia. W miarę wzrostu pęknięcia szerokość prążków zmęczeniowych zwiększa się i wzrasta też ogólna prędkość rozwoju pęknięć. Rysunek 1 przedstawia rozwijające się pęknięcie zmęczeniowe zęba bębna łańcuchowego eksploatowanego w przenośniku zgrzebłowym [7]. Z kolei rysunki 2 i 3 przedstawiają obrazy pełnego przełomu zmęczeniowego zębów bębna.



Rys.1 Widok rozwijającego się pęknięcia zmęczeniowego zęba bębna łańcuchowego przenośnika zgrzebłowego [7]



Rys.2 Widok bębna łańcuchowego z wyłamanym częściowo zębem w wyniku wskrośnego przełomu zmęczeniowego

Rys.3 Obraz powierzchni pełnego wskrośnego przełomu zmęczeniowego zęba bębna łańcuchowego - groźba utraty zdolności przenoszenia obciążeń, znacznych zniszczeń a nawet zerwania łańcucha pociągowego. Widoczne uskoki i linie przystankowe na powierzchni przełomu zmęczeniowego zęba

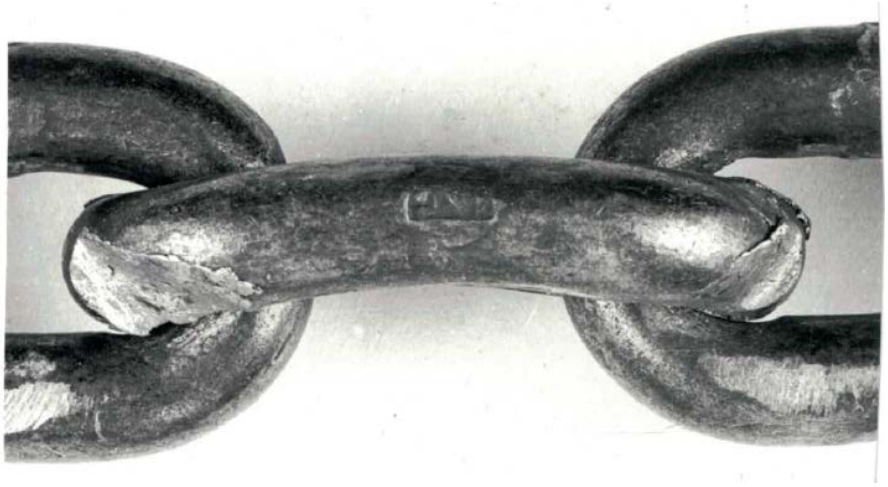
Pełne przełomy zmęczeniowe zębów bębnów mają szczególnie krytyczny charakter, gdyż występują nagle, bez wyraźnych wcześniejszych symptomów. Prowadzi to często do nagłych awaryjnych przestojów przenośników, połączonych niekiedy z zerwaniem cięgien łańcuchowych i zagrożeniem bezpieczeństwa. Na rysunku 4 przedstawiono odcinek łańcucha z mocno zgiętym ogniwem w wyniku zablokowania ogniwa przez pęknięty ząb bębna. Ogniwa poziome łańcucha na rysunku 4 wykazują znaczny stopień zużycia i deformacji plastycznych oraz innych form uszkodzeń.

Bardzo duże naciski stykowe i poślizgi przy tarciu suchym między ogniwami łańcuchów pociągowych a gniazdami i zębami bębnów wywołują dodatkowe specyficzne procesy niszczące w postaci sczepiania adhezyjnego i zmęczenia cieplnego. Procesy te synergicznie wraz z postępującym zużyciem ścierno-erozyjnym przyspieszają proces niszczenia eksploatacyjnego bębnów.

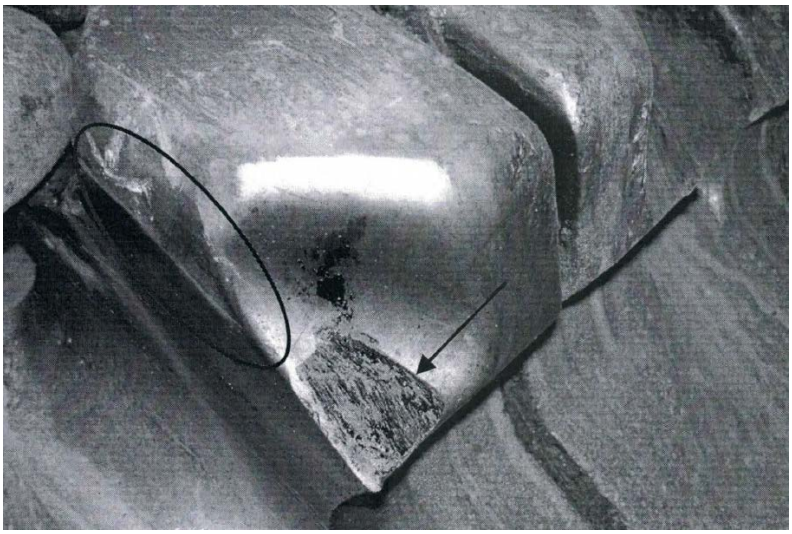
Sczepienia adhezyjne to proces, w wyniku którego następuje lokalne osiąganie stanu analogicznego do zgrzewania tarciowego. Tworzące się lokalne mostki adhezyjne powodują wyrywanie fragmentów materiału z jednego elementu i przenoszenie na drugi. Powoduje to silne pogorszenie się stanu powierzchni, gwałtowny wzrost chropowatości, co w połączeniu z pracą zrywania lokalnych sczepień adhezyjnych poruszających się względem siebie elementów wzmaga występowanie dużych gradientów temperatury. Rysunek 5 ilustruje widok powierzchni zęba bębna przenośnika zgrzebłowego z charakterystycznymi wyrwaniami materiału. Analogiczny obraz uszkodzeń powierzchni występuje też na współpracujących ogniwach łańcucha w miejscach ich kontaktu z zębami bębna.

Wzrost temperatury warstwy wierzchniej zębów w wyniku poślizgu z dużymi naciskami generuje zjawiska charakterystyczne dla zmęczenia cieplnego. Cykle gwałtownego nagrzewania wskutek tarcia, a następnie chłodzenia przez odprowadzenie ciepła z warstwy wierzchniej wgłąb danego elementu, urobku i ewentualnie innych elementów prowadzą do powstawania charakterystycznej siatki płytkich pęknięć powierzchniowych, zawsze zorientowanych prostopadle do kierunku lokalnych poślizgów. Te płytkie pęknięcia warstwy wierzchniej, silnie odkształconej od nacisków stykowych,

sprzyjają wykruszaniu się fragmentów warstwy powierzchniowej, co lawinowo pogarsza stan powierzchni. Ponadto pęknięcia od zmęczenia cieplnego mogą być ogniskami rozwoju pęknięć zmęczeniowych zębów opisanych wcześniej. Każdy z zębów bębna łańcuchowego współpracuje cyklicznie z ogniwami łańcucha o zróżnicowanym profilu części łukowej ogniw, co powoduje, że proces lokalnych odkształceń plastycznych stale się zmienia i często dochodzi do wyczerpywania się zdolności materiału do kolejnych odkształceń plastycznych. Powoduje to odspajanie się od podłoża sporych jego fragmentów (rys.5).



Rys.4 Odcinek łańcucha przenośnika zgrzebłowego o skrajnym stopniu zużycia eksploatacyjnego. Ogniwo środkowe zgięte w wyniku zablokowania przez wyłamany ząb bębna łańcuchowego. Widoczne deformacje plastyczne i strefy sczepień adhezyjnych na powierzchniach kontaktu ogniw łańcucha z zębami bębna łańcuchowego



Rys.5 Obraz powierzchni roboczej zęba bębna łańcuchowego z odspojonym fragmentem warstwy wierzchniej, widoczne strefy sczepień adhezyjnych (w owalu pęknięcie zmęczeniowe)

Opisane procesy niszczące mogą być dość skutecznie ujawnione przy pomocy odpowiednio prowadzonej diagnostyki metodami magnetycznymi. W metodach tych wykorzystuje się zjawisko zmian pola magnetycznego w miejscu pęknięć, uszkodzeń lub zmian strukturalnych materiałów ferromagnetycznych. Przegląd wielu metod defektoskopii magnetycznej zawiera praca [5]. Spośród szeregu metod diagnostyki magnetycznej, w przypadku bębnów łańcuchowych przenośników zgrzebłowych najbardziej przydatna jest metoda magnetyczno-proszkowa. Szczególnie wariant mokry tej metody zasługuje na praktyczne rozpowszechnienie. W Katedrze Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa Politechniki Śląskiej mokra metoda magnetyczno-proszkowa została dostosowana dla potrzeb diagnostyki elementów maszyn w trudnych warunkach eksploatacyjnych górnictwa podziemnego.

## 3 Adaptacja metody magnetyczno-proszkowej do diagnozowania bębnów łańcuchowych w warunkach eksploatacyjnych

Metoda magnetyczno-proszkowa ujawniania defektów elementów wykonanych z ferromagnetyków polega na odpowiednim namagnesowaniu badanej strefy, a następnie pokryciu jej warstwą zawiesiny drobnego proszku magnetycznego w specjalnej cieczy nośnej. Gdy w badanym elemencie istnieją pęknięcia lub makroskopowe wady materiałowe, wówczas płynna zawiesina na powierzchni pod działaniem strumienia magnetycznego układa się w taki sposób, że w miejscach zaburzeń linii pola magnetycznego wywołanego wadą lub pęknięciem następuje zagęszczenie drobin proszku magnetycznego, sygnalizując istnienie wady. W prawidłowej interpretacji obrazu utworzonego w opisany sposób bardzo istotne jest posiadanie przez osobę wykonującą badanie odpowiedniego doświadczenia. Produkowane są specjalne profesjonalne zestawy aerozolowe zawierające magnetyczny proszek w ciekłej zawiesinie. Niekiedy pomocne jest uprzednie pokrycie badanej strefy szybkoschnącym lakierem podkładowym.

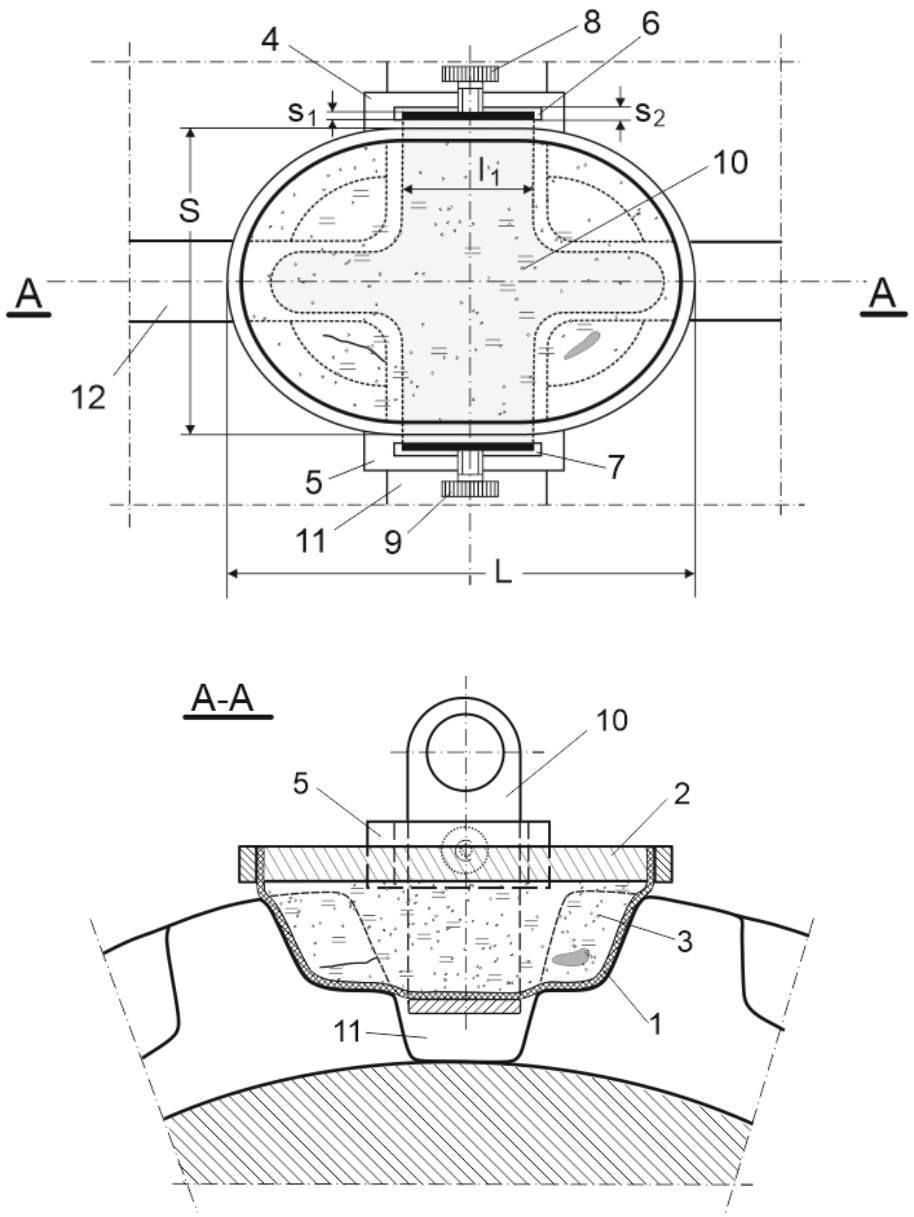
W warunkach wyrobisk podziemnych kopalń węgla kamiennego użycie ciśnieniowych aerozoli zawierających palne węglowodory ze względów pożarowych nie może być dopuszczony. Inną wadą zestawów tego rodzaju jest duże zużycie proszku magnetycznego oraz wnikanie cieczy nośnej w zaistniałe pęknięcia, co nie pozostaje bez wpływu na ich ewentualny rozwój w toku dalszej eksploatacji.

Dla potrzeb diagnostyki bębnów łańcuchowych przenośników zgrzebłowych bezpośrednio w miejscu ich użytkowania proponuje się używanie zmodyfikowanego wariantu metody magnetyczno-proszkowej. Jej podstawą jest specjalny przyrząd przedstawiony na rysunku 6. Przyrząd ten składa się z elastycznego szczelnego pojemnika 1 wypełnionego przezroczystą cieczą nośną 3, w której umieszczona jest niewielka ilość drobnodyspersyjnego magnetytu. Pojemnik zamknięty jest przeźroczystą płaską pokrywą 2 szczelnie połączoną z pojemnikiem. Użycie przyrządu polega na ułożeniu pojemnika w gnieździe bębna po jego uprzednim wstrząśnięciu dla uzyskania jednorodnej zawiesiny proszku magnetycznego o kolorze czarnym w cieczy nośnej. Zastosowanie opaski podtrzymującej 10 w kształcie litery C zapobiega wpadaniu elastycznej, dolnej części pojemnika do rowków międzyzębnych. Zapewnia to lepszy docisk przyrządu do badanych powierzchni zębów. Pozostawiona w spokoju zawiesina proszku ulega swobodnej sedymentacji w ziemskim polu grawitacyjnym. Pod wpływem zaburzeń układu linii pola magnetycznego generowanego magnesami trwałymi lub specjalnym induktorem czarny proszek magnetyczny osadza się na białej powierzchni dna pojemnika ze zwiększoną intensywnością w miejscu powierzchniowej wady materiałowej lub pęknięcia. Pęknięcia zmęczeniowe ujawniane są w postaci wyraźnych ciemnych linii układających się po granicach pęknięć. Przy zupełnym braku wad lub pęknięć dno pojemnika przyjmie jednolity szary kolor pochodzący od równomiernie osadzonego

proszku magnetycznego. Obserwacja i ewentualnie rejestracja obrazu dna przyrządu odbywa się przez przeźroczystą pokrywę i warstwę przejrzystej cieczy nośnej. Dzięki zwiększonemu czasowi sedymentacji proszku i większej grubości warstwy cieczy nośnej ujawniane mogą być uszkodzenia badanej strefy nie dające się wykryć przy użyciu innych sposobów diagnostyki magnetycznej. Opisany sposób pozwala wykryć uszkodzenia eksploatacyjne oraz powierzchniowe i podpowierzchniowe wady materiałowe i obróbcze. Warunkiem skuteczności opisanego sposobu diagnostyki przy użyciu przyrządu jest dostatecznie silne i powtarzalne namagnesowanie badanej strefy. Typowe induktory nie zapewniają dobrej powtarzalności stopnia namagnesowania w przypadku zębów bębnów łańcuchowych, których zarys jest złożony przestrzennie oraz podlega stałym zmianom w czasie eksploatacji. Dla potrzeb magnesowanie zębów bębnów łańcuchowych i innych elementów o złożonej i zmiennej w czasie konfiguracji opracowany został specjalny wieloprętowy induktor pokazany na rysunku 7 [8].

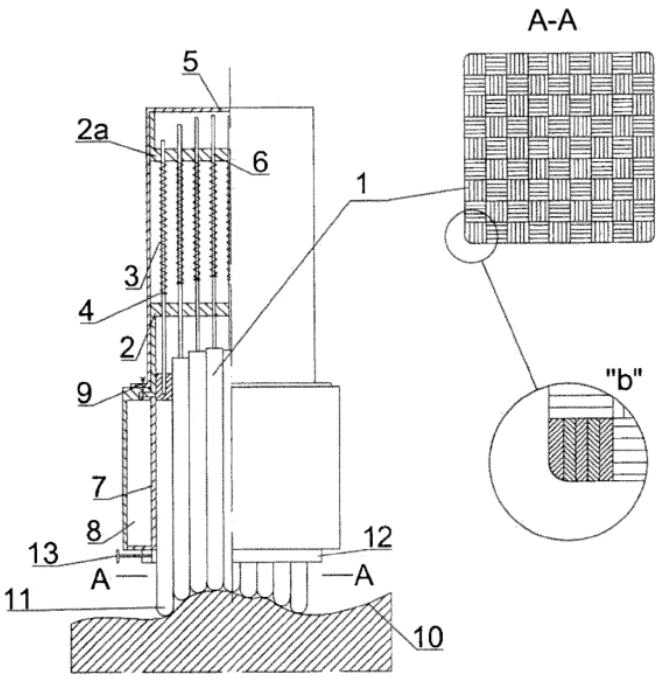
Wzbudnik transformatorowy wieloprętowy składa się z rdzenia 1, wyposażonego w pęk prętów 11 wykonanych ze stali krzemowej transformatorowej osadzonych luźno w prowadnicach 2 i 2a za pomocą prowadników 6. Pręty 11 utrzymywane są w pozycji wyjściowej za pomocą sprężyn 3, które opierają się jednym końcem o talerze oporowe 4 a drugim końcem o prowadnicę wewnętrzną 2a. Talerze oporowe 4 zaciśnięte są na prowadnikach 6 prętów 11 rdzenia 1. Pokrywa 5 połączona jest z prowadnicą 2 i karkasem 7 zwojnicy 8, wkrętami 9. Pręty 11 rdzenia 1 mogą mieć dowolny przekrój poprzeczny. Korzystnym kształtem przekroju prętów 11 jest kształt sześciokąta foremnego lub kwadratu. Pręty 11 rdzenia 1 mogą być monolityczne lub złożone z pakietów blachy transformatorowej (szczegół "b"). Powierzchnie boczne prętów 11 dla zmniejszenia tarcia mogą być pokryte niskotarciową powłoką, na przykład teflonem, która to powłoka dodatkowo pełni funkcję izolacji dla prądów wirowych indukowanych w prętach po włączeniu układu zasilającego.

Pod naciskiem na badaną powierzchnię 10 każdy z prętów 11 wsuwa się odpowiednio do wnętrza wzbudnika, natomiast sprężyny 3 zapewniają stały kontakt prętów 11 rdzenia 1 z powierzchnią badanego bębna. Kierunek przepływu prądu przez zwojnicę należy dobrać tak, aby siła elektromagnetyczna działająca na rdzeń skierowana była do badanej powierzchni 10. Po zakończeniu badania i odjęciu wzbudnika od badanej powierzchni następuje samoczynny powrót wszystkich prętów 11 rdzenia 1 do pozycji wyjściowej. Możliwe jest również ustalenie położenia wszystkich prętów 11 poprzez dokręcenie śruby 13 w stałej lub zdejmowanej obejmie 12. Może to być przydatne podczas badania liczniejszej serii identycznych elementów np. nowych bębnów. Wzbudnik transformatorowy może być wykorzystany z drugim egzemplarzem takiego samego wzbudnika lub z magnesami trwałymi. Transformatorowy wzbudnik wieloprętowy może być użyty do ewentualnego rozmagnesowania badanego elementu poprzez przełączanie jego biegunowości przy zmniejszającym się napięciu zasilania.




Rys.6 Zmodyfikowany przyrząd diagnostyczny przystosowany dla potrzeb oceny stanu technicznego bębnów łańcuchowych metodą magnetyczno-proszkową (1 - pojemnik; 2 - pokrywa; 3 - zawiesina proszku magnetycznego w cieczy; 4, 5 - elementy mocujące, 6, 7 - otwory prostokątne; 8, 9 - śruby ustalające; 10 - opaska podtrzymująca umieszczona pod pojemnikiem; 11 - poprzeczny rowek międzyzębny; 12 - wzdłużny rowek międzyzębny)

Konstrukcja induktora umożliwia uzyskiwanie dobrego stopnia namagnesowania badanej strefy bębnów łańcuchowych przy niewielkim zużyciu energii i obniżonym napięciu zasilania. W badaniach diagnostycznych najlepiej wykorzystywać dwa identyczne induktory połączone elektrycznie w taki sposób, aby uzyskać przeciwną biegunowość obu induktorów przy zasilaniu bateryjnym lub za pomocą przenośnych zasilaczy. Duża powtarzalność stopnia namagnesowania jest szczególnie przydatna w przypadku badań porównawczych i przy śledzeniu rozwoju zniszczeń eksploatacyjnych.




Rys.7 Innowacyjny induktor predestynowany do powtarzalnego magnesowania elementów o złożonej przestrzennie powierzchni (np. zębów kół łańcuchowych)

## 4 Podsumowanie

Spośród wielu metod diagnozowania uszkodzeń eksploatacyjnych bębnów łańcuchowych przenośników zgrzebłowych, dla których ocena diagnostyczna musi być wykonywana w warunkach wyrobisk podziemnych kopalń węgla kamiennego największą przydatnością praktyczną cechuje się metoda magnetyczno-proszkowa.

Zaproponowane modyfikacje metody magnetyczno–proszkowej w wariancie mokrym może być szczególnie przydatne do skutecznego ujawniania pęknięć zmęczeniowych zębów bębnów łańcuchowych oraz innych form uszkodzeń eksploatacyjnych. Efektywność zaproponowanej metody zwiększa użycie specjalnego wieloprętowego induktora zasilanego na przykład z akumulatora.

Wczesne wykrywanie rozwijających się uszkodzeń eksploatacyjnych bębnów łańcuchowych przenośników zgrzebłowych pozwala na uniknięcie groźnych i kosztownych awarii oraz wykonywanie odpowiednich działań zapobiegawczych. Metoda opisana w pracy może służyć również do kontroli nowych bębnów łańcuchowych w celu ujawnienia wielu rodzajów wad powstałych na etapie wytwarzania, co może być podstawą podejmowania decyzji eksploatacyjnych lub reklamacyjnych.

**Literatura:**

[1] Giza T., Cheluszka P. Reverse engineering technology in diagnosing slots of sprocket drums wear. In *Technicka Diagnostika 2012, z.1*

[2] Giza T., Mann R. Quantitative analysis of defects in materials of sprocket drums seats with application of 3D scanner. In *Technicka Diagnostika 2013, z.1*

[3] Hua Ding, Yinchuan Liu, Jiancheng Liu. *Volumetric Tooth Wear Measurement of Scraper Conveyor Sprocket Using Shape from Focus-Based Method*. Appl. Sci. 2019, 9, 1084; doi:10.3390/app9061084

[4] Kocańda S. *Zmęczeniowe pękanie metali*. WNT, Warszawa 1985

[5] Lewińska-Romicka A. *Badania nieniszczące – podstawy defektoskopii*. WNT, Warszawa 2001

[6] Mikuła S. *Trwałość zmęczeniowa cięgien łańcuchowych górniczych maszyn urabiających i transportowych*. Prace Badawcze CMG Komag, Gliwice 1978.

[7] Remiorz E., Mikuła S. Diagnosis of longwall machines sprockets in operating conditions. In *Technicka Diagnostika 2020, z.1*

[8] Szweda S., Mikuła S., Markowicz J. *Wzbudnik transformatorowy do badań magnetycznych elementów maszyn i urządzeń*. Patent PL 232 114, Zgłoszenie nr 421 490 z dn. 04.05.2017

# ANALÝZA PRUŽNÉ DEFORMACE ZA VYUŽITÍ IR NDT

**Václav STRAKA**, "TMV SS" spol. s r.o., Praha [1]
**David KUBOŠ**, "TMV SS" spol. s r.o., Praha [2]
**Pavel PETRÁŇ**, "TMV SS" spol. s r.o., Praha [3]
**Mikoláš CHOURA**, "TMV SS" spol. s r.o., Praha [4]

**Anotace:**

Termografie je ve valné míře používána pro detekci a kvantifikaci teplotních polí v oblasti prediktivní údržby, ať již se jedná o elektrotechnické, stavební, strojní či jiné aplikace. Obvykle jsou kvantifikovány zdánlivé teploty vztažené k provozním podmínkám diagnostikovaného prvku. Takový postup je zaveden, nicméně je též využíván postup nazývaný souhrnně IR NDT, nebo také „aktivní termografie“. V rámci tohoto postupu je objekt excitován externím zdrojem energie, ať již ve formě jednotlivého pulzu (pulse-phase-thermography) nebo ve formě periodicky se opakujícího signálu (lock-in-thermography). Tyto postupy umožňují detekovat nejen nehomogenity na povrchu, ale i uvnitř testovaného objektu, ale současně zobrazit teplotní projevy hluboko pod vlastní citlivostí termografické kamery. Metoda „lock-in“ bude popsána nejprve teoreticky a následně představena na příkladu analýzy pružné deformace.

**Annotation:**

Thermography is widely used for the detection and quantification of temperature fields in the field of predictive maintenance, whether it concerns electrical, construction, mechanical or other applications. Usually, apparent temperatures are quantified in relation to the operating conditions of the diagnosed object of interest. Such a procedure is established, however, a procedure collectively called IR NDT, or “active thermography”, is also used. Within the framework of this procedure, the object is excited by an external energy source, either in the form of a single pulse (pulse-phase-thermography) or in the form of a periodically repeating signal (lock-in-thermography). These procedures allow to detect not only inhomogeneities on the surface, but also inside the tested object, but at the same time to display temperature manifestations deep below the sensitivity of the thermographic camera. The “lock-in” method will be described first theoretically and then presented on the example of elastic deformation analysis.

(úplný text příspěvku nebyl autory do termínu uzávěrky sborníku konference zaslán)

[1] Ing. Václav Straka, CTD
"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. David Kuboš, CTD
e-mail: david.kubos@tmvss.cz
[3] Pavel Petráň, CTD
e-mail: pavel.petran@tmvss.cz
[4] Bc. Mikoláš Choura, CTD
e-mail: mikolas.choura@tmvss.cz

# PROSTŘEDKY MONITORINGU VÝKONOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

**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:**

Transformátory, ve všech svých variantách, jsou klíčovou součástí výroby, přenosu, distribuce i spotřeby elektrické energie. V souladu s koncepty prediktivní, stavové či rizikově orientované údržby je kladen stále větší důraz na znalost aktuálního stavu stroje společně s detekcí prvních příznaků rozvíjejících se poruch. Příspěvek se zaměřuje na metody on-line monitoringu těchto strojů, ať již z hlediska elektrických příznaků, tak projevů, která jsou spíše vztaženy ke změně chemického složení izolačního systému. Příspěvek je založen na zhruba 400 instalacích monitorovacích systémů v rámci ČR a SR.

**Annotation:**

Transformers, in all their variants, are a key part of the generation, transmission, distribution and consumption of electrical energy. In accordance with the concepts of predictive, condition or risk-based maintenance, increasing emphasis is placed on knowledge of the current state of the machine together with the detection of the first symptoms of developing faults. The paper focuses on methods of on-line monitoring of these machines, both in terms of electrical symptoms and manifestations that are more related to changes in the chemical composition of the insulation system. The paper is based on approximately 400 installations of monitoring systems within the Czech Republic and Slovakia.

(úplný text příspěvku nebyl autory do termínu uzávěrky sborníku konference zaslán)

[1] Ing. Václav Straka, CTD
"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, CTD
e-mail: pavel.zitek@tmvss.cz
[3] Ing. Antonín Krňoul
e-mail: antonin.krnoul@tmvss.cz

# „KOUZELNÉ“ TEPELNĚ IZOLAČNÍ A REFLEXNÍ NÁTĚRY - MÝTY A PRAXE Z POHLEDU TERMOGRAFIE

**Štěpán SVOBODA**, SpektraVision s.r.o., Nupaky [1]

**Anotace:**

V poslední době se také z důvodu vyšších cen energií hovoří o možných cestách k jejich úspoře. To dává prostor pro vývoj a výzkum nových technických prostředků a materiálů, které mnohdy přinášejí požadovaný efekt. Bohužel to ale dává prostor také různým dalším podnikavcům nabízejícím někdy i zavádějící či nefunkční řešení. Příspěvek poodhaluje funkčnost a způsoby prezentace některých tepelně izolačních / reflexních nátěrových hmot.

(úplný text příspěvku nebyl autorem do termínu uzávěrky sborníku konference zaslán)

[1] Ing. Štěpán Svoboda, CTD
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
http://www.spektravision.cz/

# DETEKCE POVÝSTŘELOVÝCH ZPLODIN POMOCÍ METOD INFRAČERVENÉHO NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ

# DETECTION OF GUNSHOT RESIDUE BY INFRARED NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS

**Michal ŠVANTNER**, Západočeská univerzita v Plzni, NTC [1]
**Milan HONNER,** Západočeská univerzita v Plzni, NTC [2]
**Alexey MOSKOVCHENKO,** Západočeská univerzita v Plzni, NTC [3]
**Lukáš MUZIKA,** Západočeská univerzita v Plzni, NTC [4]
**Martin VALENTA,** Kriminalistický ústav Policie České republiky [5]
**Rudolf VÁVRA,** Kriminalistický ústav Policie České republiky [6]

**Anotace:**

Příspěvek se zaměřuje na problematiku detekce povýstřelových zplodin (GSR, Gunshot Residue) v blízkosti průstřelu pomocí metod infračerveného nedestruktivního testování (IRNDT, Infrared Non-Destructive Testing). Analýza GSR představuje významný aspekt forenzního vyšetřování a hraje důležitou roli při rekonstrukci místa činu, zejména při určování vzdálenosti střelby. V příspěvku jsou hodnoceny výhody a nevýhody stávajících metod detekce GSR a je představen potenciál aktivní infračervené termografie jako perspektivního přístupu. Jsou popsány použité termografické IRNDT metody a jsou prezentovány výsledky provedených experimentů. Hlavní oblasti výzkumu jsou optimalizace IRNDT metod a postupů z pohledu hardwarové konfigurace, postupu inspekce, způsobu vyhodnocení, vizualizace dat a jejich kvantifikace. Cílem je vývoj metody a postupu pro rychlou, bezkontaktní a nedestruktivní detekci GSR a vizualizaci jejich charakteristických rozptylových obrazců v okolí průstřelu.

Tato práce je realizována v rámci projektu č. VK01010037 "Metodika rychlé bezkontaktní a nedestruktivní detekce zplodin výstřelu," podporovaného Ministerstvem vnitra České republiky v rámci programu OPSEC (01/2023-12/2025).

[1] Ing. Michal Švantner, Ph.D., CTD
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://www.ntc.zcu.cz/cs/
[2] prof. Ing. Milan Honner, Ph.D., CTD
tel.: +420 377 634 720, mobil: +420 606 522 406, e-mail: honner@ntc.zcu.cz
[3] Mgr. Alexey Moskovchenko
e-mail: alexeym@ntc.zcu.cz
[4] Ing. Lukáš Muzika, Ph.D., CTD
tel.: +420 377 634 822, e-mail: muzika@ntc.zcu.cz
[5] Ing. Martin Valenta
Kriminalistický ústav Policie České republiky
Strojnická 27, 170 89 Praha
e-mail: martin.valenta@pcr.cz
[6] Ing. Rudolf Vávra
e-mail: rudolf.vavra@pcr.cz

**Annotation:**

The contribution addresses the issue of detecting gunshot residue (GSR, Gunshot Residue) near bullet holes using infrared non-destructive testing methods (IRNDT, Infrared Non-Destructive Testing). GSR analysis is a significant aspect of forensic investigations, playing a crucial role in reconstructing crime scenes, especially in determining shooting distances. The paper evaluates advantages and disadvantages of existing GSR detection methods, and introduces the potential of active infrared thermography as a promising approach. The IRNDT methods used in this study are described in the contribution and results of conducted experiments are presented. Key research goals of the research are optimization of IRNDT methods and procedures in terms of hardware configuration, inspection procedure, data evaluation, visualization of results, and their quantification. The research aims to develop methods and procedures for rapid, non-contact, and non-destructive GSR detection and visualization of their characteristic scattering patterns near the bullet holes.

This work is conducted as part of project No. VK01010037 "Methodology of Fast Non-Contact and Non-Destructive Detection of Gunshot Residue," supported by the Ministry of the Interior of the Czech Republic under the OPSEC programme (01/2023-12/2025).

(úplný text příspěvku nebyl autory do termínu uzávěrky sborníku konference zaslán)

# TRIBODIAGNOSTIKA MOTOROVÝCH OLEJŮ

# TRIBOTECHNICAL DIAGNOSTICS OF ENGINE OILS

**Ondřej ŠVEC**, TRIFOSERVIS s.r.o., Čelákovice [1]

**Anotace:**

Tribotechnická diagnostika je jednou z metod bezdemontážní technické diagnostiky využívající maziva jako media pro získání informací o dějích a mechanických změnách v technických systémech, u nichž jsou maziva aplikována. Jejím posláním je zjišťovat, vyhodnocovat a oznamovat výskyt cizích látek v mazivu, a to jak z hlediska kvantitativního, tak i kvalitativního. Vhodná interpretace výsledků z provedených zkoušek umožňuje nejen včasně upozornit na příznaky vznikající poruchy, ale v řadě případů umožní i lokalizaci místa vzniku mechanické závady. Pro motory vozidel toto platí ještě více, kdy jsme rozborem oleje schopni diagnostikovat přímé poškození konkrétních dílů.

**Annotation:**

Tribotechnical diagnostics is one of the methods of non-disassembly technical diagnostics using lubricants as media for obtaining information about events and mechanical changes in technical systems in which lubricants are applied. Its mission is to detect, evaluate and report the occurrence of foreign substances in the lubricant, both from a quantitative and qualitative point of view. Appropriate interpretation of the results of the tests performed allows not only to timely warn of the symptoms of an emerging failure, but in many cases also to localize the place of occurrence of a mechanical defect. This is even more true for vehicle engines, where we are able to diagnose direct damage to specific parts by analyzing the oil.

## 1 Úvod

Význam tribotechnické diagnostiky spočívá v tom, že je účinným a objektivním nástrojem sledování procesu opotřebení mechanických systémů s předpokladem vhodného využívání maziv.

## 2 Metody tribotechnické diagnostiky

Rozhodujícím faktorem pro TTD je rychlost a přesnost provedeného rozboru. Pro hodnocení bylo vypracováno mnoho metod s různým stupněm použitelnosti. Jednotlivé druhy můžeme rozdělit do třech skupin:

[1] Ondřej Švec, DiS., CTD
prezident ATD ČR, z.s.
TRIFOSERVIS s.r.o.
Sokolovská 1644, 250 88 Čelákovice
tel.: +420 603 265 565, mobil: +420 737 388 729, e-mail: info@trifoservis.cz, http://www.trifoservis.cz/

1. ***Jednoduché zkoušky pro provozní kontrolu maziv***
2. ***Standartní zkoušky pro přesné stanovení kvality maziv (převážně ČSN)***
3. ***Speciální metody pro celkovou diagnostiku maziv a strojního zařízení***

## 3 Odběr vzorku

Vzorek musí představovat průměrné složení používaného maziva ve strojním zařízení. Pro odběr vzorku je vypracováno několik základních postupů, které jsou zakotveny v ČSN.

Všeobecně se vzorky odebírají do čistých vzorkovnic o obsahu 300 ml. Strojní zařízení musí být v provozu minimálně 20 minut z důvodu dokonalého promíchání a prohřátí oleje na provozní teplotu. Pak odpustíme cca 500 ml oleje do čisté nádoby a nalijeme zpět do zařízení. Po propláchnutí odběrných zařízení provedeme odběr cca 200 ÷ 250 ml oleje. Odebraný vzorek popíšeme a předáme ke zkoušce. Popis vzorku musí být přesný a čitelný.

Na odběru vzorku závisí výsledek diagnostiky, a proto je nutné věnovat odběru mimořádnou pozornost.

## 4 Hodnocení olejů

Po odběru vzorku oleje je nutné provést jeho předběžnou vizuální kontrolu, kdy posuzujeme:

- ***barvu oleje***
- ***přítomnost volné a vázané vody***
- ***viditelné mechanické nečistoty***
- ***zápach oleje (zředění palivem, přepálený olej apod.)***

Dále podrobíme olej laboratorním testům. Zde už dělíme oleje podle jejich použití. Základní rozdělení je na oleje motorové, průmyslové a speciální. Doporučené mezní jakostní ukazatele je nutné posuzovat velmi pečlivě a pro jednotlivá strojní zařízení je dále případně rozšiřovat. Hodnoty, které se doporučují sledovat, vycházejí z dlouholetých provozních zkušeností. Uvedené parametry je nutné považovat za doporučené pro všeobecnou orientaci a nebrat je dogmaticky pro všechna zařízení a oleje.

Limitní ukazatele a sledované hodnoty pro motorové oleje přináší tabulka 1.

## 5 Závěr

Jednoznačně lze TTD ve všech provozech hodnotit jako velice významnou. Je však třeba vždy určit, co je nutné předně hodnotit a co nám získané výsledky rozborů olejů řeknou. Nelze provádět diagnostiku bez podrobnějšího rozboru provozních podmínek jednotlivých strojů a zařízení.

Tribotechnická diagnostika je významný obor, který přináší značné ekonomické přínosy, a proto je ve všech technicky vyspělých státech značně využíván.

Zavedení tribotechnické diagnostiky přináší podrobné znalosti o mazivech i strojích a vnáší tak pořádek do údržbářských služeb.

Tab.1 Limitní ukazatele a sledované hodnoty pro motorové oleje

| | Benzinové motory | Naftové motory |
|---|---|---|
| Viskozita<br>- zvýšení<br>- snížení | <br>max. o 20%<br>max. o 15% | <br>max. o 25%<br>max. o 20% |
| Obsah paliva | max. 5% | max. 5% menší motory<br>max. 7% velké motory |
| Bod vzplanutí | min. 140 ºC | min. 200 ºC menší motory<br>min. 170 ºC velké motory |
| Karbonizační zbytek (CCS) | max. 4% hm. | max. 4% hm. |
| Látky nerozpustné v HEO | max. 1,5% hm. | max. 2,5% hm. |
| Obsah vody | max. 0,2% hm. | max. 0,2% hm. |
| Obsah glykolu | negativní | negativní |
| TBN | min. 3 mg KOH.$g^{-1}$ | min. 2,5 mg KOH.$g^{-1}$ |
| Kapková zkouška | orientační | orientační |
| | | |
| Zbytkové prvky<br><br>Fe<br>Al<br>Cu<br>Pb<br><br>Si | <br><br>max. 100 mg.$kg^{-1}$<br>max. 40 mg.$kg^{-1}$<br>max. 40 mg.$kg^{-1}$<br>max. 40 mg.$kg^{-1}$<br>*(pro bezol. benzin)*<br>max. 20 mg.$kg^{-1}$ | <br><br>max. 100 mg.$kg^{-1}$<br>max. 40 mg.$kg^{-1}$<br>max. 40 mg.$kg^{-1}$<br>max. 40 mg.$kg^{-1}$<br><br>max. 20 mg.$kg^{-1}$ |

# VÝVOJ SPECIALIZOVANÝCH IR KAMER PRO OPTIMALIZACI TECHNOLOGIE 3D TISKU PLASTŮ

# SPECIALIZED IR CAMERAS DEVELOPMENT FOR OPTIMIZATION OF 3D PRINTING TECHNOLOGY OF PLASTIC

**Zdeněk VESELÝ**, Západočeská univerzita v Plzni, NTC [1]
**Vladislav LANG**, Západočeská univerzita v Plzni, NTC [2]
**Jiří TESAŘ**, Západočeská univerzita v Plzni, NTC [3]

**Anotace:**

3D tisk z plastových filamentů (FLM) je moderní aditivní technologií, která je využívána při výrobě prototypů a malosériové výrobě. Jejím použitím je možné vytvářet prostorově složité a jiným způsobem obtížně vyrobitelné díly. Hlavní výhodou FLM procesu je flexibilní a snadná systémová technologie, která je je široce přínosná díky obrovské rozmanitosti tisknutelných materiálů. Její nevýhodou je omezená mechanická pevnost dílů ve směru tisku, z tohoto důvodu není tato technologie využívána pro mechanicky namáhané funkční díly.

IR termodiagnostiku procesu 3D tisku lze využívat pro monitorování tiskového procesu, zejména ke sledování teploty v tiskové zóně a pro kontrolu kvality z pohledu diagnostiky tiskových defektů. S využitím online monitorování teploty, simulačního modelu procesu a dalších aktivit je vyvíjen postup vedoucí ke zvýšení pevnosti tištěných dílů. Jeho základem je nalezení korelace mezi parametry tiskového procesu, teplotou v tiskové zóně a mechanickou pevností dílů. Jedním z cílů je vývoj IR měřicího systému pro lokální a globální termodiagnostiku procesu 3D tisku plastů. Uvedená problematika je řešena v rámci projektu OPTHERM v programu INTERREG Bavorsko - Česko 2021 - 2027 ve spolupráci týmu ZČU NTC v Plzni a OTH LMP v Regensburgu.

(úplný text příspěvku nebyl autory do termínu uzávěrky sborníku konference zaslán)

[1] Ing. Zdeněk Veselý, Ph.D., CTD
Západočeská univerzita v Plzni, Nové technologie - výzkumné centrum
Univerzitní 8, 301 00 Plzeň
tel.: +420 377 634 832, mobil: +420 605 987 635, e-mail: zvesely@ntc.zcu.cz, https://irt.zcu.cz/cs/
[2] Ing. Vladislav Lang, Ph.D., CTD
tel.: +420 377 634 717, e-mail: vlang@ntc.zcu.cz
[3] Ing. Jiří Tesař, Ph.D., CTD
tel.: +420 377 634 828, e-mail: tesar@ntc.zcu.cz

# ANALÝZA OPOTREBOVANIA OBRÁBACIEHO STROJA POMOCOU VIBRODIAGNOSTIKY

# VIBRODIAGNOSTICS WEAR ANALYSIS OF A MACHINE TOOL

**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]
**Zdenko TKÁČ**, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF [4]
**Juraj JABLONICKÝ**, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF [5]
**Martin KOTUS**, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF [6]
**Miroslav ČURGALI**, DT Transport, s.r.o., Nitra, Slovensko [7]

**Anotácia:**

Vibrodiagnostika slúži na monitorovanie a detekciu stavu strojných zariadení, kde je možné lokalizovať ich poruchu a následné vyvodiť konkrétne závery. Príspevok poskytuje ucelený obraz o súčasnom stave využívania vibrodiagnostických zariadení a realizáciu takéhoto spôsobu diagnostiky na zvolenom strojnom zariadení a to frézovacie obrábacie centrum SW BA 400 a vertikálny sústruh Famar TANDEM 200. Použité vibrodiagnostické zariadenia boli vibračný senzor VSA005 IFM s vyhodnocovacou jednotkou VSE100 IFM so softvérom IFM Efector Octavis. Výsledkom analýzy je monitorovanie nástroja MAPAL, analýza procesu sústruženia a vyhodnotenie kolíznych stavov samotného procesu.

**Annotation:**

Vibrodiagnostics is used for monitoring and detection of machinery condition, where it is possible to localize their failure and subsequently draw specific conclusions. The paper presents a comprehensive outline of the current state of vibrodiagnostic devices use

[1] Ing. Zoltán Záležák, PhD.
Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Technická fakulta, Ústav konštruovania a stroj. 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, https://uniag.sk/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] prof. Ing. Zdenko Tkáč, PhD.
Ústav poľnohospodárskej techniky, dopravy a bioenergetiky
tel.: +421 37 641 4530, e-mail: zdenko.tkac@uniag.sk
[5] prof. Ing. Juraj Jablonický, PhD.
Ústav poľnohospodárskej techniky, dopravy a bioenergetiky
tel.: +421 37 641 4611, e-mail: juraj.jablonicky@uniag.sk
[6] doc. Ing. Martin Kotus, PhD.
Ústav konštruovania a strojárskych technológií
tel.: +421 37 641 5689, +421 37 641 5698, e-mail: martin.kotus@uniag.sk
[7] Ing. Miroslav Čurgali, PhD.
DT Transport, s.r.o.
Štefánikova Trieda 74/50, 949 01 Nitra, Slovenská republika
tel.: +421 903 284 934, e-mail: miroslav.curgali@transdev.com

and the application of this diagnostic method to selected machinery, namely to the milling machining center SW BA 400 and the vertical lathe Famar TANDEM 200. The vibrodiagnostic device used was the VSA005 IFM vibration sensor with the VSE100 IFM evaluation unit containing the IFM Efector Octavis software. The result of the analysis is the MAPAL tool monitoring, analysis of the turning process and evaluation of collision states of the process itself.

## 1 Úvod

Základ monitorovania technického stavu strojných zariadení je v meraní charakteristických veličín mechanického kmitania a v súčasnom porovnávaní jeho koncovými výsledkami s limitnými hodnotami, určenými výrobcom, technickými normami alebo na základe dlhotrvajúceho pozorovania technického strojového zariadenia. [1]

Vibrácie strojných zariadení súvisia so stavom prevodoviek, ložísk a taktiež opotrebovaním jednotlivých častí strojov. Poskytnutie informácií o prevádzkovom a technickom stave je hlavným cieľom sledovania vibrácií za zámerom zabezpečenia strategického plánovania a riadenia údržby. Hodnotenie priebehu a stavu vibrácií počas celej jeho prevádzky je neoddeliteľnou súčasťou tohto celého procesu. Medzi najčastejšie základné veličiny na hodnotenie vibrácií patria frekvencia, perioda a amplituda. Pre spracovanie dát z meraní sa používajú dva druhy analýz, a to: analýza v časovej oblasti a analýza vo frekvenčnej oblasti. [6]

## 2 Materiál a metódy

Prvým monitorovaným strojným zariadením bolo vysoko výkonné frézovacie obrábacie centrum SW BA 400 (obr.1a) pozostávajúce z dvoch obrábacích vretien s dvoma plnohodnotnými otočnými stolmi. Obrábacie centrum je určené pre strednú a veľko sériovú výrobu zložitých komponentov vysokej kvality s možnosťou mokrého alebo suchého obrábania.

a) b)

Obr.1 Monitorované strojné zariadenia: a) SW BA 400, b) Famar Tandem 200

Druhým monitorovaným strojným zariadením bol Vertikálny sústruh Famar Tandem 200 (obr.1b) určený na sústružnícke operácie s dvomi plnohodnotnými nezávislými obrábacími komorami, kde je možné dosahovať štandardne vysoké produkčné množstvá.

Sústružnícky stroj s kompletným obrábaním toho istého prvku v dvoch fázach umožňuje obrábanie dvoch rôznych prvkov súčasne.

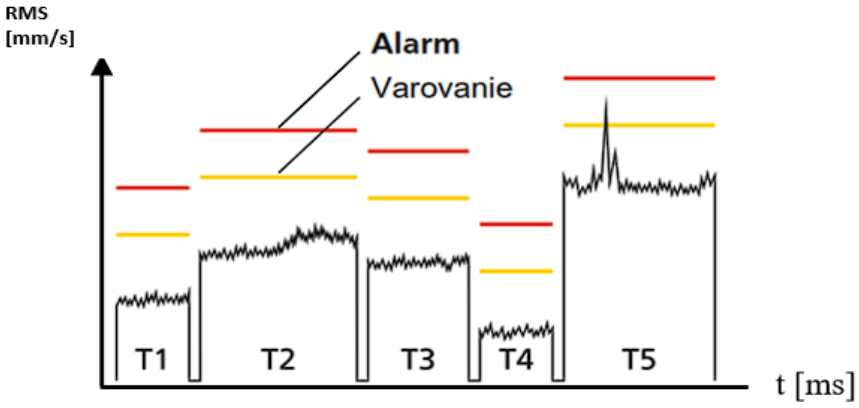
Monitorovanie procesu musí byť plne prispôsobené podľa normy STN ISO 17243, ktorú možno použiť ako hodnotiace kritérium pre meranie vibrácií vretien obrábacích strojov a na detekciu opotrebovania sklučovadla. Na rozdiel od STN ISO 10816 je frekvenčný rozsah pre monitorovanie vretena širší, 10 až 5 000 Hz. Dôvodom tohto frekvenčného rozsahu sú frekvencie, ktoré majú najväčší vplyv na vreteno stroja. Na zníženie vplyvu stroja na monitorovanie stavu vretena na minimum je potrebný referenčný chod.

Na frézovacom obrábacom centre SW BA 400 nastávalo časté poškodzovanie špeciálneho nástroja MAPAL pre výrobu vysoko presného otvoru ojničného čapu. Poškodzovanie bolo vykazované 4 - 6 krát za mesiac. Mesačné priemerné náklady súvisiace s daným poškodením predstavovali niekoľko násobne vyššie hodnoty jako je jeho cena a preto sa rozhodlo vykonávať analýzu pomocou vibrodiagnostiky.

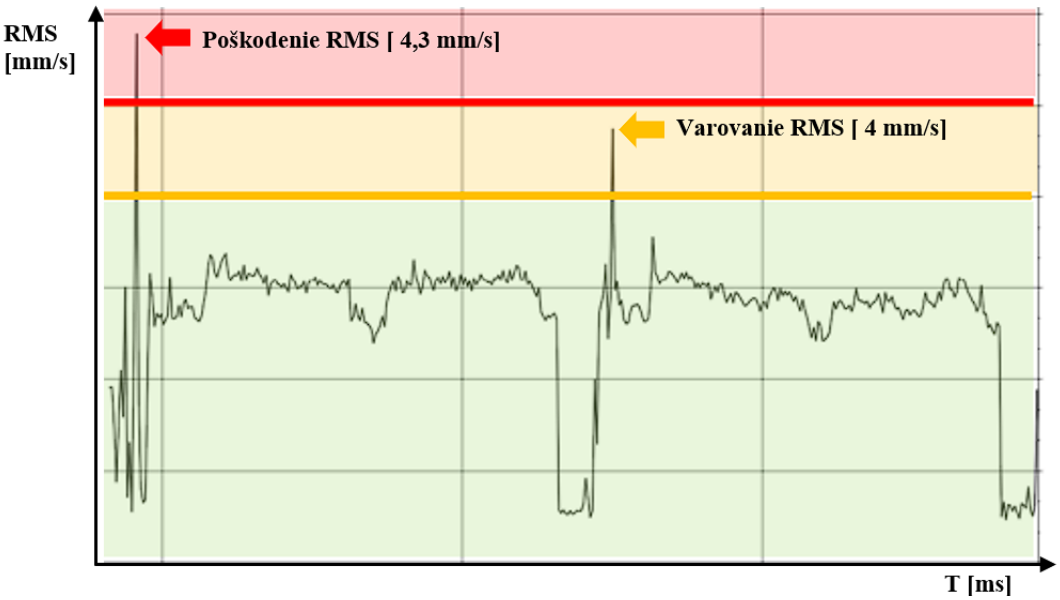
Obr.2 Detail miesta poškodenia nástroja MAPAL

Na monitorovanie bol využitý parameter RMS, pomocou ktorého je možné presne sledovať priebeh procesu, kde žltá čiara zobrazuje limitné hodnoty pre varovanie a červená čiara zobrazuje prekročenie kritickej hodnoty (obr.3). Program, kde boli nastavené parametre, predstavoval systém Efektor Octavis. V ňom boli pre nástroj MAPAL nastavený parameter SP_2_Mapal 29, konkrétne v-RMS. Tento parameter je dôležitý, pretože označuje ekvivalentnú ustálenú energetickú hodnotu oscilačného signálu v definovanom časovom intervale.

Pre vyhodnocovanie bol najprv spustený výrobný proces na ukážku s poškodeným nástrojom pre názorné zobrazenie procesu výroby. Z grafického zobrazenia (obr.4) je možné vidieť presiahnuté limitné hodnoty RMS [4 mm/s] pre varovanie a RMS [4,3 mm/s] pre poškodenie nástroja. V prípade zobrazenia varovného signálu na operačnom panely stroj dokončí výrobný cyklus pre jeden diel a následne dôjde k odstaveniu procesu tak, aby ho bolo možné opätovne spustiť len za prítomnosti zoraďovača. Takýmto postupom je možné zamedziť neodbornému posúdeniu nástroja a tým pádom jeho opätovnému poškodeniu, čo má za následok výmenu za nový nástroj.

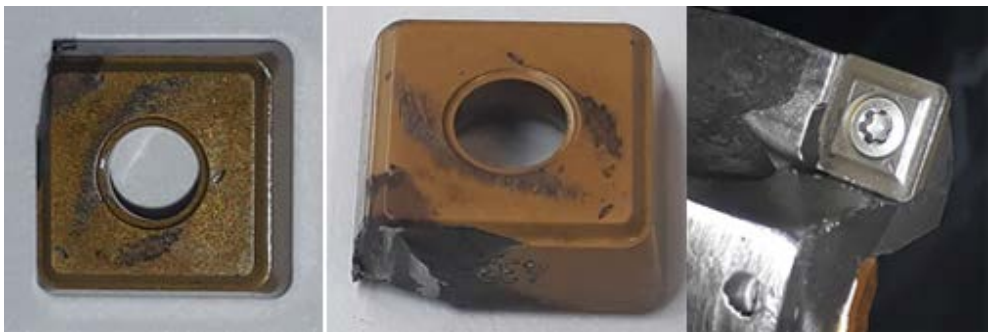



Obr.3 Charakteristika hraničných hodnôt nástrojov SW BA 400



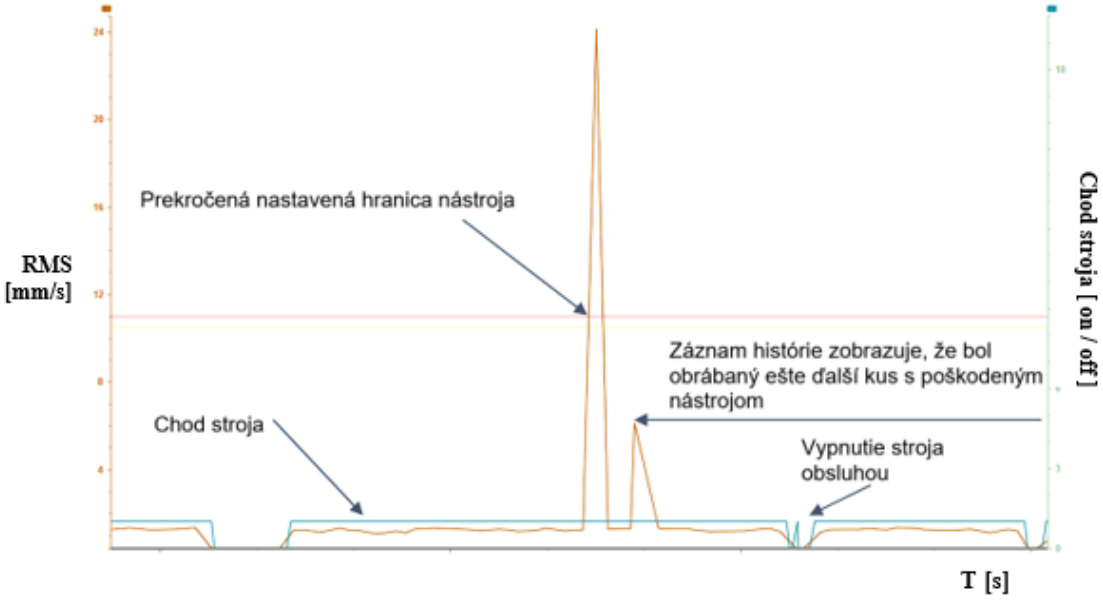

Obr.4 Grafický priebeh monitorovania stroja SW BA 400

Dôvodom monitorovania na sústružníckom obrábacom centre Famar TANDEM 200 bolo, že pri procese sústruženia deleného kľukového hriadeľa pre motor KTM typ LC8 vzniká prerušovaný rez, ktorý spôsobuje veľké zaťaženie na mechanickú sústavu pohybových osí. Práve nesprávne nastavenie rezných parametrov obrábania a intervalu výmeny rezného plátku môže dochádzať k poškodeniu geometrie strojného zariadenia, čo má za následok výrobu nezhodných výrobkov. Ukážku poškodeného rezného plátu je možné vidieť na obr.5.



Obr.5 Poškodenie rezného plátu stroja Famar TANDEM 200

Na monitoravanie sa využil parameter RMS, pomocou ktorého je možné presne monitorovať priebeh procesu podobne ako pri stroji SW BA 400. Program, kde boli nastavené parametre, predstavoval systém Efektor Octavis. V ňom boli pre nástroj T1 nastavený parameter T1_RMS, konkrétne v-RMS. Tento parameter je dôležitý na označenie ekvivalentnej ustálenej energetickej hodnoty oscilačného signálu v definovanom časovom intervale. Z výsledkov monitorovania je možné vidieť presiahnuté limitné hodnoty RMS [4,5 mm/s] pre varovanie a RMS [7,1 mm/s] pre poškodenie nástroja T1. Z grafického zobrazenia (obr.6) je vidieť záznam z jednej 12 hodinovej pracovnej smeny, kde výrobný proces prekročil kritickú hodnotu raz.




Obr.6 Podrobná analýza procesu sústruženia

Na základe týchto informácií z procesu monitorovania boli zavedené nápravné opatrenia v programe, aby v prípade prekročenia limitních hodnôt stroj okamžite ukončil obrábací proces. Operátor tým pádom môže včas skontrolovať stav nástroja a rozhodnúť o jeho ďalšom používaní alebo výmene nástroja.

## 3 Záver

Vibrodiagnostiku je vždy potrebné chápať ako zmysluplnú diagnostickú metódu, ktorá má svoje uplatnenie pri analýze rotačních častí strojov. Príspevok poukazuje práve na správnu aplikáciu vibrodiagnostiky na konkrétnych častiach výrobných obrábacích strojov. Monitorovanie pomocou vibrodiagnostiky na frézovacom obrábacom centre SW BA 400 bola vykonaná pomocou zariadenia s vibračným senzorom VSA005 IFM, vyhodnocovacej jednotky VSE100 IFM a softvéru Efector Octavis od firmy IFM. Na analýzu špeciálneho nástroja MAPAL bola inštalovaná diagnostická jednotka, pomocou ktorej sa zjistilo, že je nesprávny priemer brúseného hriadeľa a nesprávne upnutý kus boli príčinou problému. Predchádzať tomuto vzniknutému problému je potrebné neustále sledovať proces výroby na obrábacom centre.

Na druhom sústružníckom obrábacom centre Famar TANDEM 200 bolo monitorovaním pomocou vibrodiagnostiky zistené, že dochádza k veľkému zaťaženiu na mechanickú sústavu pohyblivých osí. Problémom boli zle nastavené parametre a ak sa nedodržia intervaly výmeny rezného plátku môze dochádzať k poškodeniu geometrie vretena stroja. Predchádzať tomuto vzniknutému problému je taktiež potrebné neustále sledovať proces výroby na obrábacom centre. Všetky tieto nápravné opatrenia prispievajú k znižovaniu nákladov při zbytočnej výmene napr. nástrojov príp. Iných častí strojov a zariadení.

**Poďakovanie:**

Tento príspevok vznikol v spolupráci s TD Transport s.r.o., Nitra ako prepojenie výskumnej činnosti Technickej fakulty SPU v Nitre s opravárenskou praxou v doprave.

**Literatúra:**

[1] Blata, J., Bérešová, A. Možnosti identifikace projevů nesuososti na experimentálním zařízení. In *Kvalita, technológie, diagnostika v technických systémoch*. 1. vyd. 253 s. ISBN 978-80-552-1506-8. . Nitra : Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2016, s. 180-184

[2] Majdan, R., Zubčák, T., Abrahám, R., Olejár, M. Identifikácia vibrácií traktora generovanými špeciálnymi lopatkovými hnacími kolesami. In *Spravodaj ATD SR*. ISSN 1337-8252, 2021, roč. 18, č. 1, s. 9-15

[3] Tokovska, M., Zaťková, T. Š., Jamborová, Ľ. (2022). Digital competencies development in higher education institutions: A mixed methods research study. In *Emerging Science Journal, 6* (Special Issue), 150-165.10.28991/ESJ-2022-SIED-011

[4] Vánik, M., Čurgaliová, G., Kosiba, J. Riadiaci obvod dopravníkového systému. In *Najnovšie trendy v poľnohospodárstve, v strojárstve a v odpadovom hospodárstve*. 1. vyd. 237 s. ISBN 978-80-552-2326-1. . Nitra : Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2021, s. 214-220

[5] Žarnovský, J., Kováč, I., Mikuš, R., Fries, J., Mošať, M. Vibration diagnostics of CNC machining center spindle. In *Manufacturing Technology*. ISSN 1213-2489, 2019, vol. 19, no. 2, s. 350-356. Dostupné na internete: https://doi.org/10.21062/ujep/295.2019/a/1213-2489/MT/19/2/350.

[6] Žarnovský, J., Vitula, V., Výžinkár, M. Návrh funkčného modelu na meranie vibrácií. In *Kvalita, technológie, diagnostika v technických systémoch*. 1. vyd. 129 s. ISBN 978-80-552-1835-9. . Nitra : Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2018, s. 122-129

# ANALÝZA SPOĽAHLIVOSTI STROJNÝCH ZARIADENÍ VYUŽÍVANÝCH V KAMEŇOLOME

# RELIABILITY ANALYSIS OF MACHINERY EQUIPMENT USED IN A STONE QUARRY

**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]
**Martin BARÁTH**, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF [4]
**Lukáš BOJO**, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, TF [5]

**Anotácia:**

Cieľom príspevku je analyzovať spoľahlivosť vibračných triediačov vyrábaných na zákazku pre konkrétneho odberateľa. Vibračné triediče sa využívajú ako strojné zariadenia v kameňolomoch. Analýzou chceme identifikovať prípadné problémy, ktoré ovplyvňujú účinnosť a životnosť triediačov. Experimenty sa zamerajú na formulovanie konkrétnych výstupov podľa požiadaviek zákazníka a na základe získaných experimentálnych analýz je možné vysloviť hypotézy, ktoré môžu byť implementované do výroby s cieľom zvýšiť spoľahlivosť týchto vibračných triediačov.

**Annotation:**

The aim of the paper is to analyze the reliability of vibrating screeners manufactured to order for a specific customer. Vibratory screeners are used as machinery in quarries. By the analysis, we want to identify possible problems that affect the efficiency and longevity of the sorters. The experiments will focus on formulating specific outputs according to customer requirements and based on the obtained experimental analyses, it is possible to formulate hypotheses that can be implemented in production in order to improve the reliability of these vibratory screeners.

## 1 Úvod

V súčasnej dobe neustáleho technologického pokroku a zvýšenej automatizácie sa strojné zariadenia stávajú kľúčovým pilierom efektívnosti a konkurencieschopnosti

[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] doc. 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] Ing. Martin Baráth, PhD.
e-mail: martin.barath@uniag.sk
[5] Ing. Lukáš Bojo
e-mail: xbojo@uniag.sk

v priemyselných odvetviach. Medzi tieto odvetvia patrí aj ťažobný priemysel, kde zohrávajú kľúčovú úlohu vibračné triediče v kameňolomoch. Tieto sofistikované stroje nie sú len hnacou silou v ťažobnom procese, ale zároveň predstavujú kritické miesto v zabezpečovaní spoľahlivosti a trvanlivosti celého výrobného reťazca.

Analýza spoľahlivosti vibračných triedičov je aktuálna a podstatná, pretože ich efektívnosť pri separácii a triedení surovín z hromád skalných masívov priamo ovplyvňuje výkonnosť celého strojného zariadenia. Presné a spoľahlivé vibračné triediče predstavujú nielen nástroje na optimalizáciu výrobného procesu, ale zároveň prispievajú k znižovaniu nákladov a zvyšovaniu konkurencieschopnosti organizácie.

Pri analyzovaní spoľahlivosti budú realizované merania pomocou špeciálnych meracích zariadení Sensoteq Chi a senzorov Chi, ktoré umožnia získať presné údaje o mechanickom správaní sa triedičov. Vibrácie budú sledované s dôrazom na zrýchlenie vibrácií v kritických bodoch sledovaných vibračných triedičov a odskok materiálu na sitách, ktorý bude analyzovaný na základe senzorov a pomocou magnetických kartičiek pripevnených na triedičoch.

Táto dvojitá kontrola je dôležitá pre správne vyhodnotenie údajov chodu strojného zariadenia. Všetky sledované parametre, ktoré získame v rámci experimentov, budú porovnávané s požiadavkami zákazníka.

## 2 Materiál a metódy

Ako sledované zariadenia v experimente boli vybrané vibračné triediče s označením SJ 1862, obr.1, ktoré sa využívajú v kameňolomoch. Vibračné triediče slúžia na oddelenie drobného materiálu zo vstupu drvičov a na kontrolu hornej zrnitosti materiálu vstupujúceho do magnetických separátorov. Triediče majú kovové alebo nekovové sitové plochy, vysokú účinnosť triedenia s výkonom do 100 $m^3.h^{-1}$ a nenáročnú obsluhu.

Obr.1 Vibračný triedič SJ 1862

Pri sledovaní sme kontrolovali spoľahlivosť troch vibračných triedičov. Zamerali sme sa na najdôležitejšie parametre ako je spektrum zrýchlenia vibrácií v závislosti na frekvencii a odskok materiálu na sitách.

## 2.1 Použité zariadenia

Sensoteq Chi je sada meracích nástrojov so systémom Bluetooth®, ktoré ponúkajú okamžitý prehľad o účinnosti a stave sledovaných zariadení, či už priamo v teréne, pri experimentoch alebo pri kontrolách pred expedíciou k zákazníkovi.

Merací prístroj je určený najmä na sledovanie analýz vibrácii z pohľadu časových priebehov a frekvenčných spektier. Prístroj archivuje údaje o zrýchlení, rýchlosti a posunutí pre každý senzor a archivuje potrebné údaje o vzniknutých prípadných poruchách na ložiskách.

Pri meraní sme použili 3 senzory, ktoré boli vždy pripevnené na bočniciach testovaného triediča. Senzory sa umiestňovali vždy podľa testovacej strany a podľa počtu podlaží, ktoré majú namontované sitá. Ak má triedič 2 podlažia sít, tak snímače sa najprv pripevnia na vrchnú časť bočnice a následne na spodnú.

## 2.2 Sledovanie frekvencii v závislosti na zrýchlení vibrácií

Pred začatím merania bolo potrebné zapojiť vibračný triedič na elektromotor, ktorý bol poháňaný frekvenčným meničom. Následne sme pripevnili magnetické senzory na jednu stranu triediča. Po zapnutí elektromotora sme experimenty uskutočnili až po ustálení chodu zariadenia. Na protiľahlej strane sme mali na triediči pripevnenú gumenú podložku a simulovali sme vibrácie úderom kladiva. Následne senzory zaznamenávali údaje, ktoré sa archivovali do pamäti prístroja. Tento test bol v súlade s požiadavkami zákazníka.

## 2.3 Sledovanie odskoku materiálu na sitách testom stroke

Pri zisťovaní odskoku materiálu na sitách sme na vibračný triedič pripevnili magnetické štítky (obr.2a) podľa požiadaviek výrobcu, ktoré nám slúžili na vizuálne odčítanie údajov. Meranie sme vykonali v dvoch polohách. Pri prvej polohe sa snímače umiestnili na hornú stranu triediča (obr.2b) a následne rovnaké meranie sa vykonalo aj na spodnej strane. Toto meranie sa muselo vykonať dvakrát, keďže daný triedič má dve rôzne sitá, ktoré boli umiestnené vo vrchnej a spodnej časti triediča. Aj pri tomto teste museli byť dodržané podmienky zákazníka.

a)

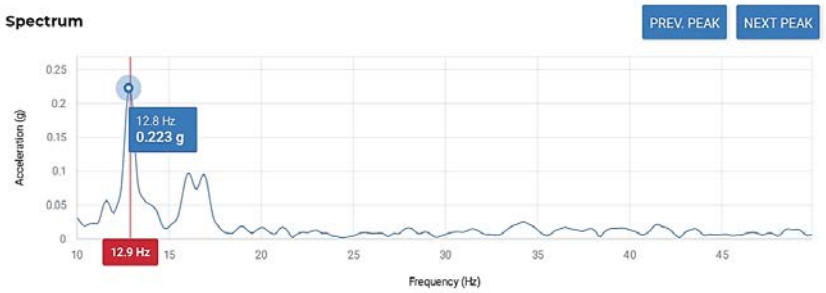
b)

Obr.2 a) magnetické štítky pre kontrolu odskoku materiálu
b) meranie odskoku materiálu pomocou senzorov.

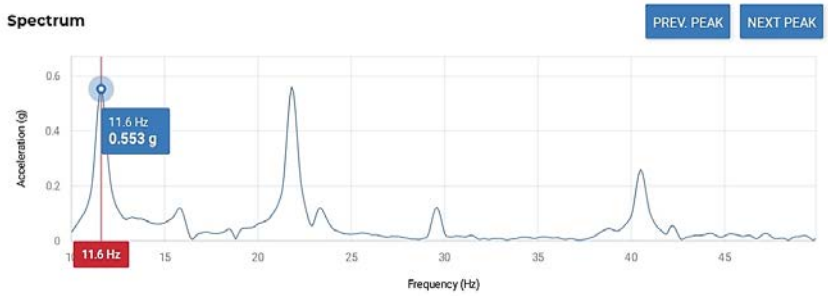
## 3 Výsledky merania

### 3.1 Analýza zrýchlenia vibrácií a frekvencie

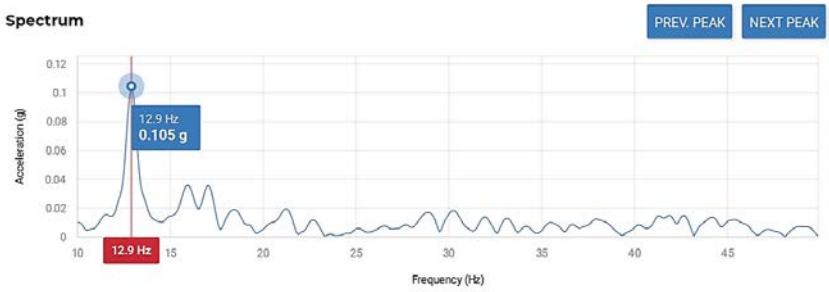
Pri sledovaní zrýchlenia vibrácií v závislosti na frekvencii na vibračnom triediči sme dodržali požiadavky zákazníka, ktoré boli stanovené pri frekvencii v rozsahu 11 - 25 Hz pri testovacej rýchlosti 840 $min^{-1}$. Zrýchlenie vibrácií bolo v rozmedzí 0,09 - 0,9 g pri rovnakej rýchlosti. Prislúchajúce normy a legislatíva týkajúca sa týchto strojných zariadení boli dodržané. Na obr.3 až obr.11 sú zobrazené namerané údaje z troch vibračných triedičoch s označením SJ 1862. Pri každom jednom triediči sme vykonali po tri merania.



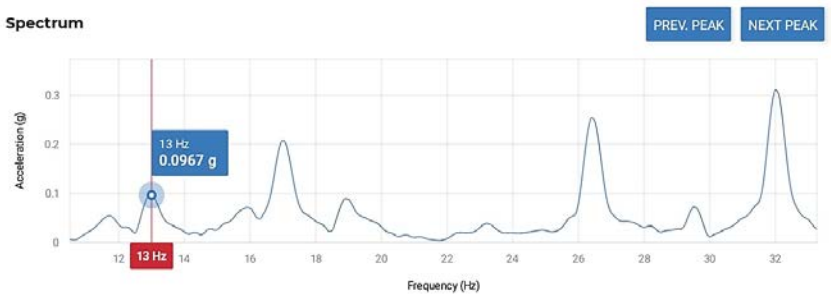

Obr.3 Zariadenie č.1 - spektrum zrýchlenia vibrácií - meranie č.1



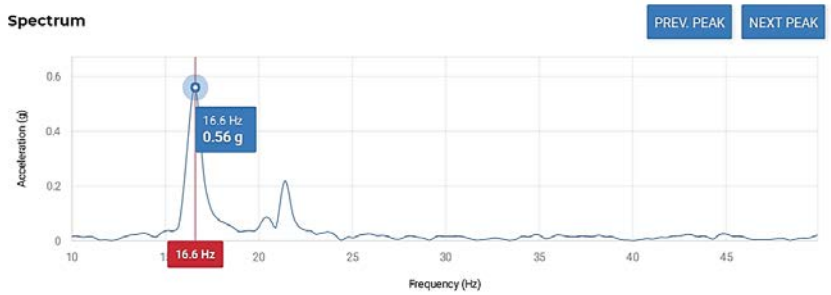

Obr.4 Zariadenie č.1 - spektrum zrýchlenia vibrácií - meranie č.2



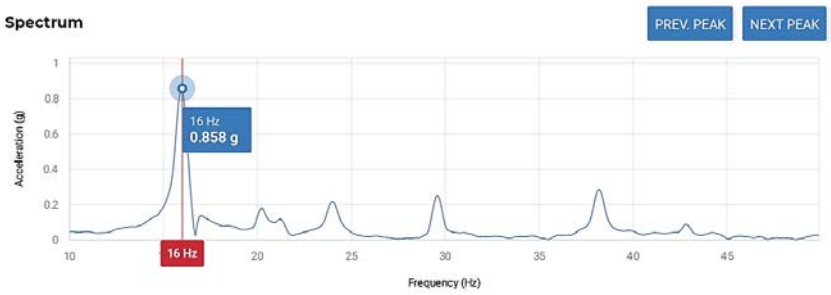

Obr.5 Zariadenie č.1 - spektrum zrýchlenia vibrácií - meranie č.3



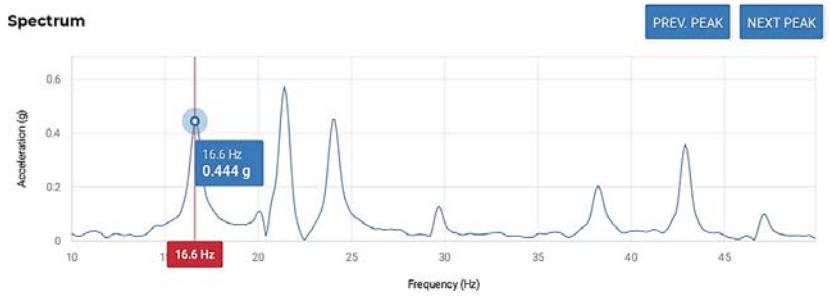

Obr.6 Zariadenie č.2 - spektrum zrýchlenia vibrácií - meranie č.1



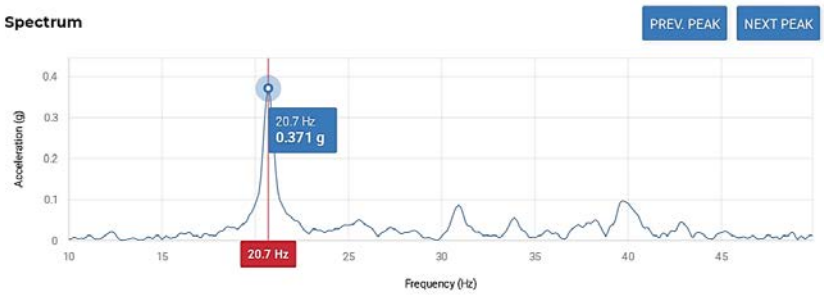

Obr.7 Zariadenie č.2 - spektrum zrýchlenia vibrácií - meranie č.2



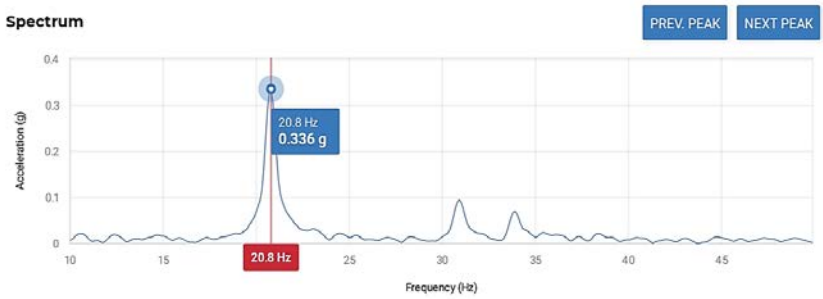

Obr.8 Zariadenie č.2 - spektrum zrýchlenia vibrácií - meranie č.3




Obr.9 Zariadenie č.3 - spektrum zrýchlenia vibrácií - meranie č.1




Obr.10 Zariadenie č.3 - spektrum zrýchlenia vibrácií - meranie č.2




Obr.11 Zariadenie č.3 - spektrum zrýchlenia vibrácií - meranie č.3

### 3.2 Analýza odskoku materiálu na sitách vibračného triediča

Pri testovaní odskoku materiálu na sitách (test stroke) bolo potrebné dodržať hodnoty v rozsahu 8 - 13 mm, čo požadoval zákazník pri dodržaní potrebnej legislatívy.

V tabuľke č.1 sú hodnoty odskoku materiálu, ktoré boli namerané pri teste stroke. Experiment bol vykonaný na troch vibračných triedičoch s označením SJ 1862. Všetky triediče mali rovnaký typ použitých sít.

Tab.1 Namerané hodnoty odskoku materiálu na zariadeniach

| Dĺžka odskoku materiálu (mm) | Zariadenie č.1 | | Zariadenie č.2 | | Zariadenie č.3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Magnetický štítok | Senzor | Magnetický štítok | Senzor | Magnetický štítok | Senzor |
| Predná pravá bočnica | 10,0- | 9,39 | 8,0+ | 8,04 | 8,0+ | 8,81 |
| Predná ľavá bočnica | 9,0+ | 8,92 | 8,5 | 8,35 | 8,0+ | 8,48 |
| Stredová bočnica pravá | 9,0+ | 9,12 | 8,5 | 8,65 | 8,0 | 7,97 |
| Stredová bočnica ľavá | 9,0+ | 9,34 | 8,5 | 8,41 | 8,0 | 7,87 |
| Zadná pravá bočnica | 10,0+ | 10,1 | 9,0 | 8,72 | 8,5 | 8,47 |
| Zadná ľavá bočnica | 10,0+ | 10,9 | 9,0 | 8,97 | 8,5 | 8,46 |

### 3.3 Zhodnotenie výsledkov

Všetky vibračné triediče, ktoré boli použité pri experimentoch spĺňali predpísané parametre a zároveň boli dodržané aj podmienky, ktoré požadoval zákazník, čo nám predstavuje aj grafické vyjadrenie na obr. 3 až 11.

Ak by vyrobené vibračné triediče neplnili predpísané parametre mohlo by dôjsť k poškodeniu stability triediča, zároveň by bolo nutné pristúpiť k zmene otáčok motora, kde by už neboli splnené ani požiadavky zákazníka.

Pri testovaní odskoku materiálu na sitách (stroke) bolo potrebné dodržať hodnoty v rozsahu 8 - 13 mm, týmto sa zabezpečí, aby materiál, ktorý je triedený na daných sitách prepadával otvormi na sitách rovnomerne. Ak by sme tento parameter nedodržali museli by sa upravovať protizávažia, ktoré boli pripevnené na oboch stranách so spojkou. Predpísané protizávažie bolo 25 kg na ľavej strane a 25 kg na pravej strane. Tieto závažia splnili požiadavky zákazníka a vedeli sme tým zabezpečiť správny odskok materiálu na sitách.

## 4 Záver

V rámci tohto experimentu sme podrobne analyzovali vibračné triediče určené pre použitie v kameňolomoch. Analyzovali sme ich spoľahlivosť a schopnosť splniť požiadavky zákazníka na správny chod zariadenia v reálnych prevádzkových podmienkach. Meranie sa vykonávalo 3-krát na každom jednom triediči vo vybranej organizácii. Triediče boli testované počas 8 hodinového intervalu, kde boli vystavené presným podmienkam, ktoré simulovali prevádzku v kameňolome, pre lepší zber údajov a následnú analýzu.

Všetky namerané údaje a analýza testov potvrdili, že vibračné triediče vykazujú vysokú spoľahlivosť a efektivitu. Zistili sme, že zariadenia dokážu účinne triediť materiál s minimálnym vplyvom na prevádzku a s minimálnymi poruchami.

Spoľahlivosť strojných zariadení predstavuje kľúčový aspekt v priemyselnom prostredí, a preto sa využíva široké spektrum diagnostických metód na celkové zhodnotenie ich technického stavu. Tieto diagnostické metódy umožňujú systematické sledovanie strojných zariadení a poskytujú dôležité informácie o ich technickom stave. Spoľahlivé strojné zariadenia sú základom pre stabilný chod výrobných procesov a minimalizáciu straty času a zdrojov v dôsledku náhlych porúch.

**Poďakovanie:**

Tento príspevok vznikol za podpory projektu KEGA s č. 007TU Z-4/2023„Inovácia a edukačná podpora predmetov v oblasti technickej diagnostiky poľnohospodárskej a lesníckej techniky s orientáciou na prax“ a projektu VEGA s č. 1/0691/23 „Hodnotenie a simulácia opotrebenia prostredníctvom 3D technológií“.

**Literatúra:**

[1] Bojo, L. *Spoľahlivosť strojných zariadení v strojárskom priemysle*. Diplomová práca. 2024. Technická fakulta SPU v Nitre, Nitra 2024

[2] Breznická, A.,Kohutiar, M., Krbaťa, M., Eckert, M. and P. Mikuš. *Reliability Analysis during the Life Cycle of a Technical System and the Monitoring of Reliability Properties*. Systems 2023, 11, 556. https://doi.org/10.3390/systems11120556.

[3] Daneshjo, N., Hlubeň, D., Danishjoo, E. and M. Kopas. *Diagnostics, maintenance and reliability of machines manufacturing systems*. Germany, Dr. Enayat Danishjoo - 2011. 136 s. ISBN 978-3-00-035706-0

[4] Malik, D. 2023. *The future of asset reliability: Trends and technological advances*, [on-line] [cit. 2024-02-14], Dostupné na: < https://www.nrx.com/the-future-of-asset-reliability-trends-and-technological-advances/ >

[5] VOMET. (2018). *Triediče CVT*, [on-line] [cit. 2024-04-06], Dostupné na: <https://www.vomet.sk/produkty/triediace-laboratorne-stroje/konvencne-triedice-drvice/triedice-cvt >

[6] Aggarwal, K. K. 1993. *Reliability Engineering*. Springer-Science + business Media, [on-line] [cit. 2024-02-10]. 1-30 s. ISBN 978-94-010-4852-1

[7] Chvojka, P., Burian, D. a M. Janota. *Měřící předpis: MP-05-02 Diagnostická měření strojů*. Praha : Zkušební laboratoř VCSVTT, 2008. 33 s

[8] Žarnovský, J., Kováč, I., Mikuš, R., Fries, J. and M. Mošať. Vibration diagnostics of CNC machining center spindle. In *Manufacturing Technology*. ISSN 1213-2489, 2019, vol. 19, no. 2, s. 350-356

[9] Výžinkár, M., Gašparovič, D., Žarnovský, J., Kováč, I. and R. Bernát. Use of technical diagnostics means in industrial practice. In *Manufacturing Technology*. ISSN 1213-2489, 2017, vol. 17, no. 3, s. 401-407

# 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 teplotechnických dat pro sledování ekonomie provozu a diagnostiku technologických komponent sekundárního okruhu JE
- Vibrodiagnostické sledování „zdraví“ strojů
- Poradenství, expertízy, školení, servis

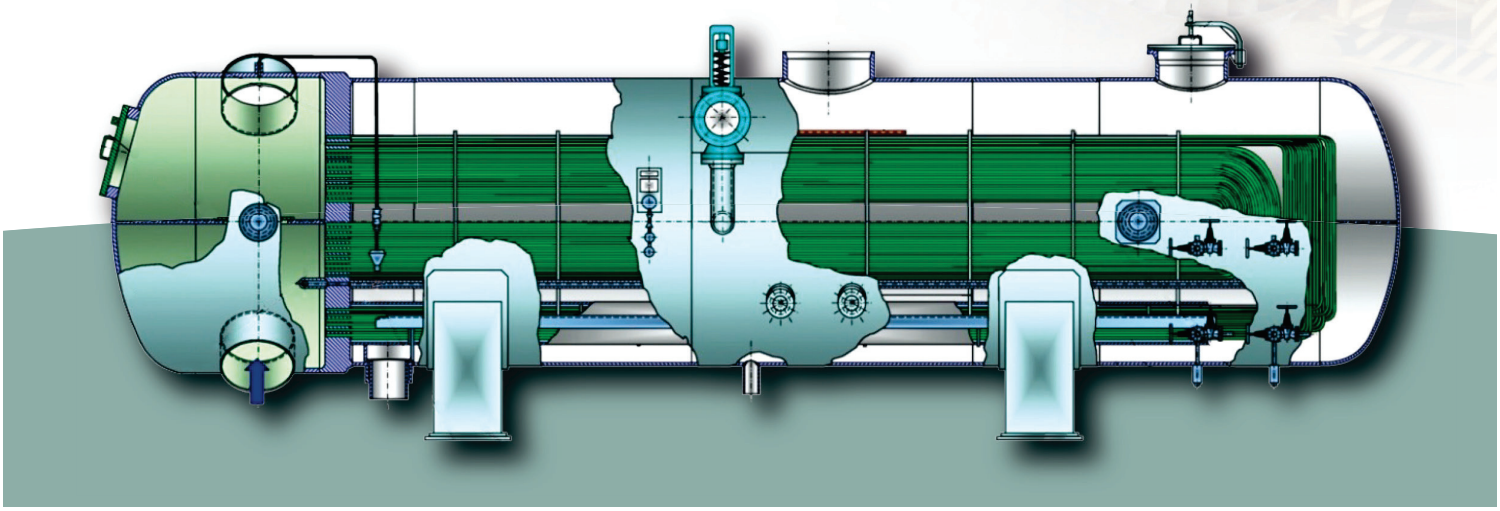
Certifikace pro funkční bezpečnost
TÜV Rheinland – Safety Instrumentation Systems

**Partneři:**

Doosan Škoda Power, Západočeská univerzita v Plzni, Adash, REX Controls

**Zastoupení společnosti:**

EMERSON, Wilcoxon Sensing Technologies, OROS, BR Braun, mcmonitoring



# INNOMOTICS

# INSPIRE IQ

INSPIRE IQ je naše komplexní řešení pro monitorování stavu, preventivní údržbu a analýzu poruch pohonů. Poskytuje cloudovou analýzu a umožňuje vzdálenou podporu pomocí dat. Vyhodnocení těchto dat zajišťují zkušení odborníci společnosti Innomotics. Do cloudu je nahrána řada chybových protokolů, protokolů událostí, parametrů, datových bodů a měření. Automatická upozornění jsou odeslána servisním odborníkům poskytujícím nepřetržitou 24/7 asistenci a analýzu.

Motory jsou spravovány pomocí pokročilých funkcí systému detekce poškození motoru, cloudového numerického modelování a vzdálené analýzy dat motoru od certifikovaných odborníků na vibrace společnosti Innomotics. Nepřetržité monitorování s upozorněními na základě algoritmů, analýzou událostí a preventivním hlášením umožňují včasné odhalení problémů – což vede k vyšší provozuschopnosti výroby a snížení neplánovaných prostojů.

## Inspire IQ Suite
Funkce

### Dashboard view
Transparentnost operací

Stav veškerých pohonů ve vašem webovém prohlížeči

KPI pohled na stav vašich měničů

Snadný přístup k aktuálním historickým datům

### Automatické upozornění na poruchu

Inspire IQ - automatically generated notification service

Sirius Case ID: CAS0977602Y256

Asset Information [ Inspire IQ ] :

Customer : Basic Customer
Plant : Basic Plant
Line : Basic Line
Asset : TR_GH180_210_2

Priority Level [1] Event :

- An Error occurred : Asset has changed from [Run] state to [Fault] state

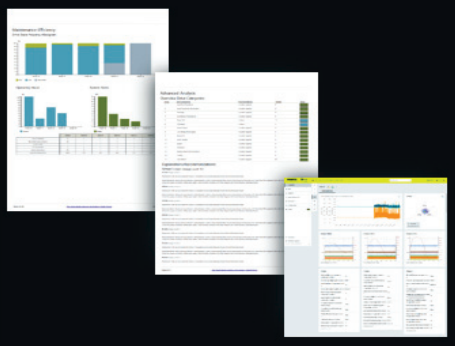
Details :

Time : 19-04-2024 11:26:15 UTC

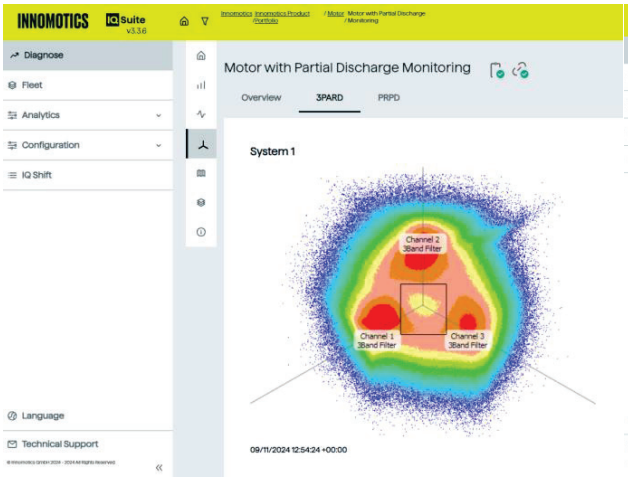
Property[Drive state]= [ Housing.Common.State ]
Time on Controller= 2014-05-02T13:22:30.506Z
Possible Causes

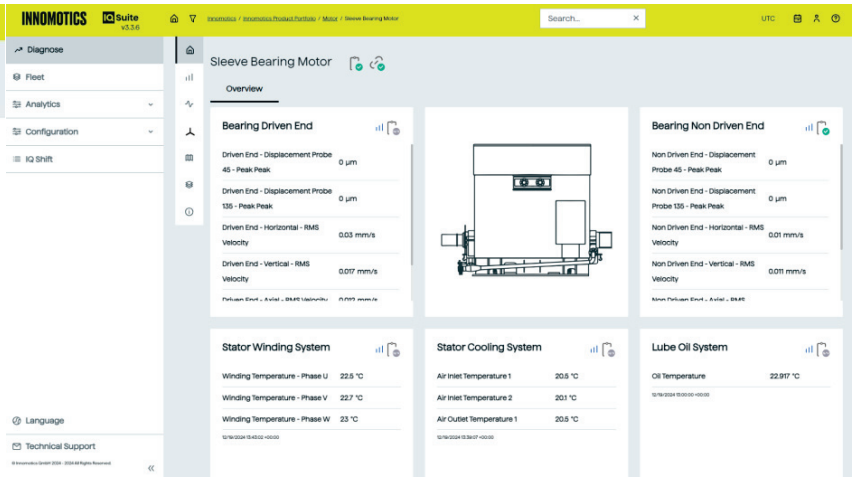
Logs trail for debugging
Time difference - IPC and Controller clock[HH:MM:SS.mmm]=-3639.22:14:34.0100000
2018-08-30T06:58:35.36Z - Info - General - Network 2 module type: None Installed
2018-08-30T06:58:35.36Z - Info - General - Network 1 module type: Anybus Ethernet
2018-08-30T06:58:35.36Z - Info - General - Glue version 1.0.0.4.3-5-14
2018-08-30T06:58:35.36Z - Info - General - FPGA version 1.4.0.9.1-20-17
2018-08-30T06:58:35Z - Info - General - Precharge type 5 Ready
2018-08-30T06:58:35Z - Info - General - Precharge type 5 - Initializing

### Automatizované měsíční reporty



INNOMOTICS




Innomotics, s.r.o., Škrobárenská 511/5 Trnitá, 617 00 Brno, Česká republika Innomotics.service.cz@innomotics.com Innomotics.com/inspire-iq

# TERMOKAMERY, AKUSTICKÉ KAMERY
# VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY

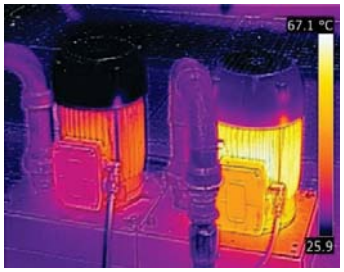
**žádné čínské kopie, ale 100% originál a výroba v EU / USA**

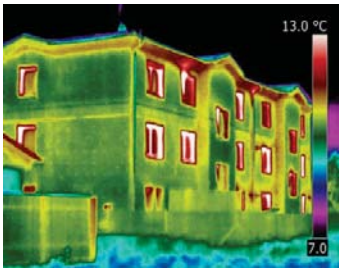
## TERMOKAMERY, AKUSTICKÉ KAMERY, MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

Když potřebujete kvalitní a spolehlivou termokameru, která poskytne nejlepší obraz, přesné měření teplot a dlouhou životnost se zaručeným a profesionálním servisem, určitě se obrátíte na výrobce s dlouhou historií, vlastním vývojem a největšími zkušenostmi. Teledyne FLIR je nejstarším (1958) a 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 spolu s vysokou kvalitou, odolností a životností, jako Teledyne FLIR.
Naše společnost SpektraVision s.r.o. je dlouholetý distributor a PREMIUM Partner Teledyne FLIR a dodává spolu s technickou FLIR profesionální služby jako jsou školení, servis (opravy, kalibrace), pořádání odborných konferencí, což přináší našim zákazníkům bezkonkurenční výhody a spolehlivý provoz.

### Přenosné a stacionární termokamery = kvalitní diagnostika a kontrola, automatizace

FLIR PREMIUM PARTNER




***Přednosti termokamer FLIR:***

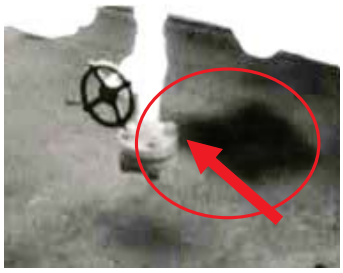
- rozlišení snímače až 1024 x 768 (2048 x 1536) bodů
- vysoká citlivost < 20 mK, měření teplot až do +2000 °C
- funkce **MSX** a **UltraMax**, dotykové LCD, WiFi, Bluetooth
- bezkonkurenční záruka 10 let na snímač

***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 OGI a akustické kamery = detekce úniků plynů / stlačeného vzduchu

FLIR PREMIUM PARTNER



***Přednosti termokamer a akustických kamer FLIR:***

- vysoké rozlišení snímače až 640 x 480 bodů
- vysoká citlivost až < 10 mK, měření od -40 °C až +1500 °C
- v souladu s EU regulativou proměření úniků metanu
- použití v prostředí s nebezpečím výbuchu - ATEX

***Příklady využití:***

- detekce výbušných plynů a těkavých látek
- detekce plynů CO, $CO_2$, $SF_6$, čpavku a dalších
- kontrola těsnosti chladírenských zařízení
- detekce a kvantifikace úniků stlačeného vzduchu

# VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY

Vysokorychlostní kamery jsou nepostradatelným pomocníkem jak v průmyslu, tak zejména při vývoji a testování materiálů. Naše společnost SpektraVision s.r.o. dodává špičkové vysokorychlostní kamery od dvou světových výrobců, a to:

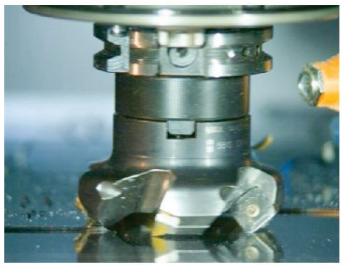
**FASTEC Imaging (RDI)** – kompaktní přenosné a stacionární vysokorychlostní kamery **FASTEC** určené zejména pro průmyslové využití

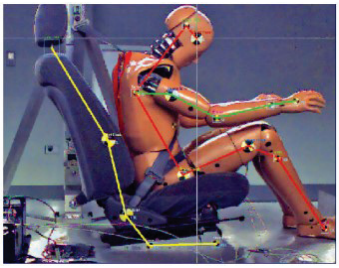
**iX Cameras** (dříve OLYMPUS) – špičkové laboratorní vysokorychlostní kamery **i-SPEED**, které jsou vzhledem ke svým výjimečným vlastnostem předurčeny pro dosažení nejkvalitnějších videozáznamů v oblasti vývoje a výzkumu materiálů, ultrarychlých dějů, balistiky, crash testů a podobně.

## Vysokorychlostní kamery = záznam ultrarychlých dějů ve vysokém rozlišení

FASTEC
an RDI Technologies Company

iX Cameras



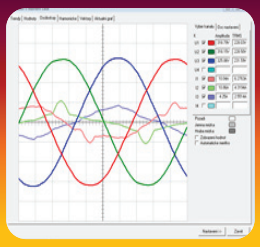


***Přednosti kamer i-SPEED a FASTEC:***

- 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.



MĚŘICÍ A DIAGNOSTICKÉ PŘÍSTROJE

analyzátory kvality elektrických sítí

vysokorychlostní kamery

termokamery

SLUŽBY

termovizní měření

natáčení vysokorychlostní kamerou

odborná školení a semináře, poradenství, servis

SpektraVision

„ 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

# Lamikappa

33 LET

## ŘEŠENÍ PRO ÚDRŽBU A CONDITION MONITORING

- souosost rotačních strojů
- online condition monitoring
- offline měření vibrací
- provozní vyvažování
- indukční ohřev
- automatické mazání
- de/montáž ložisek

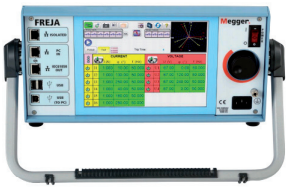
**Jsme tu pro Vás už 33 let**

www.lamikappa.cz

# Měřicí a diagnostické přístroje pro energetiku a průmysl

termovize TMV SS®

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 tranformátorů, 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
- Akustické kamery 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
- Měřící 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

# Efektivní spolupráce na optimalizaci provozu strojů

**Objevte nové SKF technologie, prozkoumejte možnosti efektivní údržby a získejte informace o repasování a přizpůsobení vašich průmyslových zařízení.**

www.skf.com

# VA3 Pro

## 3-KANÁLOVÝ ANALYZÁTOR, SBĚRAČ DAT,
A MNOHEM VÍCE ...

ROZUMÍME ŘEČI VIBRACÍ

| | |
|---|---|
| Autor: | Kolektiv autorů |
| Katedra, institut: | 340 - Katedra konstruování |
| Název: | „DIAGO® 2025“<br>Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení, sborník 42. mezinárodní vědecké konference |
| Místo, rok, vydání: | Ostrava, 2025, 1. vydání |
| Počet stran: | 153 |
| Vydala: | Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava<br>17. listopadu 2172/15<br>708 00 Ostrava - Poruba |
| Tisk: | VŠB - Technická univerzita Ostrava |
| Náklad: | on-line |
| | Neprodejné |

**ISBN 978-80-248-4787-0 (on-line)**