ASOCIÁCIA TECHNICKÝCH DIAGNOSTIKOV SLOVENSKEJ REPUBLIKY

ISSN 1337-8252

ATD SR
Asociácia technických diagnostikov Slovenskej republiky

SAFETY A SECURITY: KOORDINOVANÉ POSUDZOVANIE RIZÍK STROJOV
APLIKÁCIA 3D LASEROVÉHO SKENOVANIA ROTORA PRE ZLEPŠENIE ROVNOMERNOSTI VZDUCHOVEJ MEDZERY AZNÍŽENIE VIBRÁCIÍ GENERÁTORA VODNEJ TURBÍNY
BEZPEČNÁ ÚDRŽBA CNC ZARIADENÍ S VYUŽITÍM DIGITÁLNEJ ERGONÓMIE
VYUŽITIE POČÍTAČOVEJ SIMULÁCIE PRI PLÁNOVANÍ PREVENTÍVNEJ ÚDRŽBY ROBOTIZOVANÉHO PRACOVISKA POVRCHOVEJ ÚPRAVY
VPLYV EURÓPSKEJ LETECKEJ LEGISLATÍVY NA SKVALITŇOVANIE CERTIFIKÁCIE, DIAGNOSTIKY A ÚDRŽBY LETECKEJ TECHNIKY
ZVÝŠENÉ HODNOTY VIBRÁCIÍ A NEŠTANDARDNÉ ČASOVÉ ZÁZNAMY NA POZÍCII GA208A
ZVÝŠENÉ HODNOTY VIBRÁCIÍ PO OPRAVE NA POZÍCII P506A
OBMEDZENIA OBJEMOVEJ REGULÁCIE PIESTOVÝCH KOMPRESOROV

SPRAVODAJ ATD SR

2 / 2026

XXIX. ročník DIS 2026

www.atdsr.sk



Sídlo ATD SR:
Technická univerzita v Košiciach
Letná 1/9, 042 00 Košice-Sever

ATD SR
Asociácia technických diagnostikov Slovenskej republiky

Letecká fakulta

ZSVTS

ZAP
ZVÄZ AUTOMOBILOVÉHO PRIEMYSLU SR

ATD ČR

SLOVENSKÁ SPOLOČNOSŤ ÚDRŽBY

KOŠICKÁ AKADÉMIA TAJOVSKÉHO 15

R·AS

TOMARK AERO

TRANS
TRANSPORT & LOGISTICS MANAGEMENT

SPRAVODAJ ATD SR 2/2026

Šéfredaktor: prof. Ing. Hana PAČAIOVÁ, PhD.

Hlavný redaktor: doc. Ing. Michal HOVANEC, PhD.

Redakčná rada: prof. Ing. Pavol KURDEL, PhD.
prof. Ing. Róbert GREGA, PhD.
Ing. Ivana KOLÁRIKOVÁ, PhD.
Ing. Volodymyr TYMOFIIV, PhD.
doc. Ing. Radoslav MAJDAN, PhD.
doc. Ing. Viera PEŤKOVÁ, PhD.
doc. Ing. Juraj GRENČÍK, PhD.
doc. Ing. Renáta TURISOVÁ, PhD.
Ing. Branislav KYSEĽ, PhD.
doc. Ing. František HELEBRAT, CSc.
Ing. Katarína Dojčánová

Vydavateľ: Asociácia technických diagnostikov
Slovenskej republiky
Technická Univerzita v Košiciach
Letná 1/9, 042 00 Košice-Sever
Tel. č.: +421 55 6026107

Grafická úprava a tlač: WILLCOM - reklamná agentúra
Szakkayho 1
040 01 Košice

Rozširuje: Sekretariát ATD

Objednávku časopisu a inzercie prijíma vydavateľ.
Za pôvodnosť, vecnú správnosť alebo záväzky ručia autori príspevkov.

Evidenčné číslo časopisu: 19/08
IČO vydavateľa: 31 751 814
Ročník vydania periodickej tlače: 23. ročník
Dátum vydania: október 2026
Periodicita vydávania: 2x ročne

ISSN 1337-8252

OBSAH

SAFETY A SECURITY: KOORDINOVANÉ POSUDZOVANIE RIZÍK STROJOV 6
Hana Pačaiová, Michal Hovanec, Katarína Dojčánová, Jaroslav Murín, Vladimír Valenčin

APLIKÁCIA 3D LASEROVÉHO SKENOVANIA ROTORA PRE ZLEPŠENIE ROVNOMERNOSTI VZDUCHOVEJ MEDZERY A ZNÍŽENIE VIBRÁCIÍ GENERÁTORA VODNEJ TURBÍNY 16
Michal Hlavatý, Roman Jung, Tomáš Sauer

BEZPEČNÁ ÚDRŽBA CNC ZARIADENÍ S VYUŽITÍM DIGITÁLNEJ ERGONÓMIE 22
Maryna Yeromina, Darina Dupláková, Ján Duplák, Matej Cichý

VYUŽITIE POČÍTAČOVEJ SIMULÁCIE PRI PLÁNOVANÍ PREVENTÍVNEJ ÚDRŽBY ROBOTIZOVANÉHO PRACOVISKA POVRCHOVEJ ÚPRAVY 30
Ján Duplák, Maryna Yeromina, Darina Dupláková, Samuel Mikuláško

VPLYV EURÓPSKEJ LETECKEJ LEGISLATÍVY NA SKVALITŇOVANIE CERTIFIKÁCIE, DIAGNOSTIKY A ÚDRŽBY LETECKEJ TECHNIKY 38
Marián Hocko, Branislav Racek

ZVÝŠENÉ HODNOTY VIBRÁCIÍ A NEŠTANDARDNÉ ČASOVÉ ZÁZNAMY NA POZÍCII GA208A 47
Jozef Klinovský

ZVÝŠENÉ HODNOTY VIBRÁCIÍ PO OPRAVE NA POZÍCII P506A 55
Jozef Klinovský

OBMEDZENIA OBJEMOVEJ REGULÁCIE PIESTOVÝCH KOMPRESOROV 63
Lucia Žuľová, Robert Grega, Jozef Krajňák, Matej Urbanský


Adash
PRENOSNÉ PRÍSTROJE
PRE DIAGNOSTIKU STROJOV
ADASH
ADASH
ADASH
VA3 Pro
3-kanálový
prenosný analyzátor
VA5 Pro
Pokročilý 4-kanálový
prenosný analyzátor
Vibrio
Merač vibrácií
a záznam údajov
www.adash.com
MASTER THE LANGUAGE OF YOUR MACHINERY

SAFETY A SECURITY: KOORDINOVANÉ POSUDZOVANIE RIZÍK STROJOV

Safety and Security: Coordinated Machinery Risk Assessment

Hana Pačaiová, Michal Hovanec, Katarína Dojčánová, Jaroslav Murín, Vladimír Valenčin

Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta

Anotácia

Digitalizácia, prepojenosť a rastúce využívanie inteligentných riadiacich systémov menia tradičný pohľad na bezpečnosť strojov. Kybernetické hrozby môžu ovplyvniť integritu, dostupnosť a správne vykonávanie bezpečnostných funkcií, a tým vytvárať alebo meniť podmienky vedúce k vzniku nebezpečných situácií a fyzickej škody.
Príspevok sa zameriava na integráciu princípov safety a security pri posudzovaní rizík strojov. Porovnáva prístupy k posudzovaniu a znižovaniu rizika podľa ISO 12100 a funkčnej bezpečnosti riadiacich systémov s princípmi posudzovania kybernetických rizík podľa IEC 62443. Pozornosť je venovaná rozdielom a vzájomným väzbám medzi bezpečnostnými funkciami, požadovanými úrovňami PLr/SIL a cieľovou úrovňou kybernetickej bezpečnosti SL-T. Za kľúčový integračný bod sa považuje bezpečnostná funkcia a prvky zabezpečujúce jej vykonanie, ktorých narušenie kybernetickou hrozbou môže zvýšiť výsledné safety riziko. Cieľom príspevku je poukázať na potrebu koordinovaného posudzovania safety a security rizík počas životného cyklu stroja a na význam security opatrení pri zachovaní integrity a dostupnosti bezpečnostných funkcií. Navrhovaný prístup je ilustrovaný na príklade ochrany pracovného priestoru manipulátora s prepojením požiadaviek PLr a SL-T.

Kľúčové slová: posudzovanie rizík, bezpečnosť strojov, funkčná bezpečnosť, kybernetická bezpečnosť, safety–security integrácia

Abstract

Digitalization, connectivity, and the increasing use of intelligent control systems are changing the traditional approach to machinery safety. Cybersecurity threats may affect the integrity, availability, and correct execution of safety functions, thereby creating or altering conditions that may lead to hazardous situations and physical harm.
The paper focuses on the integration of safety and security principles in machinery risk assessment. It compares approaches to risk assessment and risk reduction according to ISO 12100 and the functional safety of control systems with cybersecurity risk assessment principles according to IEC 62443. Particular attention is paid to the differences and interrelationships between safety functions, the required PLr/SIL levels, and the target Security Level (SL-T). The safety function and the elements required for its execution are considered the key integration point, as their compromise by a cybersecurity threat may increase the resulting safety risk. The aim of the paper is to highlight the need for coordinated assessment of safety and security risks throughout the machinery life cycle and the importance of security measures in maintaining the integrity and availability of safety functions. The proposed approach is illustrated by an example involving the protection of a manipulator's working area, demonstrating the relationship between PLr and SL-T requirements.

Keywords: *risk assessment, machinery safety, functional safety, cybersecurity, safety–security integration*

Úvod

Bezpečnosť patrí medzi základné ľudské potreby [1]. Bez zabezpečenia primeranej úrovne bezpečnosti je ťažké dlhodobo dosahovať vysokú kvalitu, produktivitu a efektívnosť ľudskej činnosti. Napĺňanie spoločenských a hospodárskych cieľov preto vyžaduje všeobecne akceptované pravidlá vytvárajúce rámec pre ochranu človeka, majetku a pracovného prostredia. Európska únia (EÚ), podobne ako ďalšie vyspelé krajiny, prešla postupným vývojom právnych a technických požiadaviek upravujúcich vzťah človeka, technických systémov a pracovného prostredia. Výsledkom je otvorený a neustále sa rozvíjajúci systém právnych predpisov a technických noriem podporujúci systematické zvyšovanie úrovne bezpečnosti.

Významným medzníkom tohto vývoja bolo prijatie dvoch európskych smerníc v roku 1989 – Rámcovej smernice 89/391/EHS z 12. júna 1989 o zavádzaní opatrení na podporu zlepšenia bezpečnosti a ochrany zdravia pracovníkov pri práci a smernice 89/392/EHS o strojových zariadeniach zo 14. júna 1989 [2]. Tieto právne predpisy vytvorili dva vzájomne sa dopĺňajúce piliere bezpečnosti: požiadavky na bezpečný návrh a konštrukciu stroja na strane výrobcu a požiadavky na bezpečné používanie pracovných prostriedkov a pracovné podmienky na strane zamestnávateľa a prevádzkovateľa.

Takto sa postupne vytvoril rámec pravidiel posilňujúci väzby medzi konštruktérom, výrobcom, dovozcom, prevádzkovateľom a používateľom stroja (Obr. 1). Požiadavky na bezpečnosť sa pritom začali systematicky zohľadňovať už vo fáze návrhu stroja a následne počas jeho celého životného cyklu – pri doprave, montáži, uvádzaní do prevádzky, používaní, nastavovaní, údržbe, opravách, demontáži a likvidácii. Súčasne sa vytvorili podmienky na efektívnejšiu komunikáciu medzi jednotlivými zainteresovanými stranami a kontrolnými orgánmi, napríklad inšpektorátmi práce a technickou inšpekciou.

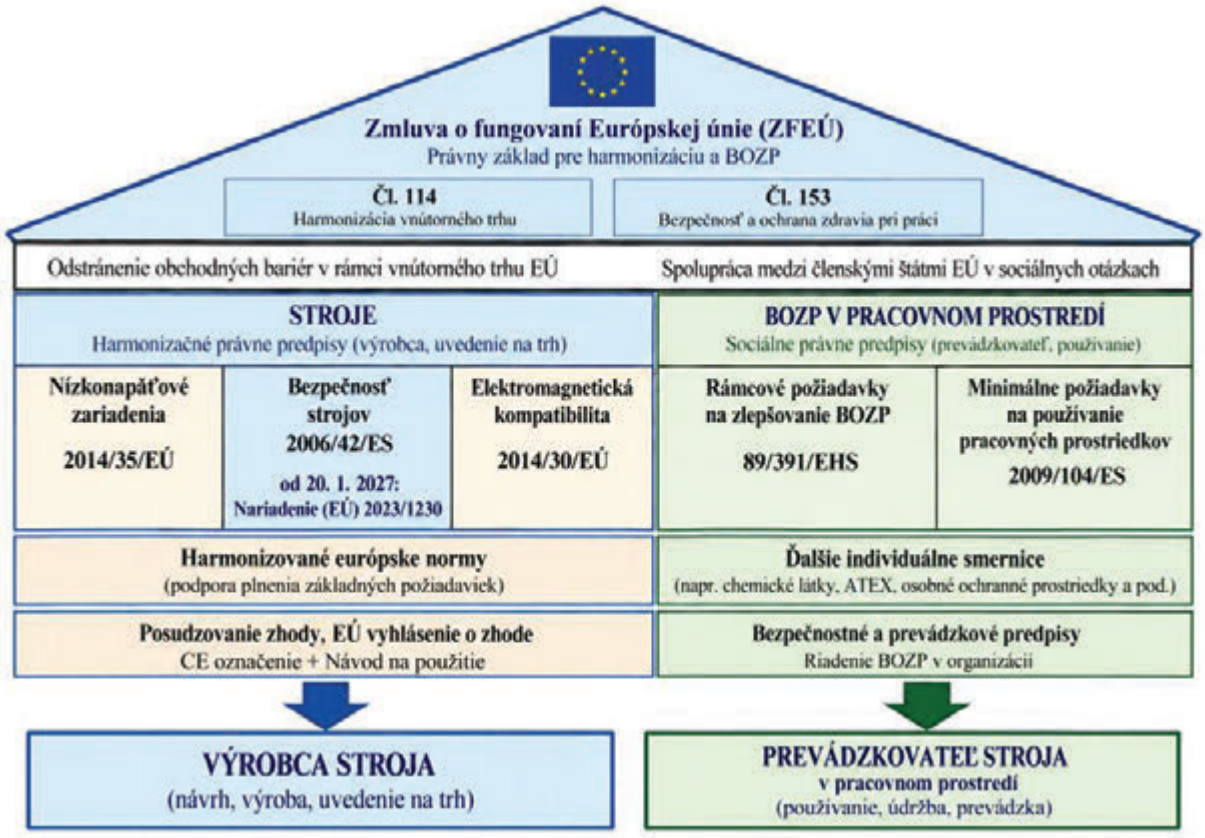
Kľúčovým princípom tohto prístupu je posudzovanie a znižovanie rizika. Výrobca musí systematicky identifikovať nebezpečenstvá, odhadnúť a vyhodnotiť súvisiace riziká a následne prijať opatrenia v súlade so stanovenou hierarchiou ich znižovania. Prioritou je odstránenie nebezpečenstva alebo zníženie rizika vhodným konštrukčným riešením, následne použitie ochranných a doplnkových ochranných opatrení a napokon poskytnutie informácií o zostatkových, resp. zvyškových rizikách používateľovi. Tento prístup vytvára základ pre bezpečnú konštrukciu a používanie strojových zariadení počas celého ich životného cyklu.

Dve smernice EÚ sa priamo dotýkajú požiadaviek na bezpečnosť a ochranu zdravia pri používaní strojových zariadení. Jedná sa o smernicu Európskeho parlamentu a Rady 2006/42/ES zo 17. mája 2006 o strojových zariadeniach a o zmene a doplnení smernice 95/16/ES – tzv. „Smernica o strojoch“ a smernica Európskeho parlamentu a Rady 2009/104/ES zo 16. septembra 2009 o minimálnych požiadavkách na bezpečnosť a ochranu zdravia pri používaní pracovných prostriedkov pracovníkmi pri práci (druhá samostatná smernica v zmysle článku 16 ods. 1 smernice 89/391/EHS – pôvodne pod ozn. 89/655/EHS).

Smernica o strojoch je doplnená o ďalšie „technické smernice“, ktoré vytvárajú spolu komplexný rámec pre splnenie požiadaviek na bezpečnosť a ochranu zdravia (BOZP) pri práci. Jedná sa o:

- Smernica Európskeho parlamentu a Rady 2014/30/EÚ z 26. februára 2014 o harmonizácii právnych predpisov členských štátov vzťahujúcich sa na elektromagnetickú kompatibilitu (prepracované znenie).

- Smernica Európskeho parlamentu a Rady 2014/35/EÚ z 26. februára 2014 o harmonizácii právnych predpisov členských štátov týkajúcich sa sprístupnenia elektrického zariadenia určeného na používanie v rámci určitých limitov napätia na trhu.



Obr. 1 Požiadavky na bezpečnosť strojov vymedzené smernicami EÚ

Členské štáty EÚ musia tieto smernice transponovať do svojich vnútroštátnych právnych predpisov!

V súčasnosti však dochádza k významnej zmene európskeho právneho rámca pre strojové zariadenia [2, 3]. Do 19. januára 2027 zostáva základným právnym predpisom pre uvádzanie strojových zariadení na trh a/alebo do prevádzky smernica 2006/42/ES (ktorá zrušila smernicu 89/37/ES, ktorá bola prvou, ktorá nahradila pôvodnú smernicu 89/392/EHS). Od 20. januára 2027 sa začne uplatňovať Nariadenie Európskeho parlamentu a Rady (EÚ) 2023/1230 o strojových zariadeniach, ktorým sa smernica 2006/42/ES zrušuje. Na rozdiel od smernice je nariadenie záväzné v celom rozsahu a priamo uplatniteľné vo všetkých členských štátoch, teda nevyžaduje transpozíciu do vnútroštátneho práva [3].

Táto zmena zároveň reaguje na vývoj moderných strojových zariadení, ich rastúcu digitalizáciu, konektivitu a využívanie softvéru a inteligentných riadiacich systémov. Bezpečnosť stroja preto už nemožno vnímať iba ako ochranu pred tradičnými mechanickými, elektrickými alebo tepelnými nebezpečenstvami, ale je potrebné zohľadňovať aj nové faktory, ktoré môžu ovplyvniť bezpečné vykonávanie jeho funkcií.

1. Aplikácia harmonizovaných noriem

Z právneho hľadiska musí výrobok uvádzaný na trh alebo do prevádzky spĺňať požiadavky všetkých príslušných právnych predpisov EÚ, ktoré sa naň vzťahujú.

Smernica 2006/42/ES už v odôvodnení (odst. 18) poukazuje na význam harmonizovaných noriem pri praktickom uplatňovaní základných požiadaviek na bezpečnosť a ochranu zdravia. Harmonizované normy majú výrobcom uľahčiť preukazovanie zhody a poskytovať technické riešenia zamerané na predchádzanie rizikám vyplývajúcim z návrhu a konštrukcie strojových zariadení.

Technické normy predstavujú jeden zo základných nástrojov, pomocou ktorých môže výrobca preukázať splnenie požiadaviek právnych predpisov. Používanie technických noriem je vo všeobecnosti dobrovoľné. Podľa článku 7 ods. 2 smernice 2006/42/ES sa strojové zariadenie vyrobené v zhode s harmonizovanou normou, ktorej odkaz bol uverejnený v Úradnom vestníku Európskej únie, považuje za spĺňajúce tie základné požiadavky na bezpečnosť a ochranu zdravia, ktoré príslušná harmonizovaná norma pokrýva.

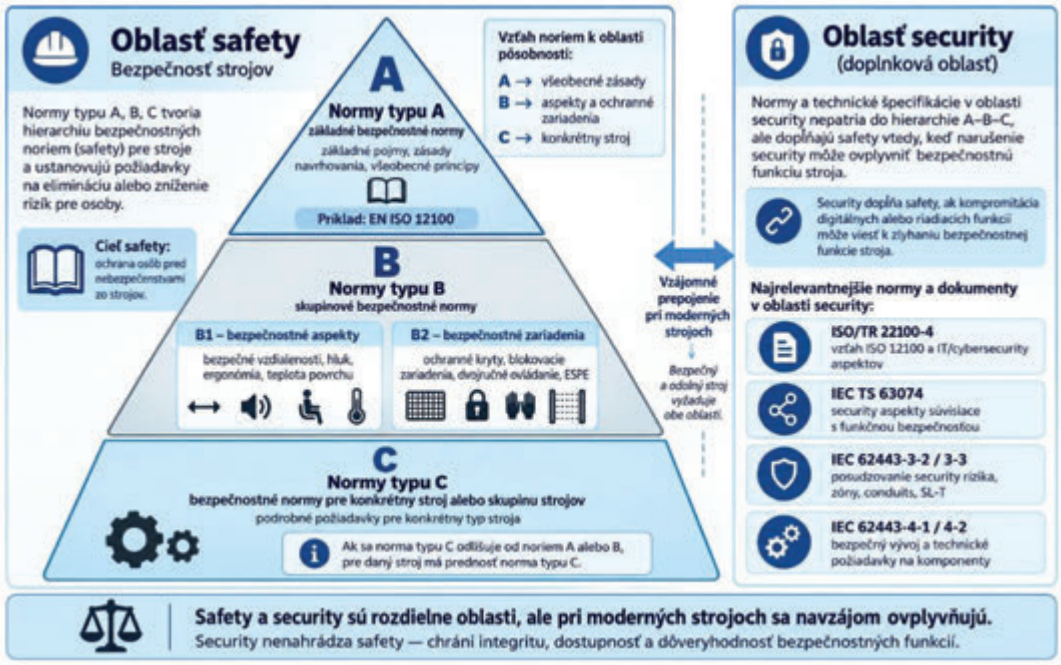
Použitie jednej alebo viacerých harmonizovaných noriem však automaticky neznamená splnenie všetkých požiadaviek smernice; výrobca musí identifikovať a splniť všetky požiadavky relevantné pre konkrétny stroj.

Ak výrobca harmonizovanú normu nepoužije, použije ju iba čiastočne alebo príslušná harmonizovaná norma neexistuje, neznamená to automaticky povinnosť vykonať ES skúšku typu [4]. Postup posudzovania zhody závisí najmä od toho, či stroj patrí medzi kategórie uvedené v prílohe IV smernice 2006/42/ES. Pri strojoch, ktoré v prílohe IV uvedené nie sú, sa uplatňuje postup posudzovania zhody s vnútornými kontrolami výroby podľa prílohy VIII. Pri strojoch uvedených v prílohe IV sa výber postupu ďalej odvíja od použitia harmonizovaných noriem a od rozsahu základných požiadaviek, ktoré tieto normy pokrývajú. Podľa konkrétneho prípadu môže ísť o vnútorné kontroly výroby, ES skúšku typu spolu s vnútornými kontrolami výroby alebo postup komplexného zabezpečenia kvality.

Pre konštruktéra stroja je preto dôležité poznať hierarchiu harmonizovaných noriem typu A, B a C, ich vzájomné väzby a rozsah požiadaviek, pre ktoré poskytujú predpoklad zhody. Základnou normou typu A je EN ISO 12100, ktorá stanovuje všeobecné zásady navrhovania a metodiku posudzovania a znižovania rizika [2].

Od 20. januára 2027 sa princíp predpokladu zhody zachováva aj v Nariadení (EÚ) 2023/1230 (čl. 20, príloha III). S novým nariadením sa rozširuje aj okruh požiadaviek, pri ktorých môžu technické normy podporovať výrobcu pri preukazovaní zhody, najmä v súvislosti s digitalizáciou, softvérom, konektivitou a ochranou proti narušeniu. Pri moderných strojoch je preto potrebné popri tradičných požiadavkách „safety“ zohľadňovať aj aspekty kybernetickej bezpečnosti „security“, ak môže ich narušenie ovplyvniť bezpečnostné funkcie alebo viesť k vzniku nebezpečnej situácie.

Normy z oblasti security však nemožno automaticky považovať za harmonizované normy poskytujúce predpoklad zhody s Nariadením (EÚ) 2023/1230. Predpoklad zhody vzniká iba v rozsahu požiadaviek, pre ktoré je odkaz na príslušnú harmonizovanú normu uverejnený v Úradnom vestníku EÚ (Obr. 2).



Obr. 2 Hierarchia noriem pre bezpečnosť strojov a vzťah k oblasti security

Poznámka: Každý členský štát EÚ má národný normalizačný orgán, ktorý zabezpečuje tvorbu a prijímanie technických noriem na národnej úrovni. Národné normy sú označované, napr. STN na Slovensku, ČSN v Českej republike, DIN v Nemecku, ÖNORM v Rakúsku, BS vo Veľkej Británii alebo NF vo Francúzsku.

V Slovenskej republike plní funkciu národného normalizačného orgánu Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR (ÚNMS SR), ktorý zabezpečuje tvorbu, prijímanie, preverovanie a zrušovanie slovenských technických noriem (STN) a zastupuje Slovenskú republiku v európskych a medzinárodných normalizačných organizáciách.

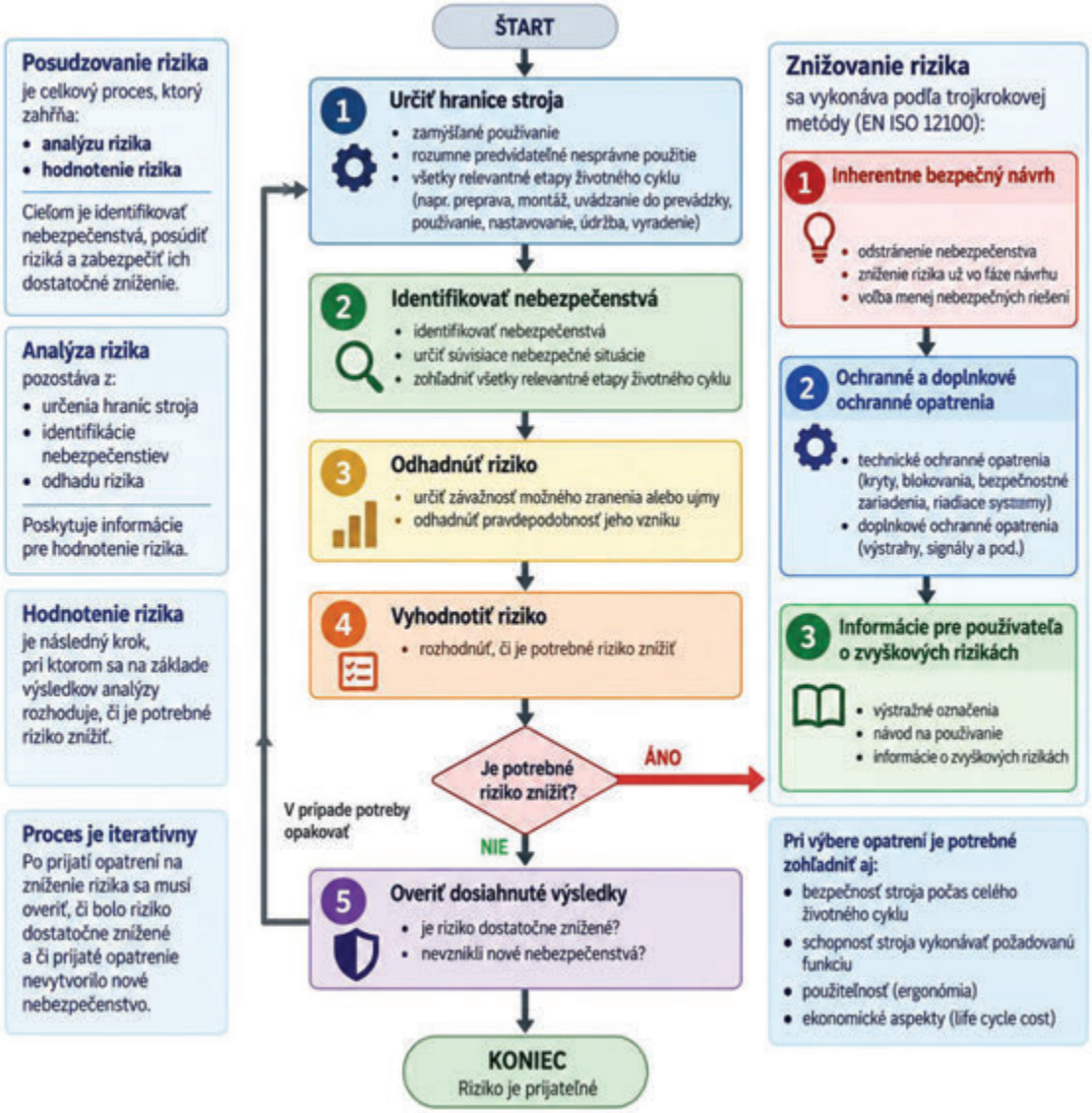
2. Princíp integrácie požiadaviek safety a security

Podľa [6] integrácia bezpečnosti a kybernetickej bezpečnosti (zabezpečenia) kombinuje postupy na ochranu prepojených systémov, dátových tokov a prevádzkových prostredí pred náhodnými zlyhaniami (safety) aj pred škodlivými útokmi (security).

Základným cieľom ISO 12100 je poskytnúť konštruktérom systematický postup posudzovania a znižovania rizika počas relevantných etáp životného cyklu stroja. Pri posudzovaní rizika je potrebné zohľadniť najmä zamýšľané používanie stroja a jeho rozumne predvídateľné nesprávne použitie, všetky relevantné etapy životného cyklu stroja – od prepravy, montáže a uvádzania do prevádzky cez používanie, nastavovanie a údržbu až po vyradenie, demontáž a likvidáciu a všetky relevantné nebezpečenstvá, nebezpečné situácie a nebezpečné udalosti.

Norma opisuje postupy na identifikáciu nebezpečenstiev, odhad a hodnotenie rizík počas relevantných fáz životného cyklu stroja a na odstránenie nebezpečenstiev alebo dosiahnutie dostatočného zníženia rizika (Obr. 3). Zároveň poskytuje návod na

dokumentovanie a overovanie procesu posudzovania a znižovania rizika a slúži ako základ pri tvorbe bezpečnostných noriem typu B a C.



Obr. 3 Základný algoritmus posudzovania a znižovania rizika podľa EN ISO 12100

Už v roku 2018 vzniká pre výrobcov strojov technická správa (TR) na podporu zohľadnenia aspektov kybernetickej bezpečnosti do konštrukcie strojov (*angl.* smart manufacturing), ozn. ISO/TR 22100-4 [6].

Definícia rizika podľa ISO 12100 je nasledovná: Riziko vo vzťahu k uvažovanému nebezpečenstvu (*angl*. hazard) je funkciou závažnosti škody (Severity of harm), ktorá môže byť výsledkom pôsobenia tohto nebezpečenstva a pravdepodobnosti výskytu tejto škody, ktorá je ovplyvnená frekvenciou a trvaním expozície osoby neubezpečenej situácii, pravdepodobnosťou výskytu nebezpečnej udalosti, ako aj možnosťami človeka vyhnúť sa škode alebo ju obmedziť (napr. rýchlosť reakcie, únikové cesty

Pričom vo vzťahu k security podľa ISO/TR 22100-4: Riziko vo vzťahu k uvažovanej hrozbe (*angl*. threat) je funkciou možného negatívneho dôsledku, ktorý môže byť výsledkom tejto hrozby (napr. hacker s kriminálnym úmyslom) a pravdepodobnosti tohto nepriaznivého

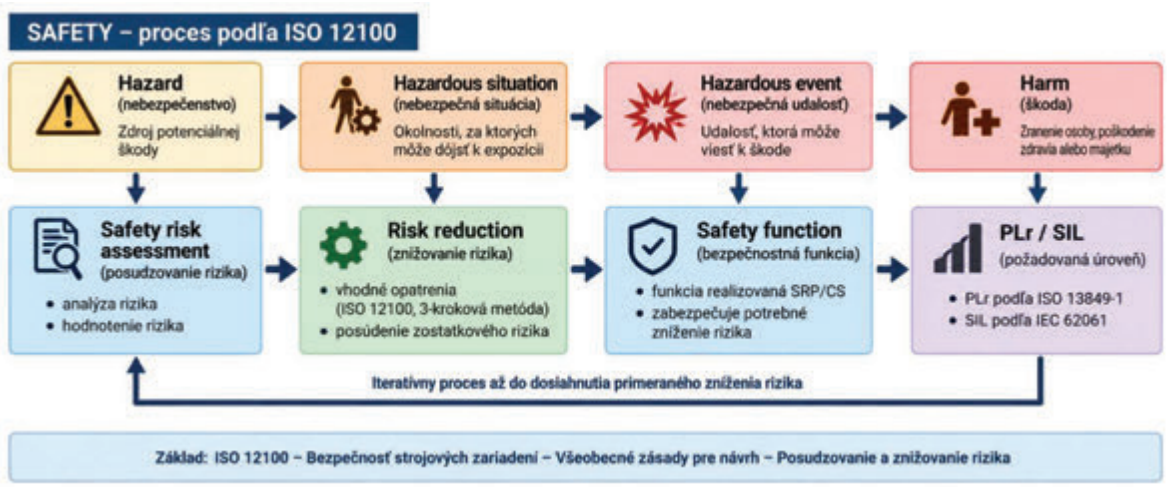
dopadu (napr. integrita, dôvernosť, dostupnosť údajov) vo vzťahu k existujúcim zraniteľnostiam (napr. slabé miesto v softvéri, hardvéri alebo sieťovej architektúre stroja), ktoré môžu byť touto hrozbou zneužité.

2.1 Dva paralelné procesy posudzovania rizík

Z predchádzajúceho je zrejmé, že posudzovanie rizík v oblastiach safety a security vychádza z odlišných východísk, terminológie a mechanizmov vzniku rizika. V oblasti bezpečnosti strojov predstavuje základný metodický rámec ISO 12100. Proces vychádza z identifikácie nebezpečenstva (*angl*. hazard), posúdenia podmienok, za ktorých môže vzniknúť nebezpečná situácia (*angl*. hazardous situation), a udalostí, ktoré môžu viesť ku vzniku škody (*angl*. harm). Riziko je následne posudzované ako kombinácia závažnosti možnej škody a pravdepodobnosti jej výskytu.

Ak zníženie rizika vyžaduje bezpečnostnú funkciu realizovanú časťou riadiaceho systému súvisiacou s bezpečnosťou (napr. doplnkové ochranné opatrenia), nadväzuje na posudzovanie podľa ISO 12100 funkčná bezpečnosť. Pre danú bezpečnostnú funkciu sa stanovuje požadovaná úroveň vlastností, napr. PLr (*angl.* Performance Level required) podľa ISO 13849-1 [7], prípadne SIL (*angl.* Safety Integrity Level) podľa príslušného rámca funkčnej bezpečnosti [8]. PLr/SIL teda vyjadruje požadovanú schopnosť bezpečnostnej funkcie dosiahnuť potrebné zníženie safety rizika.

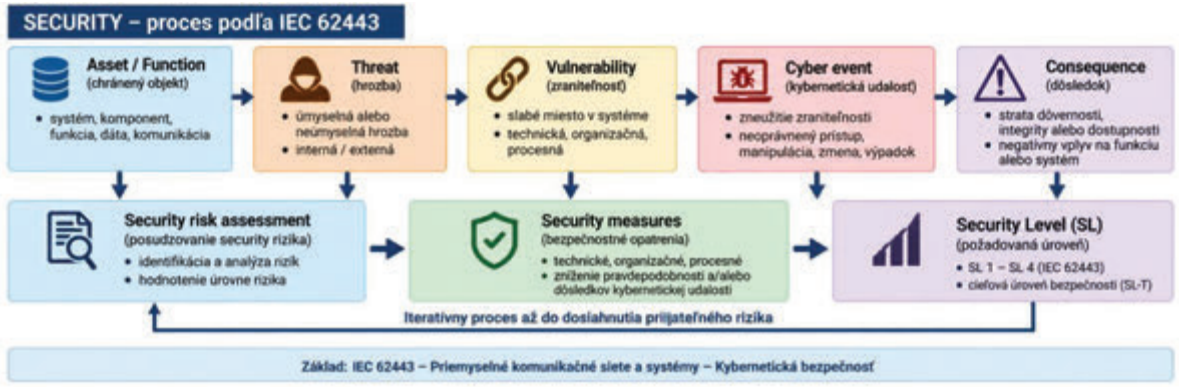
Kauzálny princíp vo vzťahu k safety scenárom možno zjednodušene vyjadriť ako sled krokov, Obr. 4.



Obr. 4 Kauzálny princíp safety procesov a znižovanie rizika

V oblasti security je východiskom chránený systém, komponent, funkcia alebo informácia (*angl*. asset), voči ktorým môže pôsobiť určitá hrozba. Hrozba môže využiť existujúcu zraniteľnosť (*angl.* vulnerability) a vyvolať kybernetickú udalosť alebo narušenie, ktorého dôsledkom môže byť strata integrity, dostupnosti alebo dôveryhodnosti funkcie či dát.

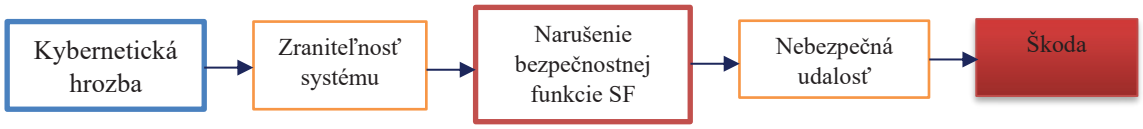
Kauzálny princíp vo vzťahu k security scenárom možno zjednodušene vyjadriť ako sled krokov, Obr. 5.



Obr. 5 Kauzálny princíp security procesov a znižovanie rizika

2.2 Integračný bod oboch procesov

Integračným bodom safety a security nie je samotné spojenie úrovní PL/SIL a SL (angl. Security Level), ale bezpečnostná funkcia a prvky zabezpečujúce jej vykonanie. Kybernetické narušenie ich integrity, dostupnosti alebo správnej funkcie môže znížiť schopnosť bezpečnostnej funkcie dosiahnuť požadované zníženie rizika, a tým zvýšiť výsledné safety riziko, Obr. 6.



Obr. 6 Kauzalita prepojenia procesov safety a security

PL/SIL a SL vyjadrujú odlišné vlastnosti systému. PL/SIL sa viaže na schopnosť konkrétnej bezpečnostnej funkcie dosiahnuť požadované zníženie safety rizika, zatiaľ čo SL-T podľa IEC 62443 [8] vyjadruje požadovanú úroveň security ochrany zóny alebo konduitu. IEC 62443-3-2 [9] dokonca stanovuje risk assessment a SL-T práve na úrovni zón a konduitov, nie ako ekvivalent PL konkrétnej safety funkcie.

Integračným bodom safety a security nie je samotné spojenie úrovní PL/SIL a SL, ale bezpečnostná funkcia a prvky zabezpečujúce jej vykonanie. Kybernetické narušenie ich integrity, dostupnosti alebo správnej funkcie môže znížiť schopnosť bezpečnostnej funkcie dosiahnuť požadované zníženie rizika, a tým zvýšiť výsledné safety riziko.

Príkladom integrácie safety a security je ochrana pracovného priestoru manipulátora v hutníckom priemysle. Pri jeho pohybe môže vstup osoby do nebezpečnej zóny viesť k nárazu alebo pritlačeniu. Navrhnutý safety scanner preto deteguje vstup osoby a iniciuje bezpečné zastavenie; pre túto bezpečnostnú funkciu je stanovená požiadavka PLr = d (SIL2).

Z pohľadu security sa však samotný scanner, jeho konfigurácia a ochranné pole stávajú chránenými prvkami. Neoprávnená zmena ochranného poľa alebo vyradenie scannera môže spôsobiť, že osoba nebude v nebezpečnej zóne správne detegovaná. Manipulátor sa potom nemusí zastaviť a pôvodná kybernetická hrozba môže viesť k rovnakému fyzickému dôsledku – nárazu alebo pritlačeniu osoby. V posúdení sú preto navrhnuté security opatrenia, ako uzamknutie konfigurácie, audit zmien a kontrola ochranných polí, s úrovňou SL 3.

Integračným bodom safety a security je teda bezpečnostná funkcia: safety určuje jej požadovanú účinnosť (PLr), security chráni jej integritu a dostupnosť pred kybernetickým narušením, Tab. 1.

Tab. 1 Koordinácia požiadaviek safety a security na príklade bezpečnostnej funkcie manipulátora

Oblasť	SAFETY	SECURITY
Chránená funkcia	Detekcia osoby a bezpečné zastavenie manipulátora	Ochrana safety funkcie a jej konfigurácie
Rizikový scenár	Osoba vstúpi do zóny → možný náraz/pritlačenie	Neoprávnená zmena *protective field* → osoba nemusí byť detegovaná
Požadovaná úroveň	PLr d	SL-T 3
Technické opatrenia	Safety scanner, F-PLC, safe stop	Ochrana konfigurácie, integrita komunikácie, segmentácia siete
Prístup	-	Autentifikácia, autorizácia, riadenie oprávnení
Monitoring	Diagnostika poruchy/straty funkcie	Logovanie, audit zmien, monitoring komunikácie
Reakcia na poruchu/narušenie	Safe stop, zákaz automatického cyklu	Pri strate dôveryhodnosti → bezpečný stav
Overenie	Validácia safety function, PL ≥ PLr	Kontrola konfigurácie a validácia po security zmene

Záver

Digitalizácia a rastúca konektivita strojových zariadení rozširujú tradičný rámec posudzovania rizík o kybernetické hrozby, ktoré môžu ovplyvniť bezpečnostné funkcie stroja a následne viesť k fyzickej škode. Z tohto dôvodu už nemožno safety a security moderných strojových systémov posudzovať úplne oddelene.

Príspevok poukázal na to, že procesy posudzovania rizík safety a security vychádzajú z rozdielnych princípov a používajú rozdielne ukazovatele požadovanej úrovne ochrany, a preto PLr/SIL a SL-T preto nemožno priamo porovnávať, mapovať ani matematicky kombinovať. Ich integračným bodom je bezpečnostná funkcia a prvky nevyhnutné na jej správne vykonanie. Kybernetické narušenie integrity, dostupnosti alebo konfigurácie týchto prvkov môže znížiť schopnosť bezpečnostnej funkcie zabezpečiť požadovanú úroveň zníženia rizika.

Vhodne koordinovaná koncepcia safety a security tak môže podporiť efektívne riadenie rizík počas celého životného cyklu stroja. Zmeny technického systému, jeho konfigurácie a kybernetického prostredia, ako aj výskyt nových hrozieb a útokov, môžu byť podnetom na opätovné posúdenie security rizika a primeranosti prijatých opatrení, najmä ak ich narušenie môže ovplyvniť safety funkcie a zvýšiť riziko fyzickej škody.

Poďakovanie

Tento príspevkov vznikol s podporou projektu „Riadenie POPs rizík v kontexte prechodu na udržateľnú bioekonomiku“ (akronym: POP_RISKMAN base), č. I09I04-03-V02-00050, financovaného z Plánu obnovy a odolnosti SR, komponent 9 – Efektívnejšie riadenie a podpora financovania, vývoja a inovácií.

Použitá literatúra:

[1] SICK AG. *Guide for Safe Machinery.* [online]. Dostupné na: https://www.sick.com/medias/SICK-Safety-Guide.pdf [cit. 27. 9. 2026].

[2] PAČAIOVÁ, H. – WESSELÉNYI, L. – GAZDA, T. – KOTIANOVÁ, Z. – GLATZ, J. *Posudzovanie a riadenie rizík strojových zariadení.* Košice: Technická univerzita v Košiciach / Elfa, 2020. ISBN 978-80-553-3698-5.

[3] EURÓPSKY PARLAMENT A RADA EÚ. Nariadenie (EÚ) 2023/1230 zo 14. júna 2023 o strojových zariadeniach a o zrušení smernice 2006/42/ES a smernice Rady 73/361/EHS. [online]. Dostupné na: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1230/oj [cit. 27. 9. 2026].

[4] EURÓPSKA KOMISIA**.** *Harmonizované normy.* [online]. Dostupné na: https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/goods/european-standards/harmonised-standards_en [cit. 4. 10. 2026].

[5] ISO/TR 22100-4: Bezpečnosť strojov — Vzťah k ISO 12100 — Časť 4: Návod pre výrobcov strojov na zohľadnenie súvisiacich aspektov IT bezpečnosti (kybernetickej bezpečnosti). 2018, ISO.

[6] BLOOMFIELD, Robin E., Eoin BUTLER, Sofia GUERRA a Kate NETKACHOVA, 2017. Security-informed safety: integrating security within the safety demonstration of a smart device. In: *10th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT 2017)*. La Grange Park, Illinois: American Nuclear Society, s. 423-434. Dostupné tiež z: https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/17724/.

[7] ISO 13849-1: Bezpečnosť strojov. Bezpečnostné časti riadiacich systémov. Časť 1: Všeobecné zásady navrhovania. 2023, ISO.

[8] IEC 62443: Kybernetická bezpečnosť priemyselných automatizačných a riadiacich systémov (IACS).

[9] EN IEC 62443-3-2: Bezpečnosť systémov pre priemyselnú automatizáciu a riadenie – Časť 3-2: Posudzovanie bezpečnostných rizík pre návrh systému. 2021, EN.

Autor(i):

prof. Ing. Hana Pačaiová, PhD.
profesorka
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7 , 041 00 Košice
Tel.: +4210903719474 E-mail: hana.pacaiova@tuke.sk

doc. Ing. Michal Hovanec, PhD. Ing.Paed.IGIP
vedúci katedry leteckho inžinierstva
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 041 00 Košice
Tel.: +421 911 422 732 E-mail: michal.hovanec@tuke.sk

Ing. Jaroslav Murín
člen výskumného tímu
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 041 00 Košice

Ing. Vladimír Valenčin
externý doktorand
TLM Trans, s.r.o.
Hviezdoslavova 552/5, 08301 Sabinov
Tel:
E-mail: tlmtrans@tlmtrans.sk

Ing. Katarína Dojčánová
doktorandka
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 041 00 Košice
Tel.: + 421 55 602 6158
E-mail: katarina.dojcanova@tuke.sk


ANALÝZA
TECHNICKEJ
ČISTOTY
www.ctc-lab.eu
CTC LAB
CENTRUM
TECHNICKEJ
ČISTOTY

APLIKÁCIA 3D LASEROVÉHO SKENOVANIA ROTORA PRE ZLEPŠENIE ROVNOMERNOSTI VZDUCHOVEJ MEDZERY A ZNÍŽENIE VIBRÁCIÍ GENERÁTORA VODNEJ TURBÍNY

The 3D laser scanning application for air gap improvement and decreasing of hydro generator vibration

Michal Hlavatý, Roman Jung, Tomáš Sauer

Slovenské elektrárne a.s., závod Vodné elektrárne Trenčín

Anotácia

Nadmerná odchýlka od kruhovitosti rotora, resp. nerovnomernosť vzduchovej medzery môže vytvárať nadmerné dynamické zaťaženie ložísk, magnetického a elektrického obvodu generátora. To podľa skúseností zvyšuje pravdepodobnosť vážnych porúch, ako únavové poškodenia a trhliny ložiskových a nosných častí, povolenie skrutkovania magnetických obvodov, prierazy statorového vinutia a podobne [1]. Vzhľadom na relatívne veľké rozmery generátorov vodných turbín s vyjadrenými pólmi, riešenia problému nerovnomernej vzduchovej medzery bývajú náročné na prácu a prestoje – maximálny dôraz na prípravu opravy a jej úspešnú realizáciu. Metóda 3D laserového skenovania využíva bezkontaktné zameranie vyjadrených pólov rotora a vyhodnocuje ich polohu v priestore. Výstupné dáta 3D skenu sú potom využiteľné pre úpravu polohy pólov v rámci obvodu rotora a zlepšenie jeho kruhovitosti.

Kľúčové slová: 3D laserové skenovanie, vzduchová medzera, Francisova turbína, hydrogenerátor, rotor s vyjadrenými pólmi

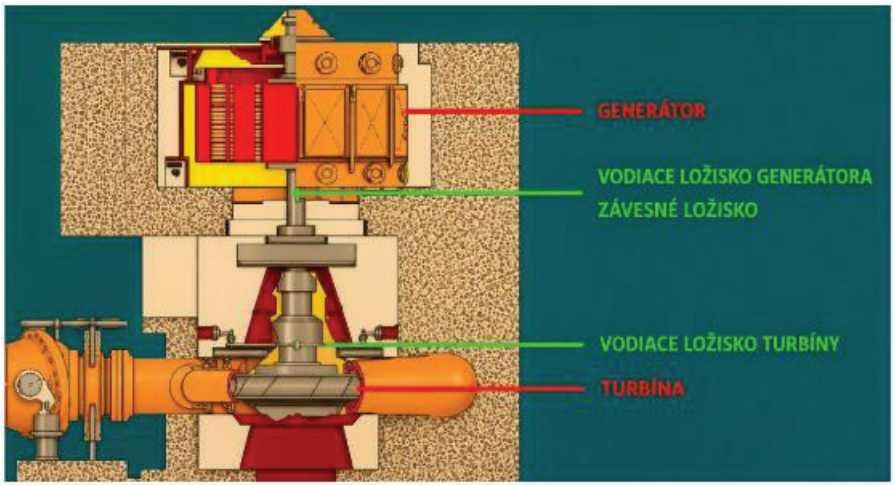
Abstract

The article deals with application of the laser scanning of the hydro generator for rotor circularity improvement. The excessive rotor non-circularity, respectively non-uniformity of air gap makes a large dynamic load on bearing, magnetic and electric parts of the generator, which can cause serious damages (failure of bearing, screws and laminates loosing, short-circuit of stator winding, etc. [1]). Because of large dimensions of salient-pole generators, solutions of the air gap non-uniformity are difficult in terms of downtime and cost – there is maximum effort for precision repair. The mentioned 3D laser scanning method uses non-contact detecting of localization all salient poles of rotor. Then we can use the output data from 3D method for rotor circularity mechanical improvement.

Keywords: *3D laser scanning, air gap, Francis turbine, salient-pole rotor, hydro generator*

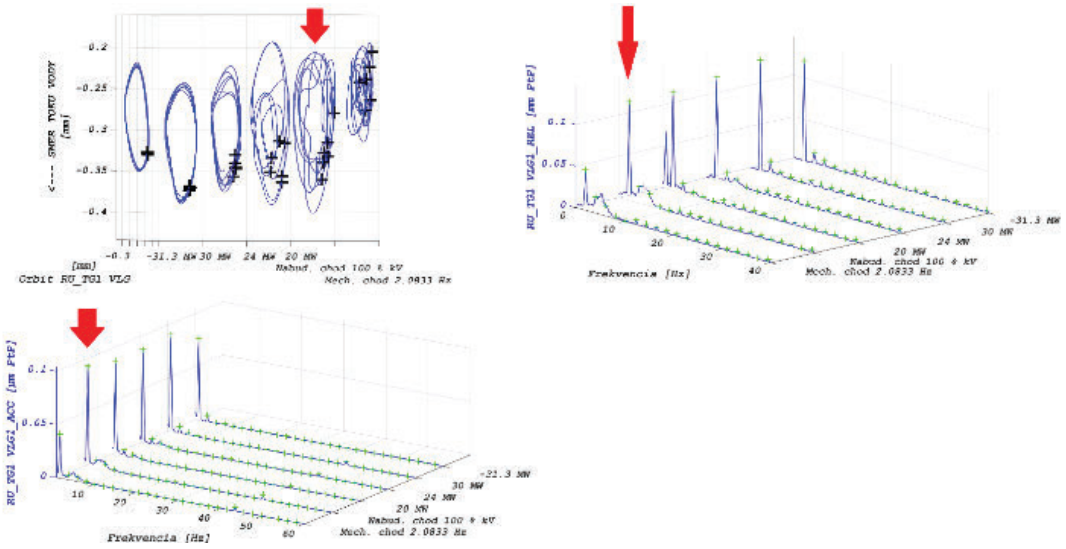
1. Vibračné príznaky zvýšenej nekruhovitosti rotora generátora

Daný problém sa týka rotora synchrónneho motorgenerátora na prečerpávacej vodnej elektrárni Ružín s výkonom asi 30 MW, s jedným radiálnym vodiacim ložiskom (Obr.1). Priemer rotora s vyjadrenými pólmi je 6,5 m.



Obr. 1 Schéma sústrojenstva PVE Ružín

Príznaky nerovnomernej vzduchovej medzery sa prejavovali na zvýšenom namáhaní telesa generátorového ložiska, kde boli merané hodnoty efektívnej rýchlosti do 0,6 mm/s a rozkmitu hriadeľa do 120 µm. Pri otáčkach 125 min^{-1} tieto hodnoty boli zásadne vyššie ako pri podobných sústrojenstvách a aj pri porovnávaní s normami ISO 10816-5 a ISO 20816-5 zasahovali hlboko do pásiem prevádzky so zvýšeným nebezpečenstvom poškodenia / havárie. Hlavný vibračný príznak bolo výrazné zvýšenie otáčkovej amplitúdy vibrácií hriadeľa a telesa ložiska pri nabudení synchrónneho generátora (Obr. 2).



Obr. 2: Porovnanie mechanického, elektrického a výkonových behov (šípky označujú elektrický chod): vľavo hore: Orbity generátorového hriadeľa; vpravo hore: Spektrá hriadeľových vibrácií ; dole: Spektrá rozkmitov ložiska

Z hľadiska elektrických parametrov ako izolačné odpory alebo indukčnosť pólov bol rotor v poriadku. Teda, predpokladal sa výskyt problému s nerovnomerným magnetickým ťahom rotora, t.j. s nerovnomernou vzduchovou medzerou. Tento problém spôsobuje magnetický ťah pólov rotora k statoru, ktorý je väčší, čím je menšia vzduchová medzera medzi pólom a statorom – ak je na jednej strane rotora menšia vzduchová medzera ako na protiľahlej, vytvára sa elektromagnetický ťah v smere menšej medzery. Pri prevádzke generátora sa

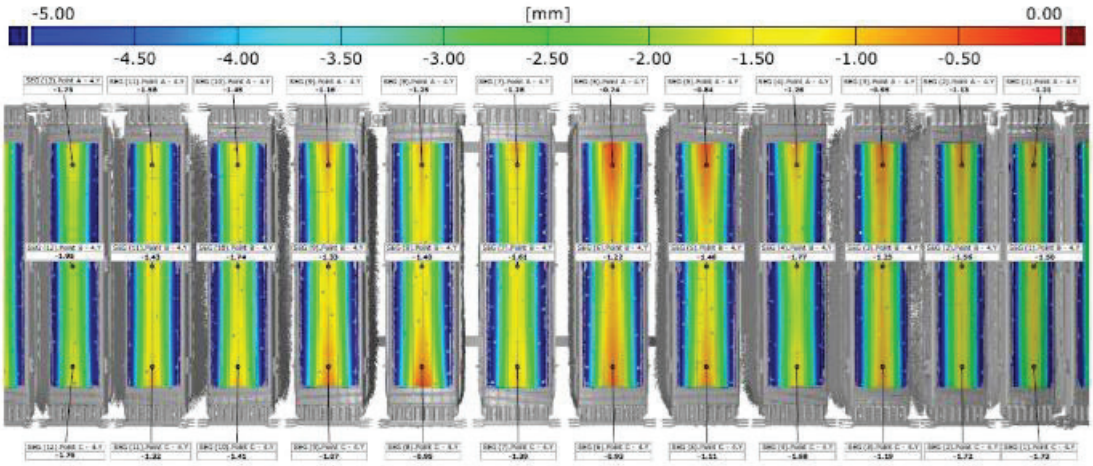
potom prejavuje podobne ako mechanická nevyváženosť, t.z. spôsobuje vyššiu amplitúdu na otáčkovej frekvencii.

2. Kvantifikácia nekruhovitosti rotorových pólov metódou 3D laserového skenovania a úprava výšky pólov

Vzhľadom na rozmery generátora a nemožnosť potvrdenia hypotézy o nerovnomernej medzere dostupnými metódami, príležitosť zmerať kruhovitosť rotora bola možná až pri plánovanej generálnej oprave, kedy bol celý rotor vytiahnutý a póly rotora prístupné (Obr.3). Bolo odporúčané využiť metódu 3D laserového skenovania, ktoré spĺňa požiadavky na presnosť geometrického zamerania pri požadovanej presnosti < 0,1 mm (výrobcom garantovaná je v stotinách milimetra), čo aj bolo schválené a uskutočnené. Príklad z tohto skenovania je na Obr. 4, kde vidieť zobrazenie časti obvodu rotora s hodnotami meranými v troch výškových rovinách (horná, stredná a dolná). Tieto hodnoty vyjadrujú odchýlku povrchu pólov od ideálneho priemeru.



Obr. 3 Rotor generátora s vyjadrenými pólmi vo vytiahnutom stave na podstavci

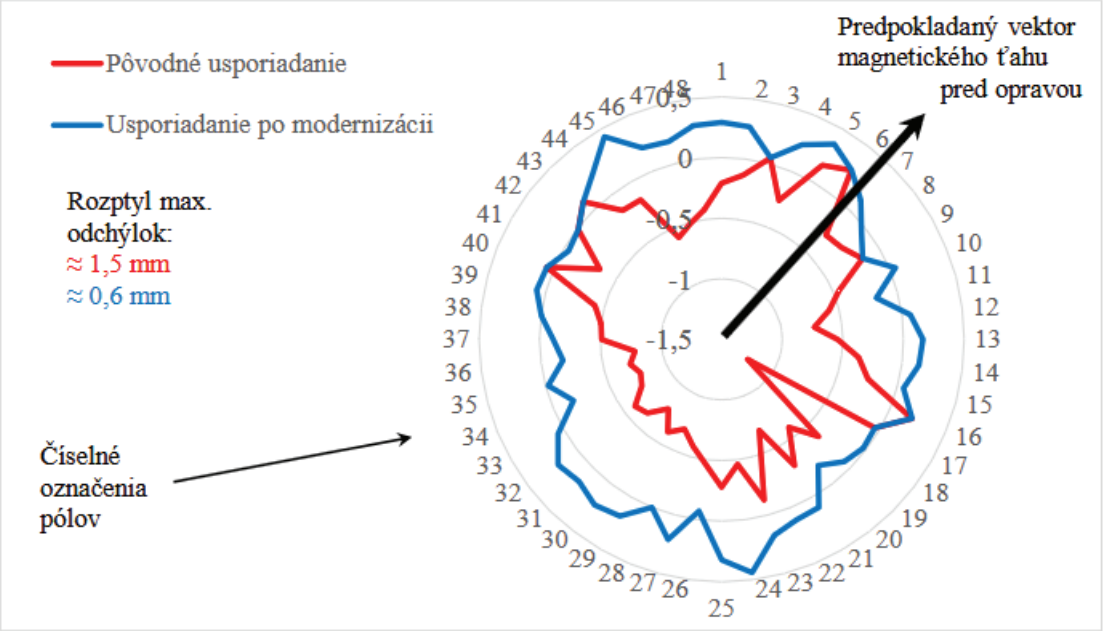


Obr. 4 Príklad zobrazenia 3D skenu pólov rotora s nameranými hodnotami odchýlok

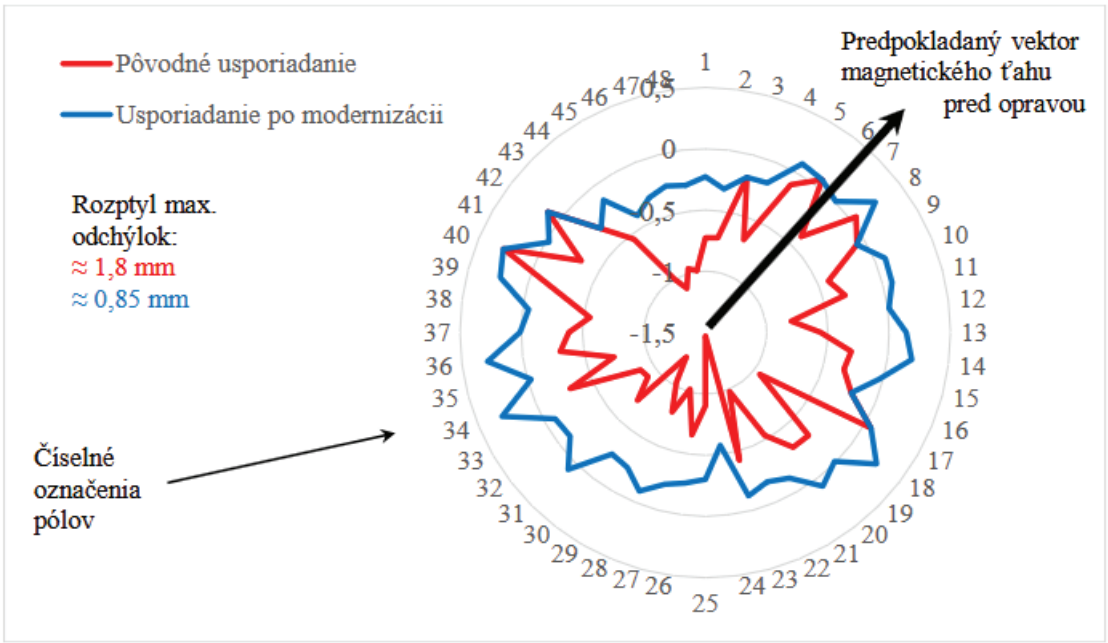
Výsledkom tohto skenovania sú polárne grafy odchýlok pólov od ideálneho priemeru v troch rovinách výšky pólov (červené priebehy na Obr. 5 a Obr. 6). Z grafov vyplýva, že

maximálny rozptyl odchýlok pólov vo všetkých prípadoch presahuje všeobecné odporučenú hodnotu (10% z absolútnej hodnoty vzduchovej medzery), čo je v tomto prípade 1,4 mm. Podstatným zistením je, že približne v rozsahu pólov č. 3 až č.10 sú póly viac vysunuté od stredu ako na protiľahlej strane, čo podporuje predpoklad o elektromagnetickej nevývahe.

Namerané odchýlky od ideálneho priemeru boli vyhodnotené ako nevyhovujúce a bolo rozhodnuté o vykonaní opravy, ktorá by nekruhovitosť rotora dostala do vyhovujúceho stavu. Oprava využívala vypodkladanie pólov plechmi s hrúbkami 0,2 ; 0,3 ; 0,5 a 1,0 mm, resp. ich kombináciou. Výsledné odchýlky po oprave sú zobrazené modrými priebehmi na Obr. 5 a Obr. 6.



Obr. 5 Porovnanie odchýlok pólov od ideálneho priemeru v hornej meracej rovine (horná časť pólov) – mierka rozostupov kružníc je 0,5 mm

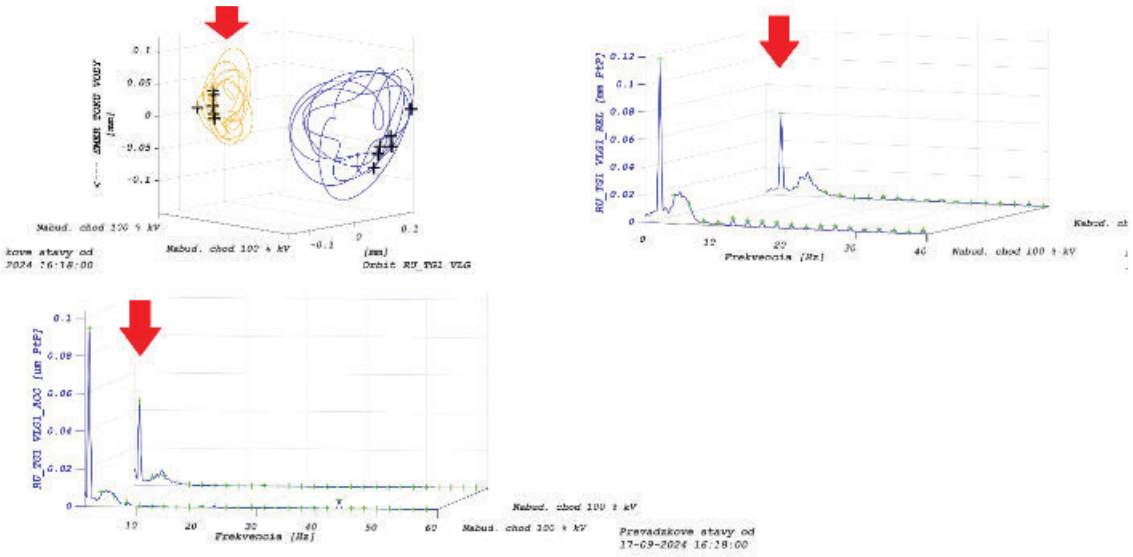


Obr. 6 Porovnanie odchýlok pólov od ideálneho priemeru v dolnej meracej rovine (spodná časť pólov) – mierka rozostupov kružníc je 0,5 mm

Je zrejmé zníženie maximálneho rozptylu odchýlok pólov približne na polovicu, ktorý už vyhovuje hodnote 10% z absolútnej hodnoty vzduchovej medzery. Taktiež tu nie sú výraznejšie výstupy pólov od stredu bez kompenzácie protiľahlými pólmi ako pred opravou. Výsledné hodnoty odchýlok boli teda hodnotené už ako vyhovujúce a rotor spätne namontovaný do generátora. Ako posledný krok sa vykonalo mechanické dovyváženie, pri ktorom sa kompenzoval príspevok pridaných plechov v konštrukcii rotora.

3. Namerané hodnoty vibrácií po úprave výšky pólov

Meranie vibrácií potvrdilo predpoklad dostatočného zlepšenia kruhovitosti vykonanou opravou. Vibrácie hriadeľa aj telesa ložiska sa pri elektrickom (nabudenom) a prifázovanom chode generátora zásadne znížili (1/3 až 1/2 hodnôt pred opravou), Obr. 7. Tieto hodnoty sú porovnateľné s vedľajším sústrojenstvom aj s ďalšími podobnými strojmi, pri ktorých sú vibrácie hodnotené ako bezproblémové. S tým sa zmenilo aj normatívne hodnotenie generátorového ložiska, ktoré prešlo z pásiem prevádzky so zvýšeným nebezpečenstvom do pásiem prevádzky s akceptovateľnými vibráciami. Podľa noriem ISO 7919-5 a ISO 20816-5 je zaradenie v pásme A-B, podľa normy ISO 10816-5 je v pásme C. Celkovo sa teda predpokladá dlhodobá prevádzka bez zásadných vibračných problémov.



Obr. 7 Porovnanie elektrického behu pred a po oprave: vľavo hore (šípky označujú vibrácie po oprave): Orbity generátorového hriadeľa; vpravo hore: Spektrá hriadeľových vibrácií ; dole: Spektrá rozkmitov ložiska

Záver

Prevedenie vykonanej opravy s využitím 3D laserového skenovania polohy rotorových pólov sa premietlo do zásadného zlepšenia vibračnej odozvy. Metóda 3D skenu sa pre tento účel ukázala ako vhodná z hľadiska jednoduchosti a požadovanej presnosti. Jedinou nevýhodou, podobne ako pri viacerých metódach zisťovania kruhovitosti rotorov, je potreba demontáže rotora von z generátora – to znamená použitie iba pri väčších opravách.

Dosiahnuté vibračné výsledky po oprave sa považujú za plne vyhovujúce pre dlhodobo spoľahlivú prevádzku generátora.

Použitá literatúra:

[1] Roman Jung, Michal Hlavatý: Vyriešenie technického problému po 45 rokoch – oprava rotora generátora PVE Ružín, DIS Košice 2018

Autor(i):

Ing. Michal Hlavatý, PhD.
Senior technik diagnostiky
Slovenské elektrárne a.s., závod Vodné elektrárne
Soblahovská 2, 911 69 Trenčín
Tel.: +421 910 674 055 E-mail: michal.hlavaty@seas.sk

Ing. Roman Jung
Senior technik diagnostiky
Slovenské elektrárne a.s., závod Vodné elektrárne
Soblahovská 2, 911 69 Trenčín
Tel.: +421 910 674 182 E-mail: roman.jung@seas.sk

Ing. Tomáš Sauer
Technik diagnostiky
Slovenské elektrárne a.s., závod Vodné elektrárne
Soblahovská 2, 911 69 Trenčín
Tel.: +421 910 801 830 E-mail: tomas.sauer@seas.sk

BEZPEČNÁ ÚDRŽBA CNC ZARIADENÍ S VYUŽITÍM DIGITÁLNEJ ERGONÓMIE

Safe Maintenance of CNC Equipment Using Digital Ergonomics

Maryna Yeromina, Darina Dupláková, Ján Duplák, Matej Cichý

Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, 08 001, Slovakia

Anotácia

Predkladaný článok sa zaoberá hodnotením posturálnej záťaže pracovníka pri vykonávaní úkonov údržby CNC stroja. Posturálna záťaž pracovníka bola zaznamenávaná bezkontaktným snímaním pohybov prostredníctvom zariadenia Microsoft Kinect s prenosom do digitálneho prostredia softvéru Technomatix Jack. Kinematické premenné analyzovaných segmentov boli v reálnom čase prenášané na digitálny model človeka a následne analyzované metódou OWAS. Predmetom posudzovania boli 4 pracovné polohy zaznamenávané počas realizácie servisného úkonu. Vzhľadom na realizované analýzy boli identifikované zaťaženia lumbosakrálnej oblasti (L4/L5) s preukázaním závislosti miery posturálneho rizika od polohy tela. Realizované analýzy umožňujú objektívne identifikovať rizikové faktory priamo počas procesov údržby. Zároveň poskytujú dátový základ pre revíziu a vytváranie štandardných bezpečných pracovných postupov s cieľom prevencie muskuloskeletálnych porúch.

Kľúčové slová: digitálna ergonómia, posturálna záťaž, údržba CNC strojov, OWAS, DHM

Abstract

This paper addresses the assessment of the postural load of a worker during the performance of maintenance operations on a CNC machine. The worker's postural load was recorded by non-contact motion capture using a Microsoft Kinect device, with data transfer into the digital environment of Tecnomatix Jack software. The kinematic variables of the analysed segments were transferred in real time to a digital human model and subsequently analysed using the OWAS method. The assessment focused on four working postures recorded during the performance of the service operation. Based on the analyses carried out, loading of the lumbosacral region (L4/L5) was identified, demonstrating the dependence of the level of postural risk on body posture. The analyses performed make it possible to objectively identify risk factors directly during maintenance processes. At the same time, they provide a data basis for the revision and development of standard safe working procedures aimed at the prevention of musculoskeletal disorders.

Keywords: *digital ergonomics, postural load, CNC machine maintenance, OWAS, DHM*

Úvod

Pri údržbe priemyselných zariadení sú často vykonávané pracovné úkony v ergonomicky nepriaznivých polohách, ktoré môžu zvyšovať riziko vzniku muskuloskeletálnych porúch. Význam hodnotenia ergonomických rizík pri údržbe dokumentovali Ramlee a kol., ktorí u pracovníkov údržby vojenských lietadiel zaznamenali zvýšený výskyt ťažkostí najmä v oblasti ramien, kolien, driekovej časti chrbtice a krku [1]. Uvedené zistenia poukazujú na

potrebu objektívneho posudzovania pracovných polôh ako podkladu na identifikáciu rizikových činností a návrh ergonomických opatrení. Na význam prepojenia hodnotenia rizík s kontrolou údržbárskej dokumentácie a pracovných postupov poukazujú Heinonen a kol. [2], zatiaľ čo Guo a kol. uvádzajú možnosti využitia virtuálnej simulácie a ergonomického hodnotenia pri posudzovaní pracovného priestoru a realizácie údržbárskych operácií [3]. Využitie digitálneho modelovania človeka pri znižovaní ergonomických rizík a optimalizácii pracovných procesov je podporené aj ďalšími štúdiami [4, 5].



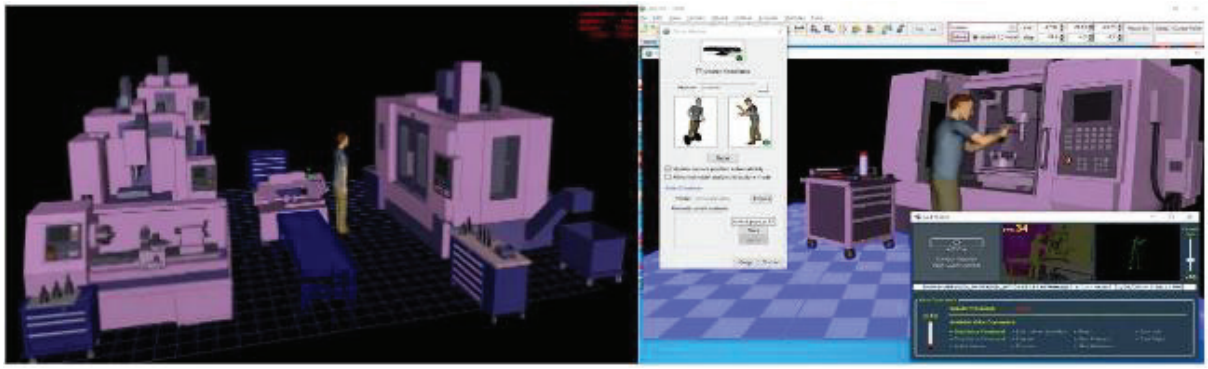
Obr. 1 Schéma postupu hodnotenia pracovných polôh metódou OWAS a návrhu nápravných opatrení [6]

Na hodnotenie posturálnej záťaže je možné použiť metódu OWAS (Obr. 1), ktorá klasifikuje pracovné polohy na základe polohy chrbta, horných a dolných končatín a zohľadňuje aj manipulované zaťaženie. Výsledná akčná kategória vyjadruje úroveň ergonomického rizika a potrebu realizácie nápravných opatrení [6]. Výber hodnotiacej metódy by mal zohľadňovať charakter pracovnej činnosti, keďže metódy OWAS, RULA a REBA sa odlišujú rozsahom hodnotenia a spôsobom interpretácie výsledkov [7]. Možnosti získavania údajov o pracovných polohách rozširujú technológie snímania ľudského pohybu, ktoré umožňujú ich následné digitálne spracovanie a analýzu [8]. Ich využiteľnosť v priemyselnom prostredí bola overovaná aj pomocou nositeľných snímačov pohybu [9]. Bezkontaktnú alternatívu predstavuje zariadenie Kinect, ktorého presnosť pri odhade polohy telesných segmentov na účely ergonomickej analýzy hodnotili Plantard a kol. [10]. Získané kinematické údaje môžu byť využité v digitálnom modeli človeka na analýzu pracovných polôh vo vzťahu k usporiadaniu pracoviska a na identifikáciu ergonomických nedostatkov [11].

Cieľom predkladaného článku je analyzovať pracovné polohy pracovníka pri vybraných úkonoch údržby CNC stroja a určiť mieru posturálnej záťaže jednotlivých činností. Pozornosť je zameraná najmä na identifikáciu pracovných polôh, ktoré môžu predstavovať zvýšené ergonomické riziko pri vykonávaní údržby. Získané výsledky sú zároveň posudzované z hľadiska ich možného využitia pri následnej revízii a optimalizácii údržbárskych postupov, s cieľom obmedziť výskyt nepriaznivých pracovných polôh a znížiť posturálnu záťaž pracovníka.

1. Materiál a metódy

Na účely ergonomickej analýzy bol v softvérovom prostredí Tecnomatix Jack 9.0 vytvorený digitálny model pracoviska, ktorý zahŕňal vybrané CNC zariadenia, pomocné pracovné prostriedky a digitálny model človeka (Obr.2). Virtuálne pracovisko bolo vytvorené v súlade s reálnym usporiadaním pracovného priestoru, čo umožnilo posudzovanie pracovných polôh pri vykonávaní údržbárskych činností. Pracovné polohy pracovníka boli zaznamenávané pomocou bezkontaktného snímača Microsoft Kinect, ktorý umožňoval snímanie polohy jednotlivých segmentov ľudského tela. Údaje zo snímača Kinect boli počas snímania priamo prenášané do prostredia Tecnomatix Jack 9.0 a priebežne aplikované na digitálny model človeka, čím bola umožnená reprodukcia pracovných polôh vo virtuálnom prostredí v reálnom čase.

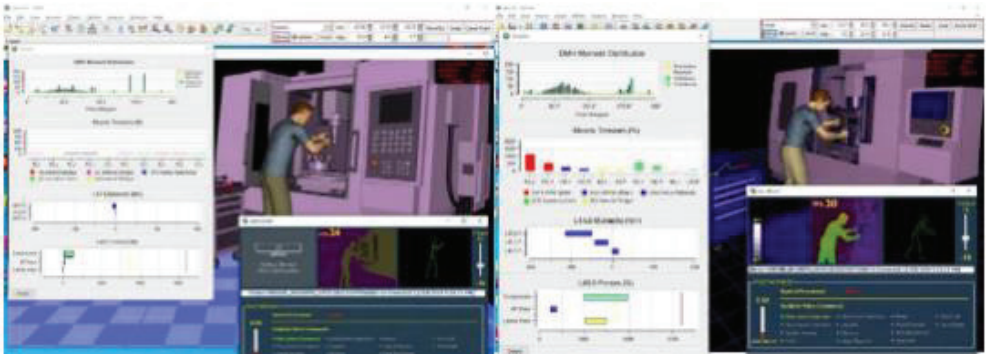


Obr. 2 Digitálny model pracoviska v Tecnomatix Jack 9.0 (vľavo) a snímanie pracovnej polohypomocou Kinectu (vpravo)

Ergonomické hodnotenie bolo následne vykonané metódou OWAS (Ovako Working Posture Analysis System). Pri jednotlivých pracovných polohách bola posudzovaná poloha chrbta, horných a dolných končatín spolu s manipulovaným zaťažením. Na základe výsledkov boli identifikované polohy spojené so zvýšenou posturálnou záťažou slúžiace ako podklad pre návrh zmien v postupoch údržby s cieľom znížiť fyzické zaťaženie pracovníka.

2. Výsledky a diskusia

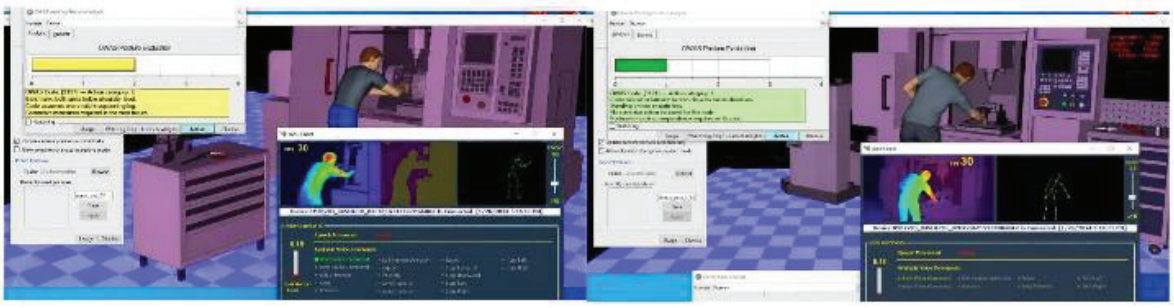
Na analýzu pracovných polôh zamestnanca počas výkonu údržby bolo využité zariadenie Microsoft Kinect, prostredníctvom ktorého bola zachytaná reálna pracovná poloha v digitálnom prostredí softvéru Tecnomatix Jack. Reálne zachytenie pracovnej polohy počas výkonu údržby poskytlo možnosť dynamického posudzovania záťaže pri jednotlivých pracovných polohách (Obr. 3).



Obr. 3 Výsledky snímania pracovných polôh a analýzy zaťaženia pri údržbe CNC zariadenia – poloha počas úkonu 1 (vľavo) a poloha počas úkonu 2 (vpravo)

Pri pracovnej polohe počas úkonu 1, charakterizovanej predklonom trupu, sa momenty v oblasti L4/L5 pohybovali v rozsahu −10 až 0 Nm. Kompresná sila dosahovala 0,1 až 0,5 kN, pričom translačná a AP sily zostávali pod úrovňou 0,1 kN. Pri pracovnej polohe počas úkonu 2, spojenej s predklonom trupu a vysunutím horných končatín do pracovného priestoru stroja, sa moment L4/L5 v osi X pohyboval v rozsahu −110 až −50 Nm, v osi Y od −40 do −10 Nm a v osi Z od 0 do 15 Nm. Kompresná sila dosahovala 2,0 až 4,0 kN, translačná sila 0,5 až 0,8 kN a AP sila 2,0 až 3,0 kN. Rozdielne hodnoty momentov a síl zaznamenané pri oboch úkonoch poukazujú na závislosť zaťaženia oblasti L4/L5 od charakteru vykonávanej pracovnej polohy.

Následne bola vykonaná ergonomická analýza pomocou metódy OWAS, prostredníctvom ktorej boli hodnotené štyri vybrané pracovné polohy zaznamenané počas údržby CNC zariadenia. Jednotlivé polohy boli klasifikované podľa postavenia trupu, horných a dolných končatín a zaradené do príslušných akčných kategórií podľa úrovne posturálnej záťaže (Obr. 4).

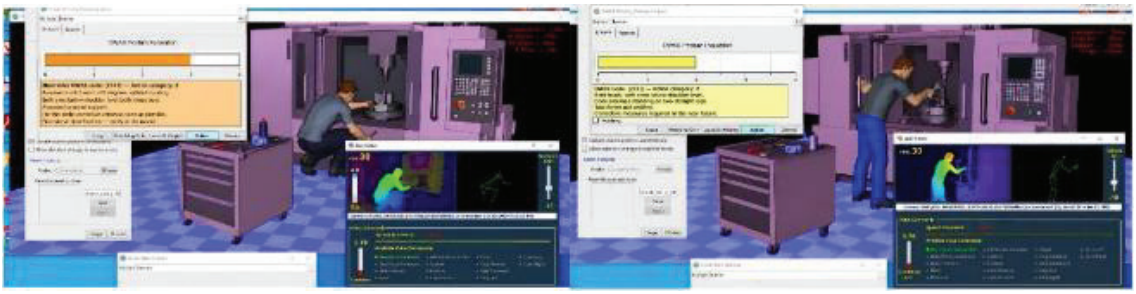


Obr. 4 Výsledky hodnotenia pracovných polôh metódou OWAS pri úkone 1 – akčná kategória 2 (vľavo) a pri úkone 2 – akčná kategória 1 (vpravo)

Pri úkone 1 bola pracovná poloha metódou OWAS klasifikovaná kódom 2131 a zaradená do akčnej kategórie 2 na štvorstupňovej škále. Kód 2131 vyjadruje predklon trupu (2), obe horné končatiny pod úrovňou ramien (1), oporu prevažne o jednu vystretú dolnú končatinu (3) a kategóriu zaťaženia 1. Výsledné zaradenie do akčnej kategórie 2 znamená, že pri tejto pracovnej polohe sa odporúča realizácia nápravných opatrení v blízkej budúcnosti. Zaradenie do druhej akčnej kategórie poukazuje na potrebu venovať tejto pracovnej polohe

osobitnú pozornosť a pri jej opakovanom alebo dlhodobom výskyte zvážiť úpravu spôsobu vykonávania pracovného úkonu.

Pri úkone 2 bola pracovná poloha klasifikovaná kódom 3121 a zaradená do akčnej kategórie 1. Kód 3121 predstavuje bočné vychýlenie alebo rotáciu trupu (3), obe horné končatiny pod úrovňou ramien (1), stoj na dvoch vystretých dolných končatinách (2) a kategóriu zaťaženia 1. Akčná kategória 1 podľa hodnotenia OWAS nevyžaduje nápravné opatrenia. Porovnanie oboch úkonov teda ukázalo zaradenie úkonu 1 do kategórie 2 a úkonu 2 do kategórie 1, pričom rozdiel bol podmienený najmä polohou trupu a dolných končatín.



Obr. 5 Výsledky hodnotenia pracovných polôh metódou OWAS pri úkone 3 – akčná kategória 3 (vľavo) a pri úkone 4 – akčná kategória 2 (vpravo)

V rámci hodnotenia úkonu 3 (Obr. 5) bola pracovná poloha klasifikovaná kódom 2141 a zaradená do akčnej kategórie 3. Kód 2141 vyjadruje predklon trupu presahujúci 20° bez rotácie (2), obe horné končatiny pod úrovňou ramien (1), pokrčenie oboch dolných končatín (4) a kategóriu zaťaženia 1. Zaradenie do akčnej kategórie 3 na štvorstupňovej škále OWAS znamená potrebu vykonať nápravné opatrenia v čo najkratšom čase, najmä vzhľadom na kombináciu predklonu trupu a práce s pokrčenými dolnými končatinami.

Pri úkone 4 bola pracovná poloha klasifikovaná kódom 2121 a zaradená do akčnej kategórie 2. Kód 2121 predstavuje predklon trupu (2), obe horné končatiny pod úrovňou ramien (1), stoj na dvoch vystretých dolných končatinách (2) a kategóriu zaťaženia 1. Výsledné zaradenie do akčnej kategórie 2 poukazuje na potrebu venovať tejto pracovnej polohe osobitnú pozornosť a pri jej opakovanom alebo dlhodobom výskyte zvážiť úpravu spôsobu vykonávania pracovného úkonu.

Na základe snímania pracovných polôh pomocou zariadenia Kinect a ich následného vyhodnotenia v prostredí Tecnomatix Jack 9.0 boli pri jednotlivých úkonoch údržby CNC zariadenia zaznamenané rozdiely v posturálnej záťaži. Hodnotenie metódou OWAS ukázalo, že analyzované polohy boli zaradené do akčných kategórií 1 až 3. Pri úkone 2 bola pracovná poloha zaradená do akčnej kategórie 1, ktorá nevyžaduje nápravné opatrenia. Úkony 1 a 4 boli zaradené do akčnej kategórie 2, pri ktorej je vhodné zvážiť úpravu spôsobu vykonávania činnosti, zatiaľ čo úkon 3 bol zaradený do akčnej kategórie 3, čo poukazuje na potrebu bezodkladného zváženia nápravných opatrení. Rozdiely v klasifikácii súviseli najmä s predklonom trupu a postavením dolných končatín, pričom pri úkone 3 bola zaznamenaná kombinácia predklonu trupu a pokrčenia oboch dolných končatín. Výsledky ergonomického hodnotenia môžu byť využité nielen na identifikáciu rizikových pracovných polôh, ale aj ako podklad pri tvorbe, overovaní a revízii postupov údržby.

Pri spracovaní údržbárskych postupov je potrebné vychádzať z požiadaviek stanovených výrobcom a príslušných bezpečnostných noriem. Norma ISO 12100 [12] stanovuje všeobecné zásady posudzovania a znižovania rizík, ISO 14118 [13] sa zaoberá zabránením neočakávanému uvedeniu stroja do chodu a ISO 16090-1 [14] špecifikuje bezpečnostné požiadavky pre obrábacie centrá a frézovacie stroje. Na tieto požiadavky nadväzuje ISO 20607 [15], ktorá upravuje spracovanie návodov na používanie, a ISO 6385 [16], zameraná na ergonomické zásady návrhu pracovných systémov. Keďže uvedené normy neurčujú konkrétnu pracovnú polohu pri jednotlivých údržbárskych úkonoch, ergonomické hodnotenie metódou OWAS môže predstavovať doplnkový vstup do tvorby alebo revízie údržbárskeho postupu a umožniť prepojenie požiadaviek stanovených výrobcom, bezpečnostných noriem a hodnotenia pracovnej polohy pracovníka.

Záver

V predkladanom článku bola hodnotená posturálna záťaž pracovníka pri vybraných úkonoch údržby CNC stroja s využitím bezkontaktného snímania zariadením Microsoft Kinect, digitálneho modelu človeka v prostredí Tecnomatix Jack a metódy OWAS. Analýza pracovných polôh preukázala zaťaženie lumbosakrálnej oblasti (L4/L5) a potvrdila závislosť miery posturálneho rizika od polohy tela. Prenos kinematických údajov v reálnom čase na digitálny model človeka umožnil objektívne identifikovať rizikové faktory priamo počas procesov údržby. Získané výsledky poskytujú dátový základ pre revíziu a vytváranie štandardných bezpečných pracovných postupov s cieľom znižovať posturálnu záťaž a predchádzať vzniku muskuloskeletálnych porúch.

Poďakovanie

Táto práca bola podporená Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci grantu VEGA 1/0302/25 a Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky v rámci grantu KEGA 014TUKE-4/2024.

Použitá literatúra:

[1] RAMLEE, Siti Nurhafizah Saleeza, et al. Prevalence of work-related Musculoskeletal disorders (WMSDs) and ergonomic risk assessment among military aircraft maintenance personnel. *Advances in Public Health*, 2025, 2025.1: 9304266.

[2] HEINONEN, Hanna, et al. Evaluating the benefits of collaborative VR review for maintenance documentation and risk assessment. *Applied Sciences*, 2022, 12.14: 7155.

[3] GUO, Ziyue, et al. A quantitative assessment method for the space design of products based on ergonomics and virtual simulation. *Plos one*, 2018, 13.7: e0200880.

[4] GROBELNY, Jerzy; MICHALSKI, Rafał. Preventing work-related musculoskeletal disorders in manufacturing by digital human modeling. *International journal of environmental research and public health*, 2020, 17.22: 8676.

[5] BRUNZINI, Agnese, et al. A preliminary experimental study on the workers' workload assessment to design industrial products and processes. *Applied Sciences*, 2021, 11.24: 12066.

[6] GÓMEZ-GALÁN, Marta, et al. Musculoskeletal disorders: OWAS review. *Industrial health*, 2017, 55.4: 314-337.

[7] KEE, Dohyung. Systematic comparison of OWAS, RULA, and REBA based on a literature review. *International journal of environmental research and public health*, 2022, 19.1: 595.

[8] RYBNIKÁR, Filip, et al. Ergonomics evaluation using motion capture technology—literature review. *Applied Sciences*, 2022, 13.1: 162.

[9] ONOFREJOVA, Daniela, et al. Ergonomic assessment of physical load in Slovak industry using wearable technologies. *Applied Sciences*, 2022, 12.7: 3607.

[10] PLANTARD, Pierre, et al. Pose estimation with a kinect for ergonomic studies: Evaluation of the accuracy using a virtual mannequin. *Sensors*, 2015, 15.1: 1785-1803.

[11] DA SILVA, Adailton Goncalves; MENDES GOMES, Marcus Vinicius; WINKLER, Ingrid. Virtual reality and digital human modeling for ergonomic assessment in industrial product development: a patent and literature review. *Applied Sciences*, 2022, 12.3: 1084.

[12] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12100:2010. Safety of machinery - General principles for design — Risk assessment and risk reduction. Geneva: ISO, 2010. https://www.iso.org/standard/51528.html

[13] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14118:2017. Safety of machinery - Prevention of unexpected start-up. Geneva: ISO, 2017. https://www.iso.org/standard/66460.html

[14] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 16090-1:2022. Machine tools safety — Machining centres, milling machines, transfer machines — Part 1: Safety requirements. Geneva: ISO, 2022. https://www.iso.org/standard/81558.html

[15] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 20607:2019. Safety of machinery — Instruction handbook — General drafting principles. Geneva: ISO, 2019. https://www.iso.org/standard/68519.html

[16] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6385:2016. Ergonomics principles in the design of work systems. Geneva: ISO, 2016. https://www.iso.org/standard/68519.html.

Autor(i):

Ing. Maryna Yeromina, PhD.
odborný asistent
Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove
Bayerova 1
080 01 Prešov
Tel.: E-mail: maryna.yeromina@tuke.sk

doc. Ing. Darina Dupláková, PhD.
docent
Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove
Bayerova 1
080 01 Prešov
Tel.: E-mail: darina.duplakova@tuke.sk

doc. Ing. Ján Duplák, PhD.
docent
Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove
Bayerova 1
080 01 Prešov
Tel.: E-mail: jan.duplak@tuke.sk

Ing. Matej Cichý
Interný doktorand
Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove
Bayerova 1
080 01 Prešov
Tel.: E-mail: matej.cichy@tuke.sk

VYUŽITIE POČÍTAČOVEJ SIMULÁCIE PRI PLÁNOVANÍ PREVENTÍVNEJ ÚDRŽBY ROBOTIZOVANÉHO PRACOVISKA POVRCHOVEJ ÚPRAVY

Application of Computer Simulation in Preventive Maintenance Planning of a Robotic Surface Treatment Workstation

Ján Duplák, Maryna Yeromina, Darina Dupláková, Samuel Mikuláško

Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, 08 001, Slovakia

Anotácia

Predkladaný článok sa zaoberá plánovaním preventívnej údržby robotizovaného pracoviska povrchovej úpravy s využitím počítačovej simulácie. Prevádzkové stavy pracoviska boli simulované prostredníctvom 3D modelu v prostredí softvéru FlexSim s integráciou technologických nádrží, robotického manipulátora a lineárneho pojazdu. Časové a stavové charakteristiky pracovného cyklu boli zaznamenávané v modeli a následne analyzované z hľadiska identifikácie intervalov nečinnosti manipulátora. Predmetom posudzovania bolo zaradenie krátkodobého preventívneho zásahu údržby do zistených prestojových časov počas výrobného cyklu. Vzhľadom na realizované analýzy boli vyhodnotené časové odozvy systému s preukázaním možnosti vykonania plánovanej údržby bez narušenia technologickej a manipulačnej sekvencie operácií. Realizované analýzy umožňujú overiť časové zaradenie zásahov preventívnej údržby priamo v dynamike výrobného procesu. Zároveň poskytujú dátový základ pre návrh a aktualizáciu plánov údržby v súlade s požiadavkami príslušných technických a ISO noriem.

Kľúčové slová: počítačová simulácia, robotizované pracovisko, povrchová úprava, preventívna údržba, plánovanie údržby.

Abstract

This article is focused on the potential use of computer simulation as a supporting tool for planning preventive maintenance of a robotic surface-treatment workstation. A 3D simulation model was developed in the FlexSim environment, consisting of technological tanks, a robotic manipulator, and a linear travel system. Based on an analysis of the temporal course of the operating cycle, periods of inactivity of the robotic manipulator were identified, and a simulation scenario incorporating a short-term preventive maintenance intervention was subsequently created. Evaluation of the model's state and time characteristics made it possible to assess the impact of the proposed intervention on the production process. The results showed that a suitably selected idle period can be used to perform planned maintenance without disrupting the basic sequence of technological and handling operations. Simulation therefore represents a suitable tool for assessing the timing of preventive maintenance, while its planning and implementation must comply with applicable technical standards and relevant ISO standards.

Keywords: *computer simulation, robotic workstation, surface treatment, preventive maintenance, maintenance planning*

Úvod

Údržba výrobných zariadení predstavuje významný faktor ovplyvňujúci ich prevádzkovú dostupnosť, spoľahlivosť a plynulosť výrobného procesu. Jedným zo základných prístupov zameraných na predchádzanie poruchám je preventívna údržba, ktorej cieľom je realizovať plánované údržbové zásahy ešte pred vznikom poruchového stavu. Efektívnosť preventívnej údržby však nezávisí iba od rozsahu a časových intervalov vykonávaných činností, ale aj od ich vhodného časového zaradenia do prevádzky. Prehľadová štúdia Basri et al. [1] poukazuje na význam plánovania preventívnej údržby a na široké využitie matematických, simulačných a optimalizačných metód pri návrhu údržbových stratégií. Plánovanie údržby v podmienkach výrobných systémov je úzko previazané s organizáciou samotnej výroby. Realizácia preventívneho zásahu spravidla vyžaduje dočasné vyradenie zariadenia z prevádzky, čo môže viesť k zníženiu výrobného výkonu alebo k narušeniu časového harmonogramu. Triska et al. [2] zdôrazňujú, že výrobné a údržbové činnosti využívajú spoločné zdroje a ich plánovanie je preto vhodné riešiť integrovane. Podobne Assad Neto et al. [3] uvádzajú, že preventívne zásahy môžu predstavovať stratu výrobného výkonu, pričom jednou z možností jej obmedzenia je využitie vznikajúcich prevádzkových príležitostí, napríklad dočasnej nečinnosti zariadenia.

Pri riešení uvedeného problému možno využiť počítačovú simuláciu, ktorá umožňuje analyzovať časové a prevádzkové vzťahy vo výrobnom systéme bez zásahu do reálnej prevádzky. Alrabghi a Tiwari [4] poukazujú na rastúce využívanie simulačných a simulačno-optimalizačných prístupov v oblasti údržby, pričom ich využiteľnosť bola overená aj v priemyselných aplikáciách pri hodnotení rôznych stratégií údržby [5]. Joshi et al. [6] použili simuláciu na porovnanie spôsobov plánovania preventívnej údržby z hľadiska prestojov a prevádzkových dôsledkov, zatiaľ čo Darmawan a Sheu [7] sa zamerali na určenie vhodného začiatku údržby v dostupnom časovom okne s cieľom obmedziť výrobné straty. Novšie prístupy využívajú aj voľné časové intervaly vo výrobnom harmonograme [8] a možnosť zahrnutia preventívnej údržby priamo do diskrétneho simulačného modelu bola preukázaná aj v prostredí FlexSim [9]. Na základe uvedených poznatkov možno simuláciu považovať za vhodný podporný nástroj nielen na analýzu výrobného procesu, ale aj na časové plánovanie preventívnej údržby.

Cieľom článku je posúdiť možnosti využitia simulácie ako podporného nástroja pri plánovaní preventívnej údržby robotizovaného pracoviska na povrchovú úpravu. Na základe analýzy pracovného cyklu v prostredí FlexSim je vybraný interval nečinnosti manipulačnej techniky a prostredníctvom simulačného scenára je overené, či je možné do tohto intervalu zaradiť krátkodobý údržbový zásah bez ovplyvnenia základného priebehu výrobného procesu.

1. Materiál a metódy

Na účely simulačného overenia bol vytvorený 3D model robotizovaného pracoviska na povrchovú úpravu v prostredí FlexSim (Obr. 1). Model zahŕňa vstupné a výstupné pracovisko, osem technologických nádrží a robotický manipulátor s lineárnym pojazdom umožňujúcim presun medzi jednotlivými technologickými pracoviskami. Simulačný model reprezentuje základnú sekvenciu manipulačného cyklu, ktorá pozostáva z uchopenia dávky, jej presunu medzi jednotlivými technologickými pracoviskami, vloženia do nádrže, technologickej expozície a následného transportu na ďalšie pracovisko.

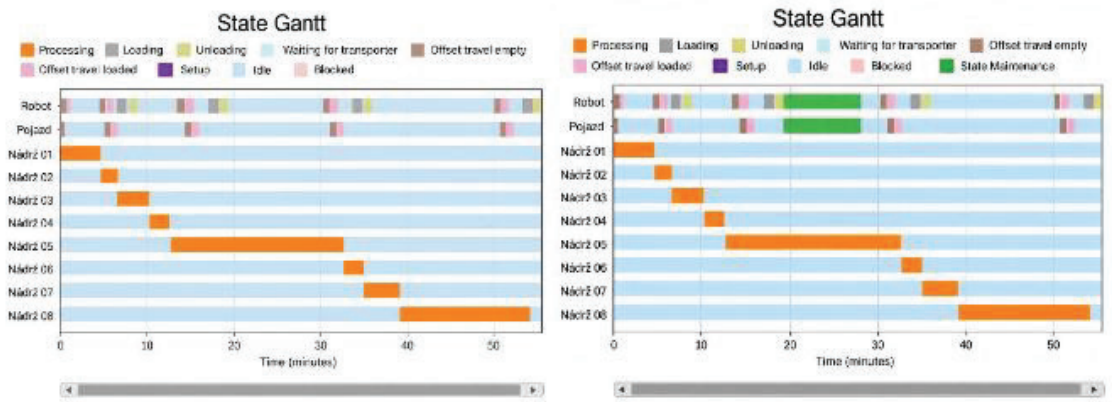


Obr. 1 Digitálny model pracoviska v softvérovom prostredí FlexSim

Simulácia bola využitá na posúdenie možností plánovania preventívnej údržby v rámci prevádzkového cyklu pracoviska a na identifikáciu vhodných časových intervalov na realizáciu údržbových zásahov. Po vykonaní simulácie bol definovaný plánovaný údržbový zásah s určeným časom trvania, počas ktorého boli robotický manipulátor a lineárny pojazd považované za nedostupné pre výrobný proces. Simulačný experiment bol vyhodnocovaný počas 8-hodinového prevádzkového intervalu (480 min), počas ktorého boli sledované jednotlivé prevádzkové stavy zariadení a časový priebeh pracovných cyklov. Pre druhú simuláciu bol definovaný krátkodobý interval pre preventívnu údržbu v trvaní 10 minút, počas ktorého boli robotický manipulátor a lineárny pojazd nedostupné pre výrobný proces. V oboch simuláciách zostali technologické časy a sekvencia výrobných operácií nezmenené, pričom rozdiel predstavovalo iba zaradenie plánovaného údržbového stavu.

2. Výsledky a diskusia

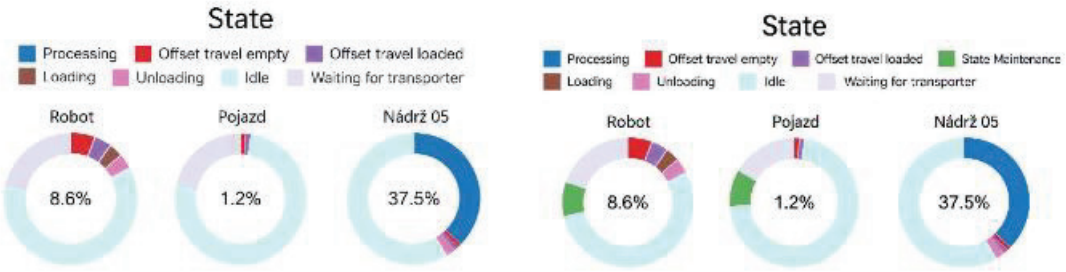
Pomocou simulačného modelu bol analyzovaný časový priebeh pracovného cyklu robotizovaného pracoviska s cieľom identifikovať časové intervaly potenciálne vhodné na realizáciu plánovanej preventívnej údržby. Pozornosť bola zameraná najmä na úseky, počas ktorých robotický manipulátor a lineárny pojazd nevykonávajú aktívnu manipulačnú činnosť. Z pohľadu koncepcie výrobného procesu tak tieto intervaly predstavujú priestor na dočasné odstavenie zariadenia bez priameho narušenia technologickej sekvencie. Samotná možnosť realizácie údržby v takto identifikovanom intervale však musí byť v reálnej prevádzke posúdená aj z hľadiska bezpečnosti práce, technologických podmienok a možnosti bezpečného odstavenia a energetickej izolácie zariadenia.



Obr. 2 Ganttov diagram pred údržbou (vľavo) a počas údržby (vpravo)

Na Obr. 2 je znázornený stavový Ganttov diagram referenčného pracovného cyklu bez údržbového zásahu. Z časového priebehu vyplýva, že najdlhší súvislý interval nečinnosti robotického manipulátora a lineárneho pojazdu vzniká počas technologickej operácie v Nádrži 05. Po vložení spracovávanej dávky pokračuje technologický proces samostatne, zatiaľ čo manipulačné zariadenie zostáva dočasne nevyužité. V porovnaní s ostatnými časťami cyklu, v ktorých sa striedajú krátke presuny, nakladanie a vykladanie, predstavuje tento interval z pohľadu výrobného toku najvhodnejšie časové okno na plánované odstavenie manipulátora a lineárneho pojazdu. V simulačnom bol do identifikovaného intervalu nečinnosti zaradený plánovaný údržbový zásah v trvaní 10 minút. Zvolená dĺžka zásahu umožnila jeho úplné vykonanie v rámci existujúceho časového okna a zároveň zachovala časovú rezervu pred opätovným zapojením robotického manipulátora a lineárneho pojazdu do výrobného procesu.

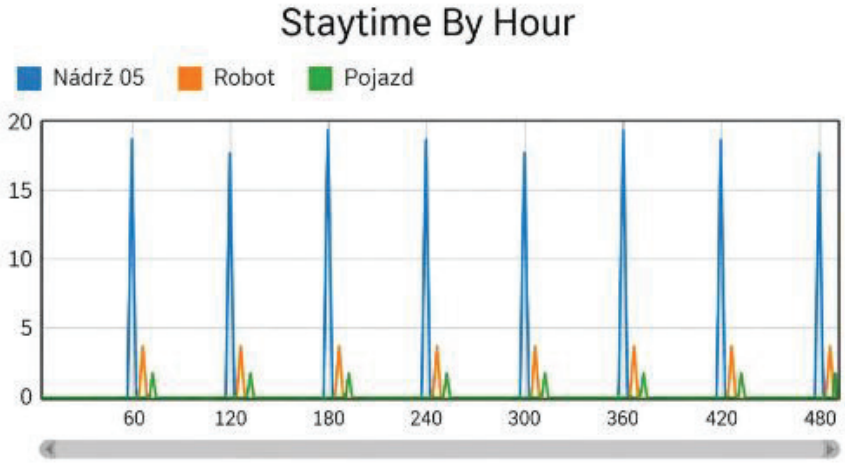
Na základe tejto analýzy bola vytvorená druhá simulácia, znázornená na Obr. 2 (vpravo), v ktorej bol do obdobia nečinnosti robota a pojazdu vložený stav State Maintenance. Tento stav reprezentuje plánovaný preventívny údržbový zásah a bol časovo umiestnený tak, aby bol ukončený ešte pred opätovným využitím manipulátora na vybratie a transport dávky. Zvolený interval zároveň ponecháva časovú rezervu pred ukončením technologickej operácie v Nádrži 05. Simulačný model tak umožňuje identifikovať vhodné časové okná z hľadiska organizácie prevádzky a posúdiť možnosť začlenenia preventívnej údržby do pracovného cyklu bez potreby vytvárania samostatnej výrobnej odstávky. Reálne využitie takto navrhnutého intervalu je následne podmienené splnením bezpečnostných a technologických požiadaviek konkrétneho pracoviska.



Obr. 3 Graf podielov jednotlivých prevádzkových stavov pred údržbou (vľavo) a počas údržby(vpravo)

Na ďalšie posúdenie využiteľnosti identifikovaného časového okna boli vyhodnotené podiely jednotlivých prevádzkových stavov sledovaných objektov. Na Obr. 3 (vľavo) je znázornený referenčný stav bez údržbového zásahu. Robotický manipulátor dosahoval aktívne využitie 8,6 %, zatiaľ čo lineárny pojazd bol aktívny iba počas 1,2 % sledovaného času. Prevažnú časť pracovného cyklu sa preto obe zariadenia nachádzali v stave nečinnosti alebo čakania. Nádrž 05 vykazovala aktívny technologický proces počas 37,5 % sledovaného času, čo potvrdzuje, že počas dlhšej technologickej operácie zostáva manipulačná technika významnú časť cyklu nevyužitá.

Na Obr. 3 (vpravo) je znázornený stav po zaradení plánovaného údržbového intervalu. Časť pôvodného stavu Idle (stav nečinnosti) robotického manipulátora a lineárneho pojazdu bola nahradená stavom State Maintenance (preventívna údržba), pričom podiel ich aktívnych pracovných stavov zostal zachovaný. Rovnako sa nezmenil priebeh technologického procesu v Nádrži 05. Výsledok poukazuje na to, že preventívny údržbový zásah bol v simulácií vložený do už existujúceho obdobia nečinnosti zariadení, a nie do času potrebného na realizáciu manipulačných operácií. Z pohľadu organizácie prevádzky tak možno časť neproduktívneho času využiť na plánovanú údržbu bez potreby meniť základnú sekvenciu pracovného cyklu. Zmena podielu stavu nečinnosti teda nepredstavovala dodatočnú časovú stratu, ale využitie časti už existujúcej nečinnosti zariadenia na plánovanú údržbu.



Obr. 4 Časový priebeh zotrvania objektov počas simulačného cyklu

Na overenie vplyvu navrhovaného údržbového intervalu na časový priebeh procesu bol vyhodnotený aj ukazovateľ Staytime By Hour, ktorý znázorňuje čas zotrvania v sledovaných objektoch počas jednotlivých časových intervalov simulácie (Obr. 4). Z priebehu je možné pozorovať pravidelne sa opakujúci charakter pracovných cyklov, pričom najvyššie hodnoty dosahuje Nádrž 05 v dôsledku dlhšieho technologického času. Výrazne nižšie hodnoty robotického manipulátora a lineárneho pojazdu zodpovedajú krátkym manipulačným a transportným operáciám medzi jednotlivými technologickými pracoviskami. Zaradenie plánovanej preventívnej údržby do identifikovaného obdobia nečinnosti neovplyvnilo priebeh sledovaného ukazovateľa. Dôvodom je, že údržbový zásah bol realizovaný v čase, keď robotický manipulátor a lineárny pojazd neboli potrebné na vykonanie ďalšej výrobnej operácie. Technologické časy jednotlivých procesov preto zostali zachované a nebolo vyvolané dodatočné čakanie ani posunutie nasledujúcich manipulačných operácií. Tento

výsledok podporuje vhodnosť zvoleného časového okna z pohľadu organizácie výrobného procesu.

Získané výsledky poukazujú na možnosť využitia simulačného modelu nielen na analýzu výrobného procesu, ale aj ako podporného nástroja pri časovom plánovaní preventívnej údržby. Podobný princíp uvádzajú Assad Neto et al. [10], ktorí pri plánovaní preventívnych údržbových zásahov využívajú obdobia dočasnej nečinnosti výrobných zariadení s cieľom minimalizovať negatívny vplyv údržby na výrobný výkon. Výsledky získané zo simulačného modelu korešpondujú s princípom využívania prevádzkových časových okien na realizáciu údržbových zásahov. Colledani et al. [11] poukazujú na možnosť využitia vznikajúcich príležitostí vo výrobnom procese na vykonávanie preventívnej údržby s cieľom obmedziť jej negatívny vplyv na výrobný výkon. Možnosti využitia diskrétnej simulácie pri plánovaní údržby potvrdzujú aj Geurtsen et al. [12], ktorí prostredníctvom simulačného modelu analyzovali plánovanie údržbových činností vo výrobných systémoch. Tieto poznatky podporujú využitie simulácie ako nástroja na overovanie vhodnosti časového zaradenia údržbových zásahov vzhľadom na priebeh výrobného procesu. Takýto prístup je zároveň v súlade so všeobecnými princípmi systematického riadenia fyzických aktív podľa série ISO 55000 [13], ktorá zdôrazňuje riadenie aktív počas ich životného cyklu, plánovanie a podporu rozhodovania na základe informácií o ich prevádzke. V analyzovanom prípade simulácia nenahrádza technické posúdenie samotného údržbového zásahu, ale poskytuje podklad na určenie vhodného časového okna, v ktorom môže byť plánovaný zásah realizovaný s minimálnym ovplyvnením výrobného procesu.

Záver

V rámci článku boli posúdené možnosti využitia počítačovej simulácie ako podporného nástroja pri plánovaní preventívnej údržby robotizovaného pracoviska na povrchovú úpravu. Simulačný model vytvorený v prostredí FlexSim umožnil analyzovať časový priebeh pracovného cyklu a identifikovať obdobia nečinnosti robotického manipulátora a lineárneho pojazdu, ktoré môžu predstavovať vhodný priestor na zaradenie krátkodobého údržbového zásahu. Vytvorený simulačný scenár ukázal, že časť existujúceho obdobia nečinnosti možno využiť na plánovanú údržbu bez potreby vytvárania samostatnej výrobnej odstávky a bez narušenia základnej sekvencie technologických a manipulačných operácií. Simulácia tak môže slúžiť na overovanie rôznych možností časového zaradenia údržbových činností ešte pred ich realizáciou v reálnej prevádzke. Získané výsledky zároveň poukazujú na potrebu zohľadniť pri praktickom využití navrhnutého intervalu aj bezpečnostné, technologické a prevádzkové podmienky konkrétneho pracoviska.

Poďakovanie

Táto práca bola podporená Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci grantu VEGA 1/0258/24 a Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky v rámci grantu KEGA 039TUKE-4/2026.

Použitá literatúra:

[1] BASRI, Ernnie Illyani, et al. Preventive maintenance (PM) planning: a review. *Journal of quality in maintenance engineering*, 2017, 23.2: 114-143.

[2] TRISKA, Yuri, et al. Integrated production and maintenance planning method with simulation-based optimization. *IFAC-PapersOnLine*, 2021, 54.1: 349-354.

[3] NETO, Anis Assad, et al. Digital twin-driven decision support system for opportunistic preventive maintenance scheduling in manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 2021, 55: 439-446.

[4] ALRABGHI, A.; TIWARI, A. State of the art in simulation-based optimisation for maintenance systems. Computers & Industrial Engineering. 2015, vol. 82, pp. 167–182. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.12.022.

[5] ALRABGHI, Abdullah; TIWARI, Ashutosh; SAVILL, Mark. Simulation-based optimisation of maintenance systems: Industrial case studies. *Journal of Manufacturing Systems*, 2017, 44: 191-206.

[6] JOSHI, Ragini Waman, et al. Simulation and analysis of preventive maintenance scheduling techniques for fruit-roll packaging line. Procedia Manufacturing, 2019, 39: 1762-1772.

[7] DARMAWAN, Agus; SHEU, D. Daniel. Preventive maintenance scheduling: a simulation-optimization approach. *Production & Manufacturing Research*, 2021, 9.1: 281-298.

[8] MAIERHOFER, Alexandra; TROJAHN, Sebastian; RYLL, Frank. Dynamic scheduling and preventive maintenance in small-batch production: A flexible control approach for maximising machine reliability and minimising delays. *Applied Sciences*, 2025, 15.8: 4287.

[9] ZHONG, Liuyan; CHEN, Yarong; MUMTAZ, Jabir. A flexible job shop scheduling method based on multi-fidelity optimization. *Engineering Proceedings*, 2023, 45.1: 47.

[10] NETO, Anis Assad, et al. Digital twin-driven decision support system for opportunistic preventive maintenance scheduling in manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 2021, 55: 439-446.

[11] COLLEDANI, Marcello; MAGNANINI, Maria Chiara; TOLIO, Tullio. Impact of opportunistic maintenance on manufacturing system performance. *CIRP Annals*, 2018, 67.1: 499-502.

[12] GEURTSEN, M.; ADAN, I.; ATAN, Zümbül. Planning of multi-production line maintenance. Journal of Manufacturing Systems, 2024, 75: 174-193.

[13] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 55000:2024 Asset management — Vocabulary, overview and principles. 2nd ed. Geneva: ISO, 2024. https://www.iso.org/standard/83053.html.

Autor(i):

doc. Ing. Ján Duplák, PhD.
docent
Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove
Bayerova 1
080 01 Prešov
Tel.: E-mail: jan.duplak@tuke.sk

Ing. Maryna Yeromina, PhD.,

odborný asistent
Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove
Bayerova 1
080 01 Prešov
Tel.: E-mail: maryna.yeromina@tuke.sk

doc. Ing. Darina Dupláková, PhD.
docent
Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove
Bayerova 1
080 01 Prešov
Tel.: E-mail: darina.duplakova@tuke.sk

Ing. Samuel Mikuláško, PhD.
odborný asistent
Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove
Bayerova 1
080 01 Prešov
Tel.: E-mail: samuel.mikulasko@tuke.sk

VPLYV EURÓPSKEJ LETECKEJ LEGISLATÍVY NA SKVALITŇOVANIE CERTIFIKÁCIE, DIAGNOSTIKY A ÚDRŽBY LETECKEJ TECHNIKY

The Impact of European Aviation Legislation on Improving the Quality of Certification, Diagnostics, and Maintenance of Aviation Equipment

Marián Hocko, Branislav Racek

Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta, Katedra leteckého inžinierstva

Anotácia

Príspevok sa zaoberá vplyvom európskej leteckej legislatívy na zvyšovanie úrovne bezpečnosti, spoľahlivosti a kvality procesov certifikácie, diagnostiky a údržby leteckej techniky. V úvodnej časti je zdôraznený význam legislatívneho rámca ako základného nástroja na zabezpečenie letovej spôsobilosti lietadiel počas celého ich životného cyklu. Následne je analyzovaný historický vývoj leteckých predpisov vo svete, od vzniku medzinárodných pravidiel civilného letectva pod záštitou ICAO až po formovanie moderných regulačných systémov založených na princípoch riadenia bezpečnosti a štandardizácie technických požiadaviek.

Ďalšia časť príspevku sa venuje vývoju leteckých predpisov v Európe a ich postupnej harmonizácii. Pozornosť je sústredená najmä na vznik spoločného európskeho regulačného priestoru a na úlohu Európskej agentúry pre bezpečnosť letectva (EASA), ktorá zabezpečuje jednotný prístup k certifikácii výrobkov, organizácií a personálu v členských štátoch Európskej únie. Príspevok poukazuje na význam unifikácie technických požiadaviek a prevádzkových štandardov pre zvýšenie úrovne bezpečnosti civilného letectva.

Kľúčová časť článku je zameraná na analýzu najdôležitejších európskych predpisov upravujúcich certifikáciu, diagnostiku a údržbu leteckej techniky. Osobitná pozornosť je venovaná predpisu Part 21 (Časť 21), ktorý stanovuje požiadavky na certifikáciu lietadiel, leteckých výrobkov, dielov a zariadení, ako aj schvaľovanie konštrukčných a výrobných organizácií. Významným prvkom systému zachovania letovej spôsobilosti je predpis Part M (Časť M), definujúci pravidlá kontinuálnej letovej spôsobilosti, plánovania údržby a riadenia technického stavu lietadiel počas prevádzky. V oblasti vykonávania údržby zohráva zásadnú úlohu predpis Part 145 (Časť 145), ktorý stanovuje požiadavky na schvaľovanie organizácií údržby, systém riadenia kvality, kvalifikáciu personálu a kontrolu vykonávaných činností v certifikovanej organizácii údržby lietadiel, leteckých výrobkov, dielov a zariadení. Príspevok zároveň analyzuje význam predpisu Part 66 (Časť 66), upravujúceho kvalifikačné požiadavky a licencovanie certifikačného personálu údržby lietadiel, a predpisu Part 147 (Časť 147), ktorý určuje podmienky schvaľovania organizácií zabezpečujúcich odborné vzdelávanie a skúšky technického personálu.

Základné zásady stanovené nariadením (ES) č. 1592/2002 boli následne spresnené vykonávacími nariadeniami Európskej komisie č. 1702/2003 a č. 2042/2003, ktorých prílohy obsahovali jednotlivé nariadenia častí. Tieto nariadenia zaviedli komplexný systém požiadaviek pokrývajúci všetky fázy životného cyklu lietadla, od návrhu a výroby cez prevádzku, údržbu až po vyradenie z prevádzky. Konkrétne sa súčasťou tejto legislatívy stali nariadenia časti 21, časti M, časti 145, časti 66 a časti 147, ktoré dodnes tvoria základný rámec európskeho systému riadenia letovej spôsobilosti.

Článok poukazuje na vzájomnú previazanosť uvedených predpisov, ktoré vytvárajú komplexný systém zabezpečenia letovej spôsobilosti lietadiel. Súčasne zdôrazňuje, že moderné diagnostické metódy, pokročilé technológie nedeštruktívneho skúšania, digitalizácia údržby a

rastúce požiadavky na odbornú spôsobilosť personálu sú priamo ovplyvňované legislatívnymi požiadavkami Európskej únie a EASA, ktoré sú formulované v uvedených predpisoch. V závere sa konštatuje, že harmonizovaný európsky regulačný rámec významne prispieva k zvyšovaniu bezpečnosti leteckej prevádzky, efektívnosti údržby a spoľahlivosti leteckej techniky, pričom predstavuje základný predpoklad ďalšieho rozvoja moderného civilného letectva.

Kľúčové slová: letecká legislatíva, EASA, certifikácia leteckej techniky, Part-21, Part-M, Part-145, Part-66, Part-147, diagnostika leteckej techniky, údržba lietadiel, letová spôsobilosť, bezpečnosť letectva.

Abstract

This paper examines the impact of European aviation legislation on improving the safety, reliability, and quality of certification, diagnostic, and maintenance processes for aircraft. The introductory section highlights the importance of the legislative framework as a fundamental tool for ensuring the airworthiness of aircraft throughout their entire life cycle. It then analyses the historical development of aviation regulations worldwide, from the establishment of international civil aviation rules under the auspices of ICAO to the formation of modern regulatory systems based on the principles of safety management and the standardization of technical requirements.

The next section of this article focuses on the development of aviation regulations in Europe and their gradual harmonization. The focus is primarily on the creation of a Single European Aviation Area and on the role of the European Aviation Safety Agency (EASA), which ensures a uniform approach to the certification of products, organizations, and personnel in the member states of the European Union. The paper highlights the importance of unifying technical requirements and operational standards to enhance the level of civil aviation safety.

The basic principles defined by Regulation (EC) No. 1592/2002 were subsequently elaborated through European Commission Implementing Regulations No. 1702/2003 and No. 2042/2003, whose annexes contained the individual Part regulations. These regulations established a comprehensive system of requirements covering all stages of an aircraft's life cycle, from design and manufacture through operation, maintenance, and decommissioning. In particular, the regulations Part 21, Part M, Part 145, Part 66, and Part 147 became part of this legislation and continue to form the fundamental framework of the European airworthiness management system to this day.

The article highlights the interdependence of these regulations, which together form a comprehensive system for ensuring the airworthiness of aircraft. At the same time, it emphasizes that modern diagnostic methods, advanced non-destructive testing technologies, the digitization of maintenance, and growing requirements for personnel competence are directly influenced by the legislative requirements of the European Union and EASA, which are set forth in the regulations. In conclusion, it is noted that the harmonized European regulatory framework significantly contributes to enhancing aviation safety, maintenance efficiency, and the reliability of aircraft, while serving as a fundamental prerequisite for the further development of modern civil aviation.

Keywords: *aviation legislation, EASA, aircraft certification, Part-21, Part-M, Part-145, Part-66, Part-147, aircraft diagnostics, aircraft maintenance, airworthiness, aviation safety*

Úvod

Bezpečnosť civilného letectva patrí k najvýznamnejším prioritám moderného leteckého priemyslu a leteckej prevádzky. Zásadným impulzom pre komplexné prehodnotenie bezpečnostných opatrení v oblasti leteckej dopravy, letovej prevádzky a ochrany leteckej techniky sa stali teroristické útoky z 11. septembra 2001 na Svetové obchodné centrum v New

Yorku a budovu Pentagónu v Spojených štátoch amerických. Tieto udalosti predstavovali historický medzník, ktorý odhalil nové bezpečnostné hrozby a poukázal na potrebu vytvorenia jednotného a efektívneho systému riadenia bezpečnosti civilného letectva na medzinárodnej úrovni. Následkom týchto udalostí došlo k prijatiu rozsiahlych legislatívnych, organizačných a technických opatrení zameraných na minimalizáciu rizík ohrozujúcich bezpečnosť leteckej prevádzky a na zvýšenie spoľahlivosti leteckej techniky počas celého jej životného cyklu.

V podmienkach Európskej únie sa požiadavka na harmonizáciu pravidiel bezpečnosti civilného letectva premietla do prijatia Nariadenia Európskeho parlamentu a Rady (ES) č. 1592/2002. [1] Uvedené nariadenie vytvorilo základný legislatívny rámec pre jednotný systém regulácie bezpečnosti civilného letectva v Európe a zároveň ustanovilo Európsku agentúru pre bezpečnosť letectva (European Aviation Safety Agency – EASA). Vznik agentúry EASA znamenal zásadný krok smerom k centralizovanému dohľadu nad plnením bezpečnostných požiadaviek v oblasti projektovania, výroby, prevádzky a údržby lietadiel. Hlavným cieľom bolo zabezpečiť jednotnú úroveň bezpečnosti vo všetkých členských štátoch Európskej únie, odstrániť rozdiely medzi národnými systémami a vytvoriť spoločné pravidlá pre certifikáciu leteckej techniky a odbornú spôsobilosť leteckého personálu.

Základné princípy definované nariadením (ES) č. 1592/2002 boli následne rozpracované prostredníctvom vykonávacích nariadení Európskej komisie č. 1702/2003 [2] a č. 2042/2003 [3], ktorých prílohami boli jednotlivé predpisy Part (Časť). Tieto predpisy vytvorili ucelený systém požiadaviek pokrývajúci všetky etapy životného cyklu lietadla, od návrhu a výroby až po jeho prevádzku, údržbu a vyradenie z prevádzky. Súčasťou uvedenej legislatívy sa stali predovšetkým predpisy Part 21, Part M, Part 145, Part 66 a Part 147, ktoré dodnes predstavujú základný rámec európskeho systému zachovania letovej spôsobilosti.

Predpis Part 21, ktorý bol vydaný ako príloha nariadenia EK 1702/2003, upravuje proces certifikácie lietadiel, motorov, vrtúľ a ich súčastí, ako aj požiadavky na organizácie zodpovedné za projektovanie a výrobu leteckej techniky. Predpis Part M stanovuje pravidlá zachovania kontinuálnej letovej spôsobilosti lietadiel počas ich prevádzky vrátane riadenia programov údržby a monitorovania technického stavu lietadiel. Predpis Part 145 definuje požiadavky na organizácie vykonávajúce údržbu leteckej techniky, Part 66 stanovuje kvalifikačné požiadavky na certifikačný personál údržby a Part 147 upravuje systém schvaľovania organizácií poskytujúcich odborný výcvik a skúšky údržbového personálu. Uvedené predpisy boli vydané ako prílohy nariadenia EK 2042/2023.

Prijatá európska legislatíva významným spôsobom ovplyvnila procesy certifikácie, diagnostiky a údržby leteckej techniky. Zavedenie jednotných technických štandardov, systémov riadenia kvality, požiadaviek na odbornú spôsobilosť personálu a moderných diagnostických metód prispelo k zvýšeniu spoľahlivosti leteckých systémov a k zníženiu pravdepodobnosti technických porúch ohrozujúcich bezpečnosť letovej prevádzky. Súčasne vytvorila legislatívne predpoklady na zavádzanie nových technológií monitorovania technického stavu lietadiel, preventívnej a prediktívnej údržby, ako aj na rozvoj bezpečnostnej kultúry v organizáciách zapojených do prevádzky a údržby leteckej techniky.

Cieľom článku je analyzovať vplyv európskej leteckej legislatívy na zvyšovanie kvality procesov certifikácie, diagnostiky a údržby leteckej techniky, poukázať na význam jednotlivých regulačných nástrojov EASA pri zabezpečovaní letovej spôsobilosti a zhodnotiť ich prínos k zvyšovaniu úrovne bezpečnosti civilného letectva v Európskej únii.

1. História vývoja leteckej legislatívy vo svete

Vývoj leteckej legislatívy úzko súvisí s rozvojom letectva od prvých letov na začiatku 20. storočia až po vznik súčasného globálneho systému civilného letectva. Potreba právnej regulácie vznikla v okamihu, keď lietadlá začali prekračovať štátne hranice, čím vznikali nové bezpečnostné, vojenské a obchodné problematické situácie.

Po úspešných letoch bratov Wrightovcov v roku 1903 a prudkom rozvoji leteckej techniky sa objavila potreba riešiť otázku právneho postavenia vzdušného priestoru. Právne normy platné do tej doby sa vzťahovali iba na pozemné a námorné územie štátov. Jedným z prvých významných medzinárodných pokusov riešiť tieto otázky, bola Medzinárodná konferencia o leteckej navigácii v Paríži v roku 1910. Zástupcovia 19 európskych štátov diskutovali najmä o otázke, či má štát právo kontrolovať vzdušný priestor nad svojím územím alebo či má byť vzduch voľne prístupný podobne ako otvorené more. Hoci konferencia neprijala záväzný medzinárodný dohovor, vytvorila základy budúceho leteckého práva, vrátane pravidiel registrácie lietadiel, licencovania posádok, letovej spôsobilosti a zásady štátnej suverenity nad vzdušným priestorom.

Pred rokom 1914 vznikali aj rôzne odborné organizácie a právnické iniciatívy, ktoré sa snažili vytvoriť jednotný „letecký kódex“. Rozvoj letectva však prebiehal rýchlejšie ako tvorba právnych predpisov a vypuknutie prvej svetovej vojny prerušilo väčšinu medzinárodných rokovaní. [4]

Po skončení prvej svetovej vojny bolo zrejmé, že medzinárodné letectvo nebude možné efektívne rozvíjať bez jednotných pravidiel. Na základe toho bola zorganizovaná celosvetová konferencia v Paríži, na ktorej bola 13. októbra 1919 podpísaná Parížska konvencia o úprave leteckej navigácie (Convention Relating to the Regulation of Aerial Navigation). Išlo o prvý komplexný medzinárodný dokument upravujúci civilné letectvo. [5] Najvýznamnejším princípom konvencie bolo uznanie, že: „...každý štát má úplnú a výlučnú suverenitu nad vzdušným priestorom nad svojím územím.“ Tento princíp sa stal základným pilierom moderného leteckého práva a platí dodnes. Parížsky dohovor zároveň zaviedol požiadavky na: registráciu lietadiel, osvedčenia letovej spôsobilosti, licencovanie letových posádok, pravidlá medzinárodnej leteckej prevádzky, označovanie lietadiel štátnou príslušnosťou.

Dohovor vytvoril aj Medzinárodnú komisiu pre leteckú navigáciu (ICAN), ktorá koordinovala technické otázky civilného letectva a predstavovala predchodcu dnešnej Medzinárodnej organizácie civilného letectva (ICAO).

Parížsky dohovor významne ovplyvnil národné legislatívy najmä vo Francúzsku, Spojenom kráľovstve, Nemecku a ďalších európskych krajinách. V USA bol jeho vplyv obmedzený, pretože Spojené štáty konvenciu neratifikovali, avšak mnohé jeho technické a právne princípy boli neskôr prevzaté do amerických predpisov.

Na základe prijatých zásad Parížskeho dohovoru bol v Československu 8.7. 1925 prijatý prvý zákon o letectve č. 172/1925. [6]

Druhá svetová vojna priniesla výrazný technický rozvoj letectva. Koncom vojny vznikla potreba vytvoriť nový, globálny systém riadenia civilného letectva. Na podnet Spojených štátov sa v roku 1944 uskutočnila Medzinárodná konferencia civilného letectva v Chicagu, na ktorej 52 štátov podpísalo Dohovor o medzinárodnom civilnom letectve, známy ako Chicagský dohovor. [7] Chicagský dohovor zachoval princíp úplnej štátnej suverenity nad vzdušným priestorom, ale zároveň vytvoril mechanizmus medzinárodnej spolupráce, ktorý umožnil

dynamický rozvoj globálnej leteckej dopravy. Najvýznamnejším výsledkom dohovoru bolo založenie celosvetovej leteckej organizácie ICAO (International Civil Aviation Organization), ktorá od roku 1947 pôsobí ako špecializovaná organizácia OSN. Hlavnou úlohou ICAO je zabezpečovať čo najvyšší stupeň jednotnosti leteckých predpisov, technických noriem a prevádzkových postupov vo všetkých členských štátoch. ICAO postupne vytvorila systém leteckých predpisov Annex s celosvetovou platnosťou, ktoré tvoria prílohy Chicagského dohovoru. Predpisy Annex obsahujú medzinárodné štandardy a odporúčané postupy (SARPs) pre letová prevádzka, plavebné služby, letová spôsobilosť, licencovanie personálu, vyšetrovanie leteckých nehôd, ochrana civilného letectva a environmentálna ochrana. [8]

V Spojených štátoch sa Chicagský dohovor stal základom moderného systému civilného letectva. Na jeho princípoch vznikli federálne regulačné orgány vrátane súčasnej Federal Aviation Administration (FAA), ktorá vydáva predpisy známe ako Federal Aviation Regulations (FARs). FAA pritom implementuje požiadavky ICAO a súčasne vytvára vlastné podrobné technické pravidlá. [9]

V Európe sa národné systémy predpisov po druhej svetovej vojne opierali o normy ICAO. Na základe predpisov Annex boli v Československu vytvorené národné letecké predpisy L. Podobný vývoj nastal aj v Kanade, Austrálii, Japonsku a ďalších vyspelých krajinách, kde národné úrady civilného letectva prevzali normy ICAO a vytvorili vlastné regulačné systémy kompatibilné s medzinárodným letectvom. [4]

2. História vývoja leteckej legislatívy vo svete

Vývoj európskych leteckých predpisov po druhej svetovej vojne prešiel niekoľkými etapami.

Po prijatí Chicagského dohovoru v roku 1944 začali európske štáty implementovať štandardy ICAO do vlastných právnych systémov. Každá krajina však vydávala vlastné technické a prevádzkové predpisy. Táto situácia spôsobovala viacero problémov:

- rozdielne požiadavky na certifikáciu lietadiel,
- odlišné pravidlá údržby,
- nejednotné licencovanie personálu,
- komplikovaný export lietadiel medzi štátmi,
- vysoké náklady na viacnásobné certifikácie.

V 60. a 70. rokoch sa navyše začal rozvíjať európsky letecký priemysel reprezentovaný výrobcami ako Airbus, Aérospatiale, British Aerospace a Dornier. Výrobcovia potrebovali jednotný certifikačný systém, ktorý by umožňoval uznávanie osvedčení vo viacerých štátoch.



Obr. 1 Logo organizácie Joint Airworthiness Authorities

Z týchto dôvodov vznikli v roku 1970 spoločné certifikačné aktivity v rámci organizácie Joint Airworthiness Authorities, ktoré sa neskôr transformovali na Joint Aviation Authorities (JAA). Hlavným cieľom JAA bolo:

- harmonizovať národné predpisy európskych štátov,
- zabezpečiť spoločný proces certifikácie lietadiel,
- podporiť rozvoj spoločného európskeho trhu leteckej techniky,
- znížiť administratívne náklady výrobcov,
- zvýšiť úroveň bezpečnosti civilného letectva.

JAA nebola nadnárodným regulačným úradom. Išlo o dobrovoľné združenie národných leteckých úradov európskych krajín. Samotné predpisy neboli právne záväzné a ich implementácia závisela od jednotlivých štátov. [10]

Najvýznamnejším výsledkom činnosti JAA bolo vytvorenie súboru predpisov označených ako JAR (Joint Aviation Requirements). [11]

Priamym podnetom pre vytvorenie systému jednotných leteckých predpisov JAR boli problémy pri britsko-francúzskom projekte Concord.

Predpisy JAR vytvorili prvý rozsiahly harmonizovaný európsky systém regulačných požiadaviek. Medzi najvýznamnejšie predpisy JAR patrili:

JAR-21 - Certifikačné postupy pre lietadlá, motory, vrtule, letecké výrobky a súčiastky.
JAR-23 - Požiadavky letovej spôsobilosti pre lietadlá normálnej kategórie.
JAR-25 - Požiadavky letovej spôsobilosti pre dopravné lietadlá.
JAR-27 a JAR-29 - Požiadavky pre vrtuľníky normálnej a transportnej kategórie.
JAR-66 - Licencovanie personálu údržby lietadiel.
JAR-145 - Požiadavky na organizácie vykonávajúce údržbu lietadiel.
JAR-OPS 1 - Prevádzkové požiadavky pre obchodnú leteckú dopravu.

Systém predpisov JAR sa v priebehu 90. rokov stal štandardom európskeho civilného letectva a bol zavedený vo väčšine európskych krajín.

Napriek úspechu mala organizácia JAA a systém predpisov JAR viaceré nedostatky.

- JAA nebola orgánom Európskej únie,
- predpisy JAR neboli priamo záväzné,
- implementácia sa líšila medzi krajinami,
- chýbal centrálny certifikačný orgán,
- rastúci európsky letecký priemysel potreboval jednotnú legislatívu.

Na konci 90. rokov sa preto začalo uvažovať o vytvorení nadnárodnej regulačnej agentúry s právomocou vydávať záväzné pravidlá pre všetky členské štáty Európskej únie.

1. Vznik Európskej agentúry pre bezpečnosť letectva

Prijatím nariadenia Európskeho parlamentu a Rady č. 1592/2002, bola založená agentúra EASA (European Union Aviation Safety Agency). Po prijatí nového základného nariadenia (EÚ) 2018/1139 bol názov zmenený na Agentúra Európskej únie pre bezpečnosť letectva (European Union Aviation Safety Agency, Obr. 2), aby sa zdôraznilo jej postavenie ako agentúry Európskej únie. [12]



Obr. 2 Logo European Union Safety Agency

EASA začala činnosť v roku 2003 a postupne preberala kompetencie JAA. Jej hlavnými úlohami sa stali:

- certifikácia leteckej techniky,
- tvorba jednotných európskych predpisov,
- dohľad nad bezpečnosťou civilného letectva,
- koordinácia národných leteckých úradov,
- implementácia požiadaviek ICAO v rámci Európy.

Na rozdiel od JAA majú predpisy EASA právnu záväznosť vo všetkých členských štátoch EÚ a majú vyššiu hodnotu ako národné letecké predpisy.

3. Transformácia predpisov JAR na predpisy Part

Po vzniku EASA začal niekoľkoročný proces prevodu predpisov JAR do nového systému (Implementation Rules) označovaného ako Part. Cieľom prevodu leteckých predpisov bolo:

- zachovať technický obsah JAR,
- premeniť ho na právne záväzné európske letecké predpisy,
- vytvoriť jednotnú štruktúru legislatívy.

Transformácia prebehla nasledovne:

Part-21 (JAR-21) – rieši certifikáciu výrobkov, typové certifikáty, doplnkové typové certifikáty, schvaľovanie projektových organizácií (DOA), schvaľovanie výrobných organizácií (POA).

Part-M (JAR-M) - zaviedol pravidlá zachovania letovej spôsobilosti lietadiel. Neskôr sa rozdelil na Part-M, Part-CAMO (Continuing Airworthiness Management Organisation) - riadenie zachovania letovej spôsobilosti, Part-CAO (Combined Airworthiness Organisation) - požiadavky na organizácie vykonávajúce riadenie zachovania letovej spôsobilosti, Part-ML (Maintenance for Light Aircraft) - zachovanie letovej spôsobilosti ľahkých lietadiel.

Part-145 (JAR-145) - upravuje požiadavky na organizácie vykonávajúce údržbu lietadiel.

Part-66 (JAR-66) - upravuje licencovanie certifikujúceho personálu údržby.

Part-147 (JAR-147) - stanovuje požiadavky na organizácie vykonávajúce výcvik personálu údržby.

Part-FCL (JAR-FCL) - obsahuje pravidlá licencovania pilotov.

Air OPS (Part-OPS) - pôvodné jednotné prevádzkové požiadavky boli rozdelené do viacerých častí, najmä Part-ARO (Authority Requirements for Air Operations), Part-ORO (Organisation Requirements for Air Operations), Part-CAT (Commercial Air Transport), Part-SPA (Specific Approvals), Part-NCC (Non-Commercial Operations with Complex Motor-Powered Aircraft), Part-NCO (Non-Commercial Operations with Other-Than Complex Motor-Powered Aircraft) a Part-SPO (Specialised Operations), čím vznikol súčasný európsky systém regulácie letovej prevádzky pod dohľadom EASA.

Záver

Európska letecká legislatíva prešla za posledné desaťročia významným vývojom od roztrieštených národných požiadaviek cez harmonizované predpisy JAR až po súčasný integrovaný regulačný systém vytvorený pod záštitou European Union Aviation Safety Agency (EASA). Tento vývoj zásadným spôsobom prispel k zvyšovaniu úrovne bezpečnosti civilného letectva, k zjednocovaniu technických a prevádzkových požiadaviek a k vytvoreniu jednotného prostredia pre certifikáciu, diagnostiku a údržbu leteckej techniky.

Osobitný význam má sústava predpisov EASA Part, ktorá pokrýva celý životný cyklus lietadla od návrhu, výroby a certifikácie cez prevádzku, zachovanie letovej spôsobilosti a údržbu až po kvalifikáciu a oprávnenia leteckého personálu. Predpisy Part-21, Part-M, Part-ML, Part-CAMO, Part-CAO, Part-145, Part-66, Part-147, ako aj ďalšie prevádzkové predpisy vytvárajú navzájom prepojený systém pravidiel zabezpečujúci vysokú mieru štandardizácie procesov v celej Európe.

Z pohľadu certifikácie leteckej techniky legislatíva EASA umožnila zavedenie jednotných postupov pre schvaľovanie lietadiel, leteckých motorov, vrtúľ a zariadení, čím sa výrazne zvýšila dôveryhodnosť a medzinárodná uznateľnosť európskych certifikačných procesov. V oblasti diagnostiky a údržby prispela k rozvoju systematických metód monitorovania technického stavu lietadiel, k zavádzaniu moderných diagnostických technológií a k presnému definovaniu kompetencií osôb a organizácií zodpovedných za zachovanie letovej spôsobilosti.

Možno konštatovať, že systém predpisov EASA Part dnes predstavuje najkomplexnejší a najprepracovanejší regionálny regulačný rámec civilného letectva na svete. Jeho hlavným prínosom nie je len vysoká úroveň bezpečnosti leteckej dopravy, ale aj vytvorenie jednotného európskeho trhu leteckých služieb, podpora technologického rozvoja a zabezpečenie jednotných štandardov kvality pri certifikácii, diagnostike a údržbe leteckej techniky. V podmienkach neustáleho technologického pokroku, digitalizácie a rastúcich požiadaviek na bezpečnosť bude význam tejto legislatívy naďalej narastať a zostane jedným z kľúčových nástrojov zabezpečovania bezpečnej a efektívnej prevádzky civilného letectva v Európe aj vo svete.

Poďakovanie

Tento príspevkov vznikol s podporou projektu „Riadenie POPs rizík v kontexte prechodu na udržateľnú bioekonomiku“ (akronym: POPs_RISKMAN base), č. 09I04-03-V02-00050, financovaného z Plánu obnovy a odolnosti SR, komponent 9 – Efektívnejšie riadenie a podpora financovania, vývoja a inovácií.

Použitá literatúra:

[1] Nariadenie (ES) č. 1592/2002 Európskeho parlamentu a Rady z 15. júla 2002 o spoločných pravidlách v oblasti civilného letectva a zriadení Európskej agentúry pre bezpečnosť letectva

[2] Nariadenie Komisie (ES) č. 1702/2003 z 24. septembra 2003, ktoré stanovuje vykonávacie pravidlá pre certifikáciu letovej spôsobilosti a environmentálneho hľadiska lietadiel a súvisiacich produktov, dielov a spotrebičov, ako aj pre certifikáciu dizajnérskych a výrobných organizácií

[3] Nariadenie Komisie (ES) č. 2042/2003 z 20. novembra 2003 o zachovaní letovej spôsobilosti lietadiel a leteckých výrobkov, častí a zariadení a o schvaľovaní organizácií a personálu zapojených do týchto činností

[4] Hocko, M.: Letecká legislatíva pre personál údržby. Elfa s. r. o. Technická univerzita v Košiciach 2007. ISBN 978-80-8086-065-3.

[5] https://scholar.smu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3588&context=jalc

[6] https://www.aspi.sk/products/lawText/1/3972/1/2/zakon-c-172-1925-sb-o-letectvi/zakon-c-172-1925-sb-o-letectvi

[7] https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Convention_on_International_Civil_Aviation#/media/File:Convention_on_International_Civil_Aviation_-_1944.djvu

[8] https://www.ebsco.com/research-starters/diplomacy-and-international-relations/international-civil-aviation-organization

[9] https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/federal-aviation-regulation

[10] https://skybrary.aero/articles/jaa

[11] https://jaato.com/joint-aviation-requirements-jars/

[12] Nariadenie Európskeho parlamentu a Rady (EÚ) 2018/1139 zo 4. júla 2018 o spoločných pravidlách v oblasti civilného letectva, ktorým sa zriaďuje Agentúra Európskej únie pre bezpečnosť letectva a ktorým sa menia nariadenia Európskeho parlamentu a Rady (ES) č. 2111/2005, (ES) č. 1008/2008, (EÚ) č. 996/2010, (EÚ) č. 376/2014 a smernice Európskeho parlamentu a Rady 2014/30/EÚ a 2014/53/EÚ a zrušujú nariadenia Európskeho parlamentu a Rady (ES) č. 552/2004 a (ES) č. 216/2008 a nariadenie Rady (EHS) č. 3922/91.

Autor(i):

Ing. Marián Hocko, PhD.
odborný asistent
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Letecká fakulta, Rampová 7, 042 21 Košice, Slovenská republika
Tel: 00421 903 684 174 E-mail: marian.hocko@tuke.sk

Ing. Branislav Racek, PhD.
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Letecká fakulta, Rampová 7, 042 21 Košice, Slovenská republika
Tel: E-mail: branislav.racek@tuke.sk

ZVÝŠENÉ HODNOTY VIBRÁCIÍ A NEŠTANDARDNÉ ČASOVÉ ZÁZNAMY NA POZÍCII GA208A

Increased values of vibration and atypical time waveforms on the position GA208A

Jozef Klinovský

SLOVNAFT MONTÁŽE A OPRAVY a.s.

Anotácia

Prípad ukazuje priebeh diagnostiky čerpadla po výmene elektromotora. Zdôraznená je dôležitosť nielen analýzy frekvenčných spektier, ale aj analýzy časových záznamov, keďže tie mali najväčší význam pri diagnostike zariadenia.

Kľúčové slová: vibrodiagnostika, spektrum, časový záznam

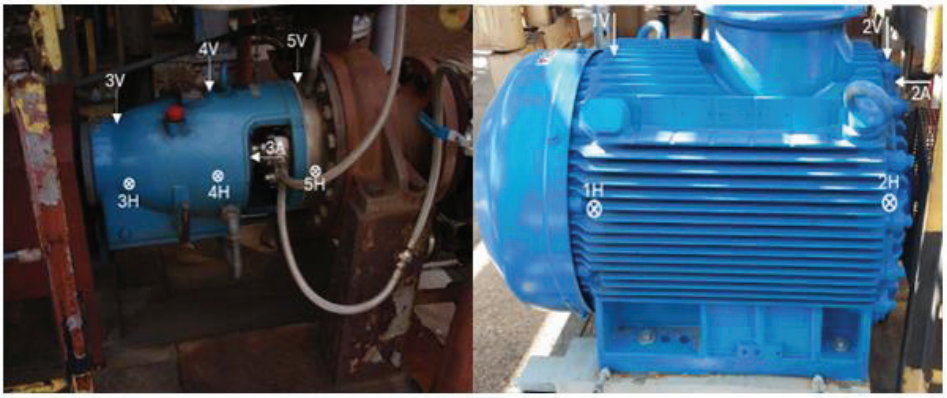
Abstract

The case show diagnostics of pump after the replacement of the electric motor. It highlights the importance of analysing not only frequency spectra but also time-domain records. Mentioned time-domain records were the most significant for diagnosing of the equipment.

Keywords: *vibrodiagnostic, spectra, time-domain*

Úvod

Jedná sa o štandardné odstredivé jednostupňové čerpadlo Weisse & Monski 151HZ5321. Výkon elektromotora je 160 kW a jeho otáčky sú približne 2985 RPM. Prietok čerpadla kolíše štandardne v rozmedzí od 120 do 160 m^3/h, väčšinou okolo 140-150 m^3/h. Čerpaný materiál je rozpúšťadlo s označením NMP+MEG a teplotou okolo 170 ° C. Hodnoty vibrácií na danom zariadení sú hodnotené normou ČSN ISO 10816-7 a limitné úrovne sú nastavené na 4 mm/s (RMS) prvý alarm, 6,6 mm/s (RMS) druhý alarm. Meracie miesta sú vyznačené na Obr. 1. Meranie bolo vykonané prístrojom Adash A4300 VA3 Pro.



Obr. 1 Vyznačenie meracích miest zariadenia GA208A

1. Prvé meranie 2.12.2025

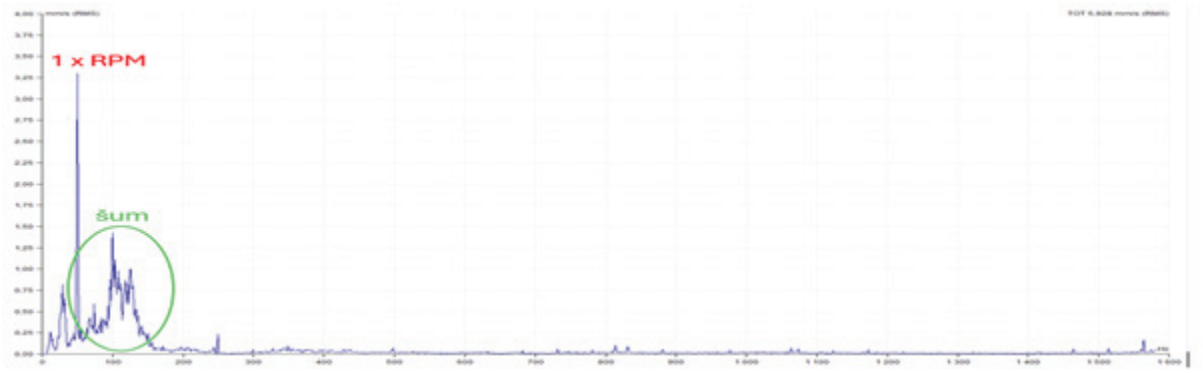
Meranie bolo vykonané po výmene elektromotora. Absolútne hodnoty efektívnej rýchlosti vibrácií boli na elektromotore v norme, na čerpadle boli zvýšené, Tab. 1. V spektrách rýchlosti čerpadla dominovala špička na otáčkovej frekvencii a prítomná bola aj zvýšená úroveň šumu, Obr. 2. Spektrá zrýchlenia vykazovali výraznú oblasť šumu predovšetkým v oblasti od 1,5 kHz – 6,5 kHz, Obr. 3. Charakter zmienených spektier nám indikoval silné kavitačné symptómy a zvýšené sily pôsobiace na čerpadlo (ťah od potrubia, sily v dôsledku kavitácie a pod). Elektromotor nevykazoval anomálie a ani poškodenie. Ložiská zariadenia nevykazovali poruchový stav, v dôsledku kavitácie ale ložiská čerpadla indikovali zvýšené zaťaženie. Stav čerpadla nebol ideálny, avšak v porovnaní s predošlými meraniami nedošlo k výraznej zmene charakteru frekvenčných spektier rýchlosti a zrýchlenia. Silné kavitačné symptómy a tým aj zvýšené hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií sú na čerpadle prítomné dlhodobo, Obr. 4 a Obr. 5. Súvisí to s celkovo horšou optimalizáciou prietokov na danej prevádzke. V minulosti prevádzka fungovala v rámci vyšších výkonov (prietokov), následne došlo k poklesu, avšak potrubný systém bol optimalizovaný len v obmedzenej miere. Z hľadiska nameraných hodnôt a charakteru spektier som nevidel zásadný problém pre prevádzkovanie čerpadla s tým, že na čerpadle v blízkej dobe znova vykonám vibrodiagnostické meranie.

Problémom bol ale charakter časových záznamov zrýchlenia Obr. 6, zmeny v časových záznamoch rýchlosti boli zanedbateľné. Z obrázka je vidieť výskyt špičiek v okolí ktorých je prítomný aj výrazný šum. Takýto charakter časových záznamov sa v minulosti na čerpadle nevyskytoval. Analýza záznamov ukázala, že špičky majú pravidelný charakter a sú od seba vzdialené o otáčkovú frekvenciu čerpadla, Obr. 7. Na základe analýzy spektier a celkovo nameraných hodnôt vibrácií som sa rozhodol, že na ďalší deň vykonám ešte jedno meranie vibrácií.

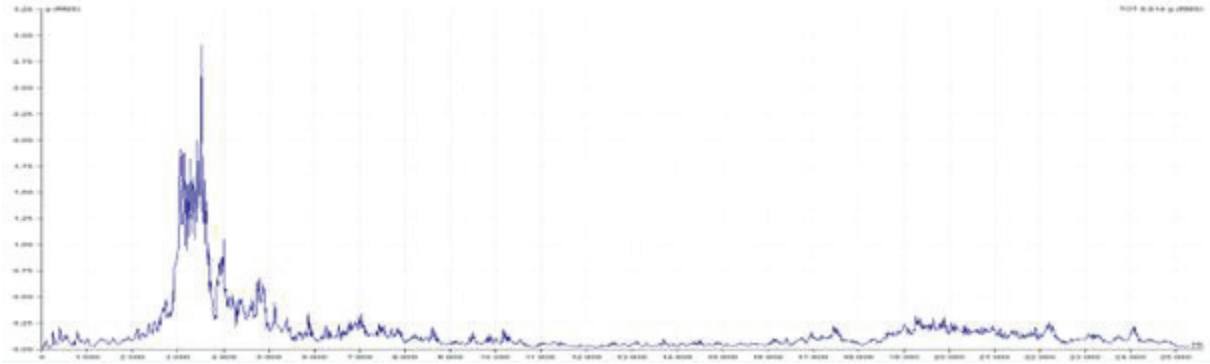
Tab.1 namerané hodnoty efektívnej rýchlosti, zrýchlenia a obálky z 23.6. a 2.12.2025

Názov	Dátum	23.6.	2.12.	Jednotka	Alarm
G 208A					
1H\ISO RMS	2.12.2025	4,6	1,1	mm/s	Ok
1H\LBEARING RMS	2.12.2025	1,12	0,432	g	
1H\LBEARING 0-P	2.12.2025	5,72	2,75	g	
1H\ENV 0-P	2.12.2025	5,46	2,75	g	
1V\ISO RMS	2.12.2025	3,72	0,538	mm/s	Ok
1V\LBEARING RMS	2.12.2025	0,789	0,463	g	
1V\LBEARING 0-P	2.12.2025	3,74	2,16	g	
1V\ENV 0-P	2.12.2025	3,63	2,11	g	
2A\ISO RMS	2.12.2025	5,09	1,11	mm/s	Ok
2A\LBEARING RMS	2.12.2025	0,652	0,271	g	
2A\LBEARING 0-P	2.12.2025	2,98	1,29	g	

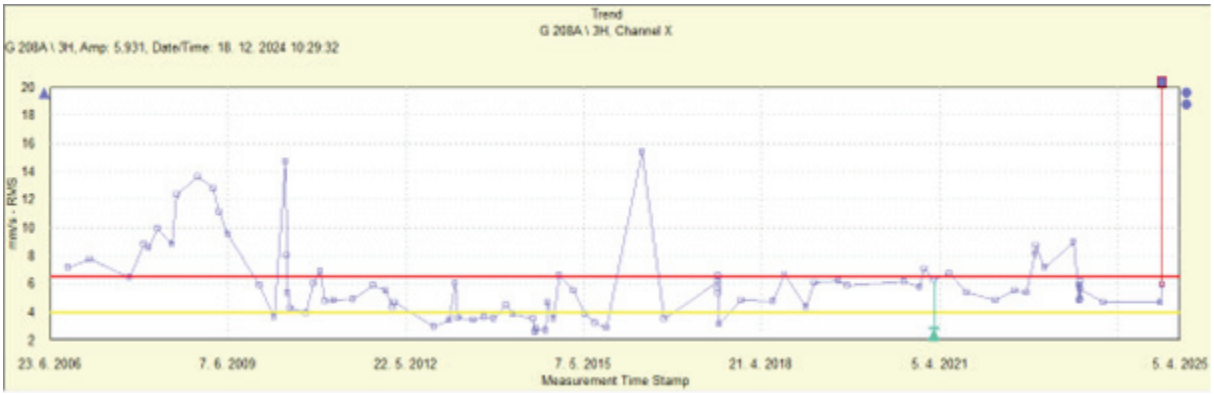
Názov	Dátum	23.6.	2.12.	Jednotka	Alarm
2A\ENV 0-P	2.12.2025	2,94	1,28	g	
2H\ISO RMS	2.12.2025	3,16	1,09	mm/s	Ok
2H\LBEARING RMS	2.12.2025	1,63	0,263	g	
2H\LBEARING 0-P	2.12.2025	9,7	1,39	g	
2H\ENV 0-P	2.12.2025	9,15	1,31	g	
2V\ISO RMS	2.12.2025	4	0,516	mm/s	Ok
2V\LBEARING RMS	2.12.2025	2,71	0,166	g	
2V\LBEARING 0-P	2.12.2025	17,9	0,731	g	
2V\ENV 0-P	2.12.2025	17,9	0,731	g	
3A\ISO RMS	2.12.2025	3,44	4,14	mm/s	Alert
3A\LBEARING RMS	2.12.2025	4,59	10,6	g	
3A\LBEARING 0-P	2.12.2025	33,1	80,7	g	
3A\ENV 0-P	2.12.2025	31	80,7	g	
3H\ISO RMS	2.12.2025	7,52	7,26	mm/s	Danger
3H\LBEARING RMS	2.12.2025	4,88	7,62	g	
3H\LBEARING 0-P	2.12.2025	35,4	43,3	g	
3H\ENV 0-P	2.12.2025	35,4	43,3	g	
3V\ISO RMS	2.12.2025	6,64	5,87	mm/s	Alert
3V\LBEARING RMS	2.12.2025	4,28	8,27	g	
3V\LBEARING 0-P	2.12.2025	32,7	51,2	g	
3V\ENV 0-P	2.12.2025	26,9	46,1	g	
4H\ISO RMS	2.12.2025	7,03	5,5	mm/s	Alert
4H\LBEARING RMS	2.12.2025	3,16	8,88	g	
4H\LBEARING 0-P	2.12.2025	18,3	59,2	g	
4H\ENV 0-P	2.12.2025	17,9	59,2	g	
4V\ISO RMS	2.12.2025	5,04	4,55	mm/s	Alert
4V\LBEARING RMS	2.12.2025	3,17	5,53	g	
4V\LBEARING 0-P	2.12.2025	22,6	46,9	g	
4V\ENV 0-P	2.12.2025	20,5	33,6	g	



Obr. 2 spektrum rýchlosti pre merací bod 3H zo dňa 2.12.2025



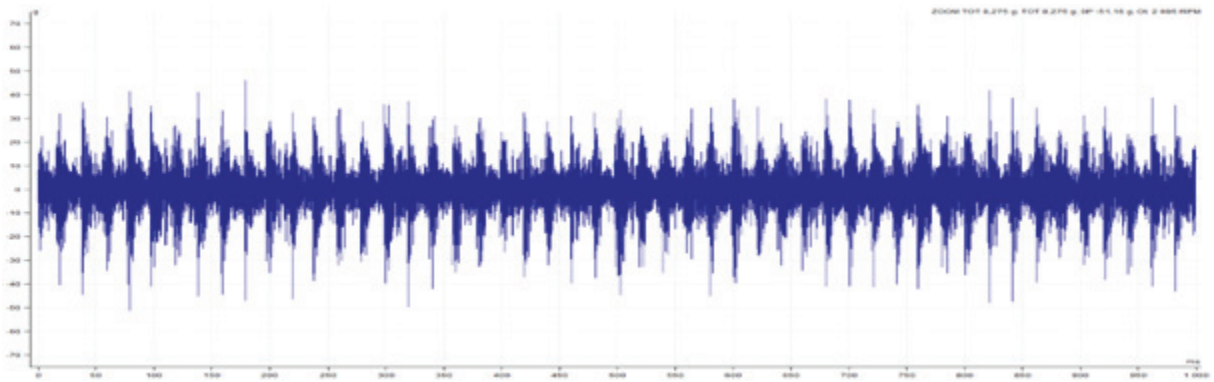
Obr. 3 Spektrum zrýchlenia pre merací bod 4V zo dňa 2.12.2025



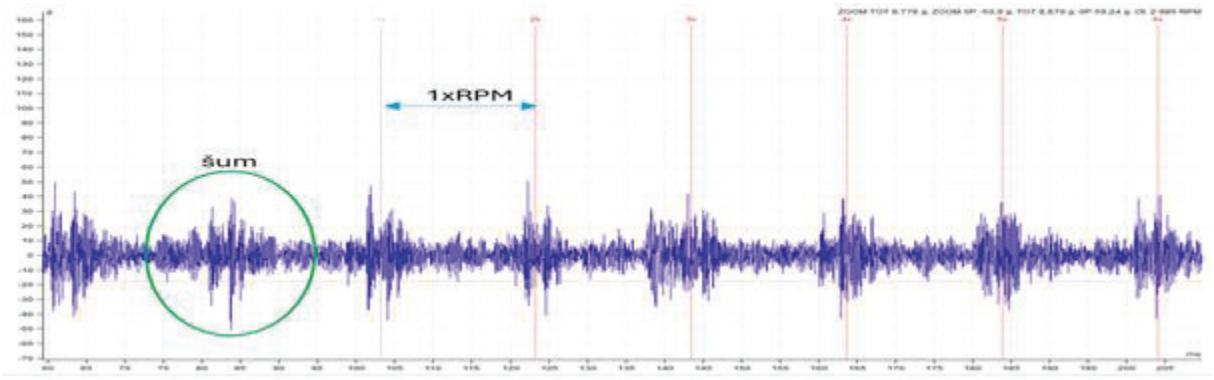
Obr. 4 Trend rýchlosti vibrácií pre pozíciu 3H– prístroj Microlog SKF



Obr. 5 Trend rýchlosti vibrácií pre pozíciu 3H – prístroj ADASH



Obr. 6 časový záznam zrýchlenia pre merací bod 3V zo dňa 2.12.2025



Obr. 7 časový záznam zrýchlenia pre merací bod 4H zo dňa 2.12.2025

2. Druhé meranie 3.12.2025

Namerané hodnoty vibrácií (rýchlosti, zrýchlenia a obálky) vykázali len minimálne zmeny v porovnaní s predchádzajúcim meraním. Na čerpadle boli hodnoty rýchlosti zvýšené, v prípade elektromotora boli v norme. Podobný výsledok sme zaznamenali aj v prípade spektier a časových záznamov, t. j. nedošlo k výrazným zmenám ich charakterov. Časové záznamy zrýchlenia predovšetkým u čerpadla vykazovali naďalej špičky v okolí ktorých bol prítomný výrazný šum. Špičky mali pravidelný charakter a boli od seba vzdialené o otáčkovú frekvenciu elektromotora. Vykonali sme aj meranie relatívnej fázy. Výsledky nám indikovali mierne problémy s nesúosovosťou (paralelnou). Nevyváženosť na základe merania fázy som nevedel ani vylúčiť, ani potvrdiť.

3. Vyhodnotenie 1. a 2. merania

Namerané hodnoty rýchlosti, zrýchlenia, obálkových parametrov mi neindikovali výrazné zmeny v správaní čerpadla v porovnaní s jeho minulosťou. Podobne to platilo aj pre frekvenčné spektrá rýchlosti a zrýchlenia. Z charakteru časových záznamov som ale usúdil, že v čerpadle prebiehajú rázy, impulzy, ktoré časové záznamy zrýchlenia dokážu zaznamenať. To nám indikovalo buď mechanické poškodenie čerpadla alebo problémy s prúdením média, prípadne ich kombinácia. Rozhodol som sa, že na čerpadle odporučím vykonať štandardnú revíziu so zameraním sa na stav obežného kolesa.

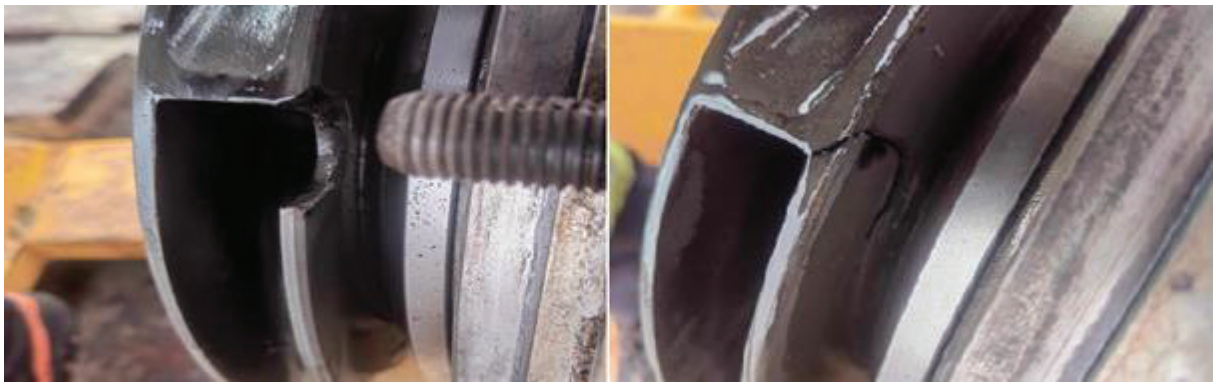
4. Meranie po oprave 30.12.

Štandardnou revíziou bolo zistené poškodenie obežného kolesa na viacerých miestach, Obr. 8. Hodnoty vibrácií efektívnej rýchlosti boli na meracích miestach 4H a 4V mierne nad I. alarmom, Tab. 2. Celkovo ale na čerpadle došlo k poklesu hodnôt rýchlosti, zrýchlenia a obálky vibrácií. Kavitačné symptómy naďalej pretrvávali, avšak z hydrodynamického hľadiska došlo k zlepšeniu chodu. Časové záznamy zrýchlenia opäť vykazovali štandardný charakter, *O*br. 9.

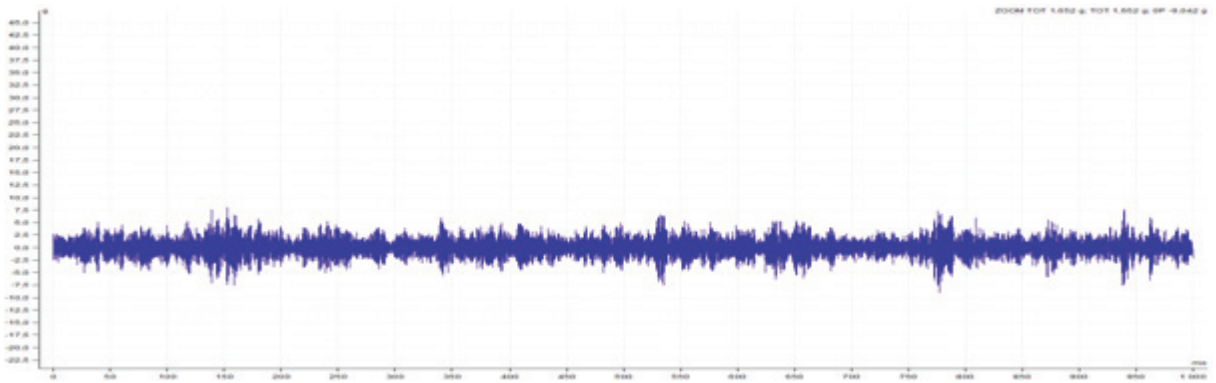
Tab. 2 namerané hodnoty efektívnej rýchlosti, zrýchlenia a obálky z 3.12. a 2.12.2025

Názov	Datum	3.12.	30.12.	Jednotka	Alarm
G 208A					
1H\ISO RMS	30.12.2025	1,05	0,539	mm/s	Ok
1H\LBEARING RMS	30.12.2025	0,494	0,361	g	
1H\LBEARING 0-P	30.12.2025	2,38	1,52	g	
1H\ENV 0-P	30.12.2025	2,1	1,44	g	
1V\ISO RMS	30.12.2025	0,514	0,348	mm/s	Ok
1V\LBEARING RMS	30.12.2025	0,386	0,451	g	
1V\LBEARING 0-P	30.12.2025	1,78	1,77	g	
1V\ENV 0-P	30.12.2025	1,47	1,68	g	
2A\ISO RMS	30.12.2025	1,07	0,701	mm/s	Ok
2A\LBEARING RMS	30.12.2025	0,388	0,277	g	
2A\LBEARING 0-P	30.12.2025	2,05	1,17	g	
2A\ENV 0-P	30.12.2025	1,98	1,17	g	
2H\ISO RMS	30.12.2025	0,982	0,399	mm/s	Ok
2H\LBEARING RMS	30.12.2025	0,258	0,174	g	
2H\LBEARING 0-P	30.12.2025	1,66	0,788	g	
2H\ENV 0-P	30.12.2025	1,66	0,788	g	
2V\ISO RMS	30.12.2025	0,408	0,349	mm/s	Ok
2V\LBEARING RMS	30.12.2025	0,155	0,095	g	
2V\LBEARING 0-P	30.12.2025	0,89	0,441	g	
2V\ENV 0-P	30.12.2025	0,89	0,379	g	
3A\ISO RMS	30.12.2025	3,87	3,3	mm/s	Ok
3A\LBEARING RMS	30.12.2025	8,03	1,88	g	
3A\LBEARING 0-P	30.12.2025	71,2	16,9	g	
3A\ENV 0-P	30.12.2025	71,2	15,8	g	
3H\ISO RMS	30.12.2025	3,83	3,37	mm/s	Ok
3H\LBEARING RMS	30.12.2025	2,1	1,8	g	
3H\LBEARING 0-P	30.12.2025	11	10,9	g	
3H\ENV 0-P	30.12.2025	11	9,59	g	
3V\ISO RMS	30.12.2025	6,68	3,54	mm/s	Ok
3V\LBEARING RMS	30.12.2025	7,49	1,52	g	
3V\LBEARING 0-P	30.12.2025	44,7	8,46	g	

Názov	Datum	3.12.	30.12.	Jednotka	Alarm
3V\ENV 0-P	30.12.2025	43,7	8,08	g	
4H\ISO RMS	30.12.2025	5,77	4,3	mm/s	Alert
4H\LBEARING RMS	30.12.2025	3,66	1,65	g	
4H\LBEARING 0-P	30.12.2025	37,3	9,04	g	
4H\ENV 0-P	30.12.2025	29,4	8,08	g	
4V\ISO RMS	30.12.2025	2,81	4,07	mm/s	Alert
4V\LBEARING RMS	30.12.2025	9,67	1,71	g	
4V\LBEARING 0-P	30.12.2025	65,5	12,7	g	
4V\ENV 0-P	30.12.2025	65,5	11,4	g	
5H\ISO RMS	30.12.2025	5,77	2,77	mm/s	Ok
5H\LBEARING RMS	30.12.2025	3,66	2,57	g	
5H\LBEARING 0-P	30.12.2025	37,3	13,9	g	
5H\ENV 0-P	30.12.2025	29,4	11,9	g	
5V\ISO RMS	30.12.2025	2,81	2,17	mm/s	Ok
5V\LBEARING RMS	30.12.2025	9,67	1,39	g	
5V\LBEARING 0-P	30.12.2025	65,5	8,43	g	
5V\ENV 0-P	30.12.2025	65,5	8,43	g	



Obr. 8 Fotodokumentácia poškodeného obežného kolesa



Obr. 9 časový záznam zrýchlenia pre merací bod 4H zo dňa 30.12.2025

Záver

Na tomto príklade je pekne vidieť dôležitosť vyhodnocovať nielen spektrá, ale aj časové záznamy. Samozrejme, veľký význam má aj meranie fázy, či už absolútnej alebo relatívnej. Uvedený prípad síce z hľadiska nájdenia príčiny nepatrí medzi náročnejšie, avšak bez analýzy časových záznamov zrýchlenia by mohlo ľahko dôjsť k chybnému záveru a ponechaniu čerpadla v prevádzke.

Autor:

Ing. Jozef Klinovský
Monitorovanie stavu zariadení a BIG DATA
SLOVNAFT MONTÁŽE A OPRAVY a.s.
Vlčie hrdlo 1
821 07 Bratislava – mestská časť Ružinov
Tel.: +421 911 058 915 E-mail: jozef.klinovsky2@mao.slovnaft.sk

ZVÝŠENÉ HODNOTY VIBRÁCIÍ PO OPRAVE NA POZÍCII P506A

Increased values of vibration after repair on the position P506A

Jozef Klinovský
SLOVNAFT MONTÁŽE A OPRAVY a.s.g

Anotácia

Prípad sa venuje diagnostike čerpadla po jeho generálnej revízii. Stav chodu zariadenia ani po revízii nebol po vibračnej stránke vyhovujúci. Vzhľadom na minulosť zariadenia bolo potrebné na identifikáciu príčiny zvýšených vibrácií analyzovať frekvenčné spektrá, ložiskové parametre, hodnoty rýchlosti a zrýchlenia, relatívnu fázu, vykonať bump test a pod. Analýza zmienených viacerých parametrov a typov meraní dokázala úspešne identifikovať problém a následne došlo k náprave.

Kľúčové slová: fáza, bump test, lucerna, vibrodiagnostika

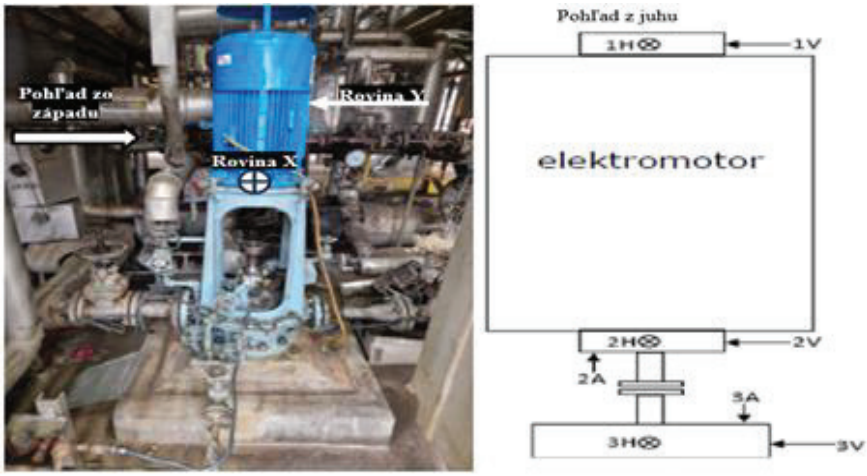
Abstract

The case focuses on diagnosing a pump after its major overhaul. The operating condition of the equipment was still not satisfactory in terms of vibration even after the overhaul. If we consider the machine's history, it was necessary to analyse frequency spectra, bearing parameters, velocity and acceleration values, relative phase, perform a bump test, and more to identify the cause of the increased vibrations. The analysis of these multiple parameters and measurement types successfully identified the problem, which was subsequently corrected.

Keywords: *phase, bump test, lantern support, vibrodiagnostic*

Úvod

Jedná sa o odstredivé jednostupňové vertikálne čerpadlo výrobcu Shin Nippon Machinery. Výkon elektromotora je 12,5 kW a jeho otáčky sú približne 2945 RPM. Prietok čerpadla je približne 6,5 m^3/h. Čerpaný materiál je voda. Hodnoty vibrácií na danom zariadení sú hodnotené normou ČSN ISO 10816-7 a limitné úrovne sú nastavené na 4 mm/s (RMS) prvý alarm, na 6,6 mm/s (RMS) pre druhý alarm. Na hodnotenie sólo chodu elektromotora sme použili normu STN EN IEC 60034-14, alarmová hodnota na základe normy a našich skúseností bola stanovená na 1,8 mm/s. Meracie miesta sú vyznačené na Obr. 1. Meranie bolo vykonané prístrojom Adash A4300 VA3 Pro.



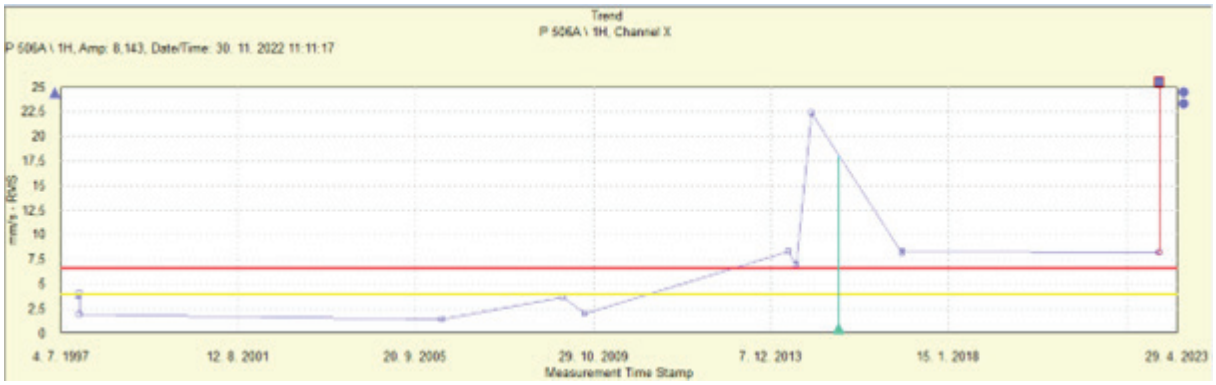
Obr. 1 Vyznačenie meracích miest zariadenia P506A

1. Prvé meranie 8.1.2025

Meranie prebehlo po generálnej revízii čerpadla. V oprave bol elektromotor aj celé vertikálne čerpadlo. Absolútne hodnoty efektívnej rýchlosti vibrácií boli na meracom bode 1H nad I. alarmom, hodnoty na ostatných meracích miestach boli v norme, Tab. 1. V spektrách rýchlosti sa vyskytovala výrazná špička, ktorá prislúchala otáčkovej frekvencii elektromotora, Obr. 2. Medzi vertikálnymi a horizontálnymi vibráciami sme evidovali výrazný nepomer, čo sa týka veľkosti nameraných hodnôt. Vyššie hodnoty mal horizontálny smer, čo vychádzalo z tuhosti konštrukcie a uloženia. Spektrá a hodnoty zrýchlenia, obálky nám neindikovali poškodenie ložísk elektromotora a lucerny. Stav zariadenia som nehodnotil ako vážny a rozhodol som sa, že môže byť naďalej prevádzkované. Navyše, pozícia v minulosti pravidelne vykazovala zvýšené hodnoty vibrácií, Obr. 3. Do budúcna som odporučil naplánovať kontrolu spojky a centrovanie zariadenia.



Obr. 2 Spektrum rýchlosti pre merací bod 3H zo dňa 8.1.2025



Obr. 3 Trend rýchlosti vibrácií pre pozíciu 1H – prístroj Microlog SKF

2. Druhé meranie 14.1.2025

Prevádzka nebola spokojná s výsledkom prvého merania. Vzhľadom na generálnu revíziu sa očakávali nižšie hodnoty vibrácií a celkovo lepší chod. Druhé meranie bolo vykonané pri rozpojení čerpadla a elektromotora, tzv. sólo chod elektromotora aj s medzikusom spojky. Absolútne hodnoty efektívnej rýchlosti vibrácií v horizontálnych smeroch výrazne prekročili medznú hodnotu stanovenú normou a nami (1,8 mm/s), Tab. 1. Zaujímavosťou bolo, že v porovnaní s prvým meraním došlo dokonca k nárastu hodnôt efektívnej rýchlosti vibrácií. Celkovo charakter spektier bol podobný ako pri prvom meraní, rozdiel bol vo výrazne väčšej amplitúde na otáčkovej frekvencii. Okrem merania vibrácií sme vykonali aj bump test (zistenie vlastných frekvencií sústavy) a meranie relatívnej fázy. V prvom kroku sme odporučili skontrolovať všetky kotviace skrutky konštrukcie zariadenia (stav, dotiahnutie a pod.). Ďalej skontrolovať, či lucerna (konštrukcia, na ktorej je elektromotor uložený) nemá trhliny, lomy a pod. Ďalší sólo chod elektromotora vykonať bez medzikusu spojky.

3. Tretie meranie 22.1.2025

Meranie prebehlo po utiahnutí kotviacich skrutiek konštrukcie, kontrole stavu lucerny, zosadení medzikusu spojky a krátko po jeho spustení. Meraný bol opäť len sólo motor. Absolútne hodnoty vibrácií v horizontálnych smeroch naďalej výrazne prekračovali medznú hodnotu stanovenú normou, Tab. 1. Charakter spektier rýchlosti a zrýchlenia bol nezmenený v porovnaní s druhým meraním. Podobne ako pri druhom meraní sme vykonali bump test a meranie relatívnej fázy. Frekvenčné spektrum z bump testu je na Obr. 4. Na Obr. 5 vidíme spôsob, akým stroj vibroval (tvar vibrácií na základe merania relatívnej fázy).

Na základe analýzy spektier, relatívnej fázy a celkovo nameraných hodnôt pri druhom a treťom meraní ako možné príčiny zvýšených vibrácií sme určili:

1. Poškodenie elektromotora alebo medzikusu spojky (možná nevyváženosť)
2. Problémy s tuhosťou konštrukcie
3. Rezonancia konštrukcie vybudená elektromotorom

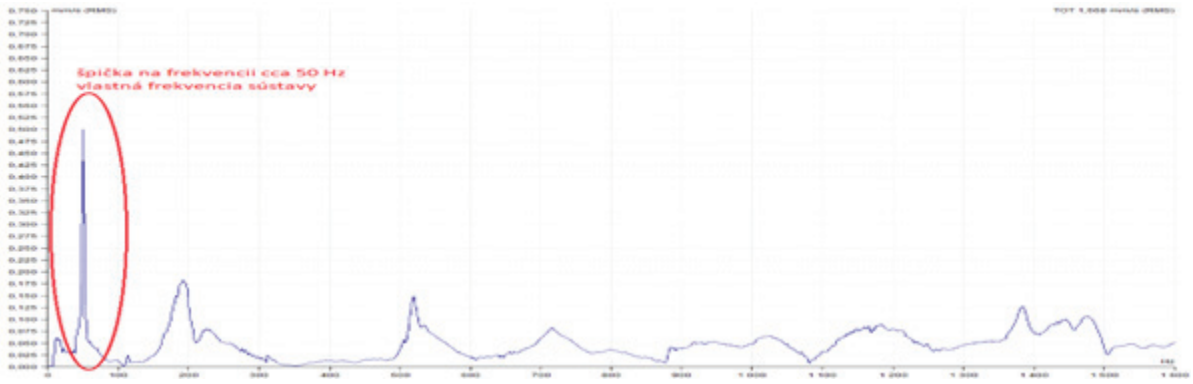
Bod č. 1 sme považovali za veľmi málo pravdepodobný. Zvýšené vibrácie vidíme ako dôsledok buď bodu č. 2 alebo č. 3, prípadne ich kombinácia. Dôvody, prečo takto usudzujeme, sú:

- Hodnoty vibrácií v horizontálnom smere dosiahli až 8,5 mm/s, čo je na sólo chod elektromotora veľmi vysoká hodnota a nepredpokladáme, že aj keby bol elektromotor nevyvážený/inak poškodený (motor bol navyše v oprave), hodnoty by v prípade dostatočne tuhého uloženia boli až takto vysoké.
- Bump test, ktorý sme vykonali nám naznačoval, že jedna z vlastných frekvencií konštrukcie by mohla byť na frekvencii cca 50 Hz, teda sa zhoduje s otáčkovou frekvenciou elektromotora t. j. počas prevádzky elektromotora môže dochádzať k rezonancii konštrukcie.
- Keď som sa do elektromotora zaprel (vektor pôsobenia sily je znázornený na obr. 5), hodnoty vibrácií dokázali klesnúť z cca 8 mm/s až na cca 4,5 mm/s, čo v prípade, že konštrukcia elektromotora je dostatočne tuhá by nemalo nastať. Ďalší dôvod takého výrazného poklesu môže byť, že zapretím došlo k zmene tuhosti uloženia elektromotora, teda zmene vlastnej frekvencie konštrukcie a následnému zmierneniu prípadnej rezonancie.
- Pri odstavení elektromotora sme vykonali aj kontinuálne meranie vibrácií. Krátko po odstavení elektromotora (menej ako 1 sekunda po odstavení) došlo k prudkému poklesu hodnôt vibrácií (na cca 1,5 mm/s). t. j. zmena otáčok elektromotora mala zásadný dopad na veľkosť vibrácií. V prípade, ak by elektromotor bol nevyvážený alebo inak poškodený, by nám takéto správanie nedávalo zmysel.
- Zariadenie aj v minulosti (od roku 2014) vykazovalo zvýšené vibrácie, obr. 3. Teda jedná sa o dlhodobý problém.
- Meranie relatívnej fázy v axiálnom smere na elektromotore naznačuje, že vibrácie sú v protifáze, čo môže byť dôsledok nedostatočnej tuhosti v horizontálnom smere alebo rezonancie. To, akým spôsobom elektromotor kmitá, je znázornené na obr. 5.

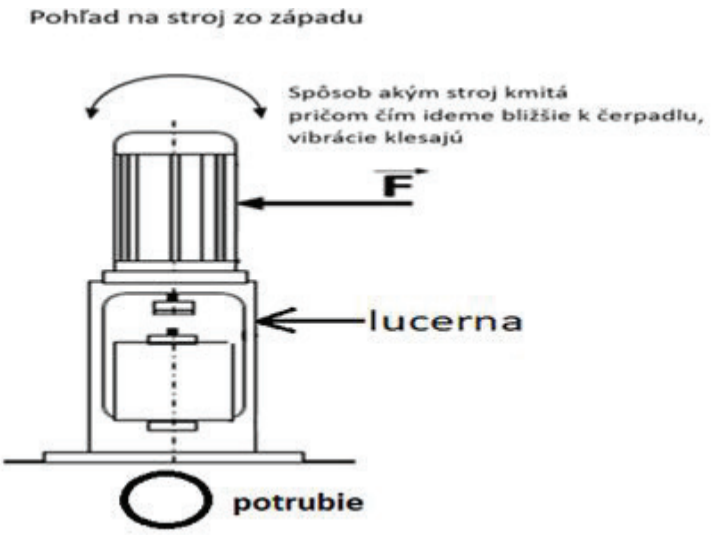
Tab. 1 Namerané hodnoty efektívnej rýchlosti, zrýchlenia a obálky z dní 8.1., 14.1. a 22.1. 2025

Názov	08.1	14.1	22.1	Jednotka	Alarm
P 506A					
1A\ISO RMS	0,628	0,963	1,04	mm/s	Ok
1A\LBEARING RMS	0,159	0,35	0,363	g	
1A\LBEARING 0-P	0,666	1,5	1,64	g	
1A\ENV 0-P	0,661	1,5	1,36	g	
1H\ISO RMS	5,34	8,86	8,86	mm/s	Danger
1H\LBEARING RMS	0,126	0,156	0,244	g	
1H\LBEARING 0-P	0,539	1,52	1,07	g	
1H\ENV 0-P	0,419	0,539	1,06	g	
1V\ISO RMS	0,618	1,77	1,98	mm/s	Ok
1V\LBEARING RMS	0,352	0,213	0,244	g	
1V\LBEARING 0-P	0,844	0,591	0,781	g	
1V\ENV 0-P	0,844	0,567	0,724	g	
2H\ISO RMS	3,46	4,9	4,73	mm/s	Alert
2H\LBEARING RMS	0,135	0,187	0,131	g	

Názov	08.1	14.1	22.1	Jednotka	Alarm
2H\LBEARING 0-P	0,426	0,818	0,598	g	
2H\ENV 0-P	0,426	0,818	0,535	g	
2V\ISO RMS	0,484	1,07	1,24	mm/s	Ok
2V\LBEARING RMS	0,155	0,298	0,227	g	
2V\LBEARING 0-P	0,516	1,26	1,07	g	
2V\ENV 0-P	0,516	1,18	1,07	g	
3H\ISO RMS	0,432			mm/s	Ok
3H\LBEARING RMS	0,015			g	
3H\LBEARING 0-P	0,062			g	
3H\ENV 0-P	0,062			g	
3V\ISO RMS	0,136			mm/s	Ok



Obr. 4 Spektrum bump testu zo dňa 14.1.2025



Obr. 5 Vektor pôsobenia sily a tvar vibrácií zariadenia

4. Záver všetkých meraní

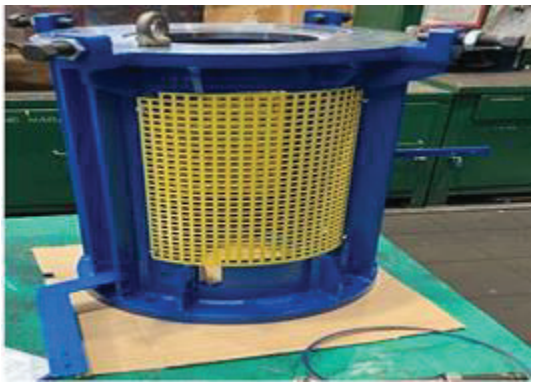
Na základe všetkých troch meraní a analýzy výsledkov sme odporučili zvýšiť tuhosť konštrukcie, t. j. predovšetkým samotnej lucerny, a to buď jej úpravou alebo výmenou.

5. Meranie a riešenie spoločnosťou Dystiff

Po našich meraniach a záveroch bol problém riešenia stavu stroja P506A predaný spoločnosti Dystiff. Tá následne vykonala na zariadení meranie jeho modálnych vlastností. Záver ich analýzy bol:

- Problém zvýšených vibrácií je spôsobený vlastnými frekvenciami sústavy danými polohou a hmotnosťou elektromotora a poddajnou lucernou
- Konštrukcia lucerny je nevhodná

Spoločnosť Dystiff následne urobila niekoľko návrhov lucerny. Niektoré návrhy upravovali už existujúcu lucernu (zníženie jej výšky, doplnenie výstužných rebier, pridanie hmoty a pod.). Dystiff ale ako najlepšie riešenie odporučil a navrhol výrobu novej tuhšej konštrukcie lucerny. Vyrobená lucerna je na Obr. 6.



Obr. 6 Nová lucerna pre pozíciu P506A

6. Meranie po výmeny lucerny 23.4.2026

Absolútne hodnoty vibrácií boli v rámci hodnotiacej normy. Namerané hodnoty sú uvedené v Tab. 2. Celkovo v porovnaní s dlhodobým trendom (Obr. 3) došlo k výraznému zlepšeniu. Z vibrodiagnostického hľadiska sme zariadenie zhodnotili ako vhodné na dlhodobú štandardnú prevádzku.

Tab. 2 Namerané hodnoty efektívnej rýchlosti, zrýchlenia a obálky z dní 23.4.2026 a 8.1. 2025

Názov	8.1.2025	23.4.2026	Jednotka	Alarm
P 506A				
1A\ISO RMS	0,628	0,273	mm/s	Ok
1A\LBEARING RMS	0,159	0,071	g	
1A\LBEARING 0-P	0,666	0,293	g	
1A\ENV 0-P	0,661	0,293	g	
1H\ISO RMS	5,34	2,88	mm/s	Ok
1H\LBEARING RMS	0,126	0,149	g	
1H\LBEARING 0-P	0,419	0,56	g	
1H\ENV 0-P	0,419	0,56	g	
1V\ISO RMS	0,618	1,21	mm/s	Ok
1V\LBEARING RMS	0,352	0,199	g	
1V\LBEARING 0-P	0,844	0,699	g	
1V\ENV 0-P	0,844	0,699	g	

Názov	8.1.2025	23.4.2026	Jednotka	Alarm
2H\ISO RMS	3,46	2,75	mm/s	Ok
2H\LBEARING RMS	0,135	0,145	g	
2H\LBEARING 0-P	0,426	0,532	g	
2H\ENV 0-P	0,426	0,532	g	
2V\ISO RMS	0,484	0,821	mm/s	Ok
2V\LBEARING RMS	0,155	0,295	g	
2V\LBEARING 0-P	0,516	1,1	g	
2V\ENV 0-P	0,516	1,1	g	
3H\ISO RMS	0,432	0,334	mm/s	Ok
3H\LBEARING RMS	0,015	0,059	g	
3H\LBEARING 0-P	0,062	0,346	g	
3H\ENV 0-P	0,062	0,3	g	
3V\ISO RMS	0,136	0,144	mm/s	Ok
3V\LBEARING RMS	0,015	0,073	g	
3V\LBEARING 0-P	0,089	0,404	g	
3V\ENV 0-P	0,084	0,404	g	

Záver

Za najdôležitejšie považujem, že sme boli na základe našich meraní a analýzy schopní presvedčiť prevádzku, že problém je v konštrukcii zariadenia, keďže sa voči tomuto tvrdeniu spočiatku stavala skepticky. Dôležitú úlohu zohralo meranie relatívnej fázy, bump test a analýza spektier t. j. komplexnejšia analýza. Poďakovanie taktiež patrí spoločnostiam Dystiff a DC pumps. Dystiff meraním potvrdil naše predpoklady a navrhol vhodný typ lucerny. DC pumps následne lucernu vyrobila.

Autor(i) :

Ing. Jozef Klinovský
Monitorovanie stavu zariadení a BIG DATA
SLOVNAFT MONTÁŽE A OPRAVY a.s.
Vlčie hrdlo 1
821 07 Bratislava – mestská časť Ružinov
Tel.: +421 911 058 915
E-mail: jozef.klinovsky2@mao.slovnaft.sk

OBMEDZENIA OBJEMOVEJ REGULÁCIE PIESTOVÝCH KOMPRESOROV

The limit of volume control of piston compressors

Lucia Žuľová, Robert Grega, Jozef Krajňák, Matej Urbanský
Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta

Anotácia

Technologická potreba výroby vzduchu vyžaduje aby množstvo dodávaneho vzduchu bolo prispôsobené množstvu spotreby. Očakáva sa, že sa zníži spotreba energie potrebnej na výrobu stlačeného vzduchu. Objemová výkonnosť piestového kompresora bola regulovaná dvoma pracovnými režimami. Oba pracovné režimy sa prejavujú zvýšením vibrácií pohonu piestového kompresora. Aplikácia tradičnej pružnej spojky v pohone s piestovým kompresorom nieje pre objemovú reguláciu dostatočná. Vyžaduje sa vývoj nových typov pružných spojok ktoré umožnia reagovať zmenou torznej tuhosti na regulačné zásahy.

Kľúčové slová: piestový kompresor, vibrácie, pružná spojka

Abstract

The technological need for air production requires that the amount of air supplied be adjusted to the amount of consumption. It is expected that the energy consumption required for the production of compressed air will be reduced. The volumetric performance of the piston compressor was regulated by two operating modes. Both operating modes are manifested by an increase in the vibrations of the piston compressor drive. The application of a traditional flexible coupling in a piston compressor drive is not sufficient for volumetric regulation. The development of new types of flexible couplings is required that will allow the response of the torsional stiffness to regulatory interventions by changing.

Key words: *piston compressor, vibrations, flexible coupling*

Úvod

Pohonné systémy sú základnou jednotkou technologických zariadení, priemyselných a výrobných, dopravných, manipulačných zariadení ale aj zariadení pre podporné obslužné činnosti v mnohých oblastiach hospodárstva. Pri stanovení vývojových trendov sa predpokladá, že nové pohonné systémy budú diverzifikované [1-3]. Výrazný podiel spotrebovanej energie sa prisudzuje pohonom systémov, ktoré ju ale v konečnom dôsledku menia na iný typ energie. Jedná sa predovšetkým o také zariadenia ktoré menia vstupnú energiu na mechanickú energiu, ktorá je ďalej prenášaná a distribuovaná rotačným pohybom hriadeľa [4-6].

Produkcia energie, jej distribúcia a efektívna spotreba, je vážnym celospoločenským problémom. Vplyvom nedostatočného energetického mixu dochádza k výrazným klimatickým zmenám na celosvetovej úrovni [7-9]. Pre zmiernenie týchto emisných vplyvov sú vytvárané

stratégie, dohody a plány hľadajúce celosvetovú podporu. Splnenie emisných cieľov je zamerané predovšetkým na transformáciu výroby energie.

V kontexte nových celospoločenských udalostí roka 2022, predovšetkým výrazného nárastu cien energií, je nevyhnutne upriamiť pozornosť, nielen na spôsob získavania energie, ale aj na jej efektívne využívanie v procesoch hospodárstva, tak aby bolo dosiahnutá jej znížená spotreba.

Krajiny Európskej únie si stanovili ambiciózne globálne ciele. V oblasti spotreby energie je ambicióznym cieľom viacerých krajín Európskej únie zníženie spotreby energie o 15% oproti referenčnému roku.

Vychádzajúc z týchto ambícii v oblasti uhlíkovej neutrality pri výrobe energie a jej efektívnej a znižujúcej sa spotrebe, je nevyhnutné upriamiť pozornosť výskumu a vývoja aj v oblasti mechanických pohonov na zariadenia podporujúce efektívnu spotrebu energie a zariadenia efektívnej distribúcie mechanickej energie [10], [11].

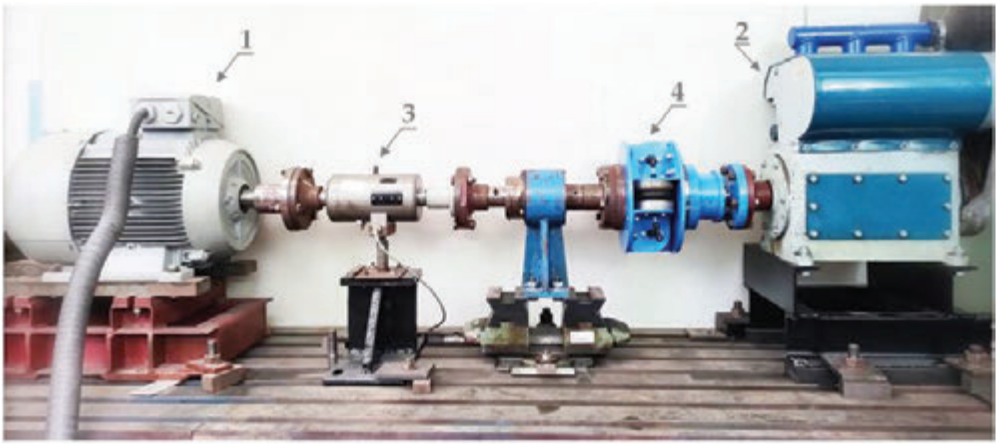
Vzhľadom na charakter mechanických pohonov je nutné konštatovať, že prenos mechanickej energie pomocou rotačného pohybu je sprevádzaný nežiaducimi vibráciami. Modernizácia mechanických pohonov je preto často limitovaná technickými možnosťami [12-14].

Rastúca snaha o zvyšovanie energetickej efektívnosti mechanických pohonov je mnoho krát limitovaná. Jedným z limitov je práve nárast vibrácií. Pri komplexnom pohľade na mechanický pohon je možné konštatovať, že dosiahnutie vysokých prevádzkových schopností pri vysokej energetickej efektivite a zároveň pri nízkych vibráciách je ťažko realizovateľné až mnohokrát nerealizovateľné. Môžeme teda hovoriť o viac kriteriálnej optimalizácií, ktorej riešenie je mnohokrát limitované vzájomne sa vylučujúcimi dejmi.

Cieľom článku je preukázať, že objemová regulácia piestového kompresora nieje realizovateľná bez plynulého ladenia torzných vibrácií.

1. Definovanie problému a testovacieho pohonu

Na mechanické pohony v ktorých sú zaradené piestové stroje ako kompresory, pumpy a čerpadla sú tiež kladené požiadavky optimalizácie, produktivity a efektívnosti. Mnohokrát sú takéto piestové zariadenia umiestnené v prevádzke kde je požadovaný optimalizovaný výstupný výkon. To znamená, že sa nepožaduje maximálna kapacitná - objemová výkonnosť týchto piestových strojov. Pri optimalizovanej objemovej výkonnosti je skôr žiaduce aby takéto mechanické pohony pracovali v určitom kapacitnom rozsahu výkonnosti. Na Obr.1 je mechanický pohon piestového kompresora, ktorý bol použitý ako testovací pohon pre technologickú prevádzku výroby stlačeného vzduchu. Pohon pozostáva z nasledovných častí: 1 - elektromotor s výkonom 7,5 kW s prídavným frekvenčným meničom s plynulou zmenou otáčok od 0 do 3000 min^{-1}, 2 – trojvalcový piestový kompresor, 3 – snímač momentu krútiaceho, 4 – pneumatický ladič torzného kmitania.



Obr. 1 Testovací pohon

Pneumatický ladič je konštruovaný ako ladič s meniteľnou torznou tuhosťou. Použitie ladiča s meniteľnou tuhosťou zabezpečoval výskum vplyvu torznej tuhosti na veľkosť vibrácií pri aplikovaní objemovej regulácie.

Technologické prevádzky požadujú dodávku konštantnej hodnoty tlaku vzduchu, ale dodávané množstvo vzduchu je premenlivé v závislosti od činnosti technologickej prevádzky. Súčasťou prípravy stlačeného vzduchu je aj zásobník stlačeného vzduchu, ktorý minimalizuje nerovnosť dodávky vzduchu. Tradičné prevádzky výroby vzduchu sú navrhnuté tak, že pohon piestového kompresora pracuje pri konštantných otáčkach a dodáva konštantné množstvo vzduchu. Stlačený vzduch je uskladnený v tlakovom zásobníku odkiaľ je distribuovaný potrubným rozvodným systémom k spotrebiteľským technologickým miestam. V prípade ak v zásobníku vzniká prebytok vzduchu je tento prebytok vypustený.

V tradičnej koncepcii výroby vzduchu je objemová výkonnosť kompresora konštantná Q_k=konšt., ale spotreba vzduchu je premenlivá Q_s= var. Pri zníženej spotrebe vzduchu zo zásobníka dochádza k prebytku Q_o. Tento prebytok sa prejavuje zvýšením tlaku v zásobníku a je nevyhnutné ho zo systému vypustiť. Vypustený prebytok je možné označiť za priamu objemovú výkonovú stratu. Z pohľadu efektívnosti procesu výroby stlačeného vzduchu a s akcentom na znižovanie nákladov na jeho výrobu je žiaduce aby vznikali v tomto procese čo najmenšie prebytky ktoré je nevyhnutné vypustiť zo zásobníka. Vhodným riešením by bolo ak by mechanický pohon piestového kompresora pracoval variabilne a bol schopný variabilne reagovať na požiadavku spotreby vzduchu. Takýto mechanický pohon by bol navrhnutý ako pohon pracujúci s premenlivou objemovou výkonnosťou.

Variabilitu objemovej výkonností piestových zariadení je možné riadiť dvoma spôsobmi, a to zmenou otáčok alebo zmenou objemu piestového kompresora.

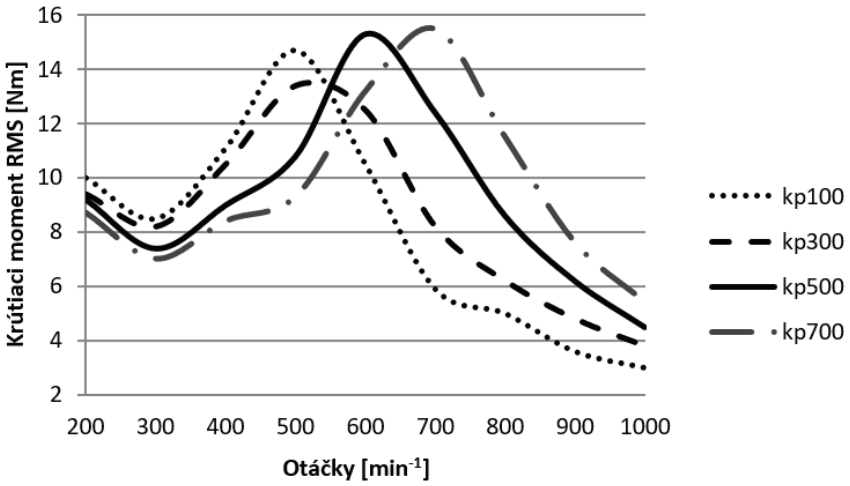
Prvá alternatíva bude označená ako otáčková variabilita mechanického pohonu piestového kompresora. Táto alternatíva si vyžaduje prechod zo súčasných mechanických systémov pracujúcich pri konštantných otáčkach na mechanické systémy pracujúce v oblasti pracovných otáčok. Zabezpečí sa tým premenlivá objemová výkonnosť v závislosti na otáčkach mechanického pohonu.

Druhú alternatívu označíme ako objemovú variabilitu mechanického pohonu piestového stroja. Táto alternatíva je založená na zmene objemu piestového stroja. V prípade

piestového kompresora je možné túto objemovú variabilitu zabezpečiť deaktiváciou valcov kompresora. Deaktivácia valcov sa vo veľkom rozsahu využíva momentálne v oblasti spaľovacích motorov [15-17]. Sprievodným javom deaktivácia valcov je zmena vibračného spektra celého pohonu.

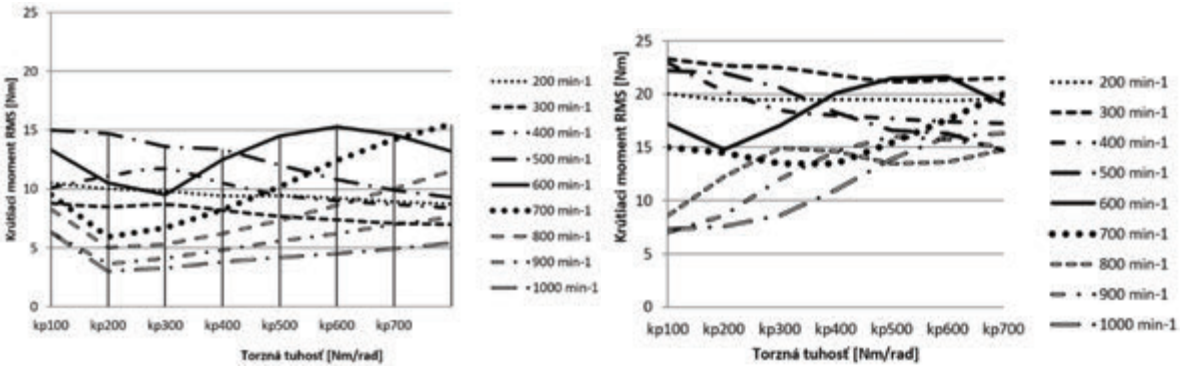
2. Výsledky a diskusia

Súčasné mechanické pohony ktoré pracujú pri konštantných otáčkach sú dynamicky navrhnuté ako nadrezonančné pohony. To znamená, že konštantné pracovné otáčky np sa nachádzajú nad rezonančnou oblasťou Obr. 2) a prechádza sa ňou pri rozbehu resp. zastavení pohonu. Na Obr. 2 je znázornená rezonančná oblasť pohonu ktorá je závislá od torznej tuhosti pružnej spojky aplikovanej v pohone. Pri aplikácií prvej alternatívy a teda použitia otáčkovej variability budú otáčky pohonu premenlivé, a skôr sa bude vyžadovať aby otáčky pohonu boli nižšie ako sú momentálne konštantné pracovné otáčky. Všetky časti mechanickej sústavy musia byť navrhnuté tak, aby pri variabilite pracovných otáčok sa nenachádzala rezonančná oblasť v blízkosti pracovných otáčok. Takéto riešenie vyžaduje výrazný zásah do dynamiky pohonu a nie je to možné dosiahnuť požitím tradičných pružných spojok alebo dvojhmotných zotrvačníkov.



Obr. 2 Zobrazenie rezonančných oblastí pohonu kompresora

Pri uplatnení druhej alternatívy je z hľadiska dynamiky mechanickej sústavy deaktivacia valcov sprevádzaná vznikom rezonancií, a to rezonancií od tzv. vedľajších harmonických zložiek ktoré majú výrazný charakter dominantných zaťažovacích amplitúd a výrazným spôsobom narastie torzné kmitanie v mechanickom systéme. Na obr.3 je porovnanie intenzity torzného kmitania pri režime všetkých pracujúcich valcov Obr. 3a) a jedného deaktivovaného valca Obr. 3b)



a) b)

Obr. 3 Torzné kmitanie pri deaktivácií valca kompresora

Záver

Z prezentovaných výsledkov vyplýva, že objemovej regulácia objemovej výkonnosti založená na dvoch alternatívach prezentovaných vyššie nieje možná s použitím bežných pružných spojok. Prvou alternatívou bola zmena otáčok kompresora a druhou alternatívou bolo variabilné vypínanie valcov kompresora. Ako je možné z výsledkov a analýzy výsledkov konštatovať, bez aktívnej zmeny torznej tuhosti nieje možné znížiť torzné vibrácie ktoré sú vyvolané objemovou reguláciou piestového kompresora. Pre prvú alternatívu práce mechanického systému pracujúceho pri zmene otáčok by bola použiteľná aj konvenčná spojka s nízkou tuhosťou. Za určitých podmienok by bola čiastočne schopná presunúť vlastnú frekvenciu a teda aj rezonančnú oblasť pod pracovný otáčkový rozsah pohonu. Takéto riešenie by však neumožňovalo pracovať mechanickej sústave v podrezonančnej oblasti.

Ako bolo preukázané meraniami, pre druhú alternatívu práce kompresora, t.j pre variabilné vypínanie valcov kompresora nieje postačujúca konvenčná spojka s nízkou torznou tuhosťou. Z prezentovaného vyplýva, že pre mechanické sústavy ktoré majú pracovať v režime charakterizovaným reguláciou objemovej výkonnosti sú vhodné len také pružné spojky pri ktorých je možná zmena torznej tuhosti počas chodu pohonu.

Poďakovanie

Článok vznikol s podporou projektu VEGA 1/0573/25, Výskum, vývoj a testovanie ladičov torzných vibrácií a projektu KEGA 037TUKE-4/2024.

Použitá literatúra:

[1] Turoń, K.; Czech, P.; Tóth, J. Safety and security aspects in shared mobility systems. Sci. J. Silesian Univ. Technol. Ser. Transp. 2019, 104, 169–175. https://doi.org/10.20858/sjsutst.2019.104.15.

[2] D. Pisarski, C. I. Bajer, B. Dyniewicz, J. M. Bajkowski, Vibration control in smart coupled beams subjected to pulse excitations., Journal of Sound and Vibration 380, (2016), pages 37-50., doi:10.1016/j.jsv.2016.05.050.

[3] Grega R., Czech P. Non-invasive vibroacoustic diagnostics of car internal combustion engines. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2024, vol. 125, p. 69-87. ISSN: 0209-3324. DOI: https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.125.5.

[4] C. Lewitzke, P. Lee, Application of Elastomeric Components for Noise and Vibration Isolation in the Automotive Industry, SAE Technical Paper 2001-01-1447, 2001, https://doi.org/10.4271/2001-01-1447.

[5] M. Li, M. Khonsari, R. Yang, Dynamics analysis of torsional vibration induced by clutch and gear set in automatic transmission, International Journal of Automotive Technology, Vol. 19, No. 3, pp. 473−488 (2018), DOI 10.1007/s12239−018−0046−8.

[6] S. J. Idehara, F. L. Flach, D. Lemes, Modeling of nonlinear torsional vibration of the automotive powertrain, Journal of Vibration and Control, (2018), Vol. 24(9) 1774–1786, DOI:10.1177/1077546316668687.

[7] L. Chen, R. Zeng and Z. Jiang, Nonlinear dynamical model of an automotive dual mass flywheel, Advances in Mechanical Engineering, (2015), Vol. 7(6) 1–11, DOI: 10.1177/1687814015589533.

[8] A. Albers Advanced Development of Dual Mass Flywheel (DMFW) Design-Noise Control for Today ' s Automobiles, Dring, (2006)

[9] Lamas Galdo, M.I.; Rodriguez García, J.D.; Rebollido Lorenzo, J.M. Numerical Model to Analyze the Physicochemical Mechanisms Involved in CO2 Absorption by an Aqueous Ammonia Droplet. Int. J. Environ. Res. Public Health 2021, 18, 4119. https://doi.org/10.3390/ijerph18084119.

[10] Kaššay P., Urbanský M., Grega R., Krajňák J., Kačír M., Žuľová L., Kuľka J. Functional prototype of pneumatic flexible shaft coupling with mechanical constant twist angle regulator. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2024, vol.125, p. 115-122. ISSN:0209-3324.DOI: https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.125.8.24.

[11] Czech, P.; Turoń, K.; Barcik, J. Autonomous vehicles: Basic issues. Sci. J. Sil. Univ. Technol. Ser. Transp. 2018, 100, 15–22. https://doi.org/10.20858/sjsutst.2018.100.2.

[12] Haris, A.; Motato, E.; Theodossiades, S.; Rahnejat, H.; Kelly, P. A study on torsional vibration attenuation in automotive drivetrains using absorbers with smooth and non-smooth nonlinearities. Appl. Math. Model. 2016, 46, 674–690.

[13] Haris, A.; Motato, E.; Mohammadpour, M.; Theodossiades, S.; Rahnejat, H. On the effect of multiple parallel nonlinear ab-sorbers in palliation of torsional response of automotive drivetrain. Int. J. Non Linear Mech. 2017, 96, 22–35.

[14] Motato, E.; Haris, A.; Theodossiades, S.; Mohammadpour, M.; Rahnejat, H. Targeted energy transfer and modal energy redistribution in automotive drivetrains. Nonlinear Dyn. 2017, 87, 169–190.

[15] Zink, M.; Hausner, M. The Centrifugal Pendulum-type Absorber Application, Performance and Limits of Speed-adaptive Absorbers, 2009 , ATZ 07-08, Volume 111. Zink, M., Hausner, M. The centrifugal pendulum-type absorber, (2009), ATZ Worldw 111, 42–47., https://doi.org/10.1007/BF03225088,

[16] Manchi, V.; Sujatha, C. Torsional vibration reduction of rotating shafts for multiple orders using centrifugal double pendulum vibration absorber. Appl. Acoust. 2021, 174, 107768. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107768.

[17] Berbyuk, V. Weight-Vibration Pareto Optimization of a Triple Mass Flywheel for Heavy-Duty Truck Powertrains. Machines 2020, 8, 50. https://doi.org/10.3390/machines8030050.

Autor(i):

Ing. Lucia Žuľová, PhD.
odborná asistentka
Technická univerzita v Košiciach , Strojnícka fakulta
Letná 1/9, 042 00 Košice
Tel.: +421 55 602 2354 E-mail: lucia.zulova@tuke.sk

prof. Ing. Robert Grega, PhD.
profesor
Technická univerzita v Košiciach , Strojnícka fakulta
Letná 1/9, 042 00 Košice
Tel.: +421 55 602 2524 E-mail: robert.grega@tuke.sk

Ing. Jozef Krajňák, PhD.
odborný asistent
Technická univerzita v Košiciach , Strojnícka fakulta
Letná 1/9, 042 00 Košice
Tel.: +421 55 602 2373 E-mail: jozef.krajnak@tuke.sk

Ing. Matej Urbanský, PhD.
odborný asistent
Technická univerzita v Košiciach , Strojnícka fakulta
Letná 1/9, 042 00 Košice
Tel.: +421 55 602 2367 E-mail: matej.urbansky@tuke.sk


ATD SR
Asociácia technických diagnostikov Slovenskej republiky
AKREDITOVANÉ KURZY
Certifikačný orgán pre certifikáciu personálu v technickej diagnostike
Rozsah akreditácie podľa rozhodnutia č. 139/11258/2024/I zo dňa 16.07.2024
VZDELÁVANIE A CERTIFIKÁCIA ODBORNÍKOV PRE TECHNICKÚ DIAGNOSTIKU
Akreditovaná osoba: Asociácia technických diagnostikov Slovenskej republiky
Technická univerzita v Košiciach, Letná 1/9, 042 00 Košice
Identifikačné číslo akreditovanej osoby 139/O-007
Miesto výkonu činnosti
Technická univerzita, Strojnícka fakulta, Letná 1/9, 042 00 Košice
Akreditácia
Rozsah akreditácie k osvedčeniu
VIBRODIAGNOSTIK
Stupeň I, II, III, IV
Certifikačná schéma
COP - 01 - 07
ISO 18436-2: 2023
INFRAČERVENÝ DIAGNOSTIK
Stupeň I, II, III
Certifikačná schéma
COP - 02 - 07
ISO 18436 - 7: 2014
TRIBOTECHNIK TRIBODIAGNOSTIK
Stupeň I, II, III
Certifikačná schéma
COP - 03 - 10
ISO 18436-4: 2014
ISO 18436-5: 2012
Pre koho sú kurzy vhodné
• Pracovníci údržby, diagnostiky a spoľahlivosti technických systémov
• Vibrodiagnostici a špecialisti infračervenej diagnostiky
• Odborníci, ktorí potrebujú preukázať kvalifikáciu podľa príslušných certifikačných schém

Konferencia DIS – „Teória a aplikácia metód technickej diagnostiky“ sa uskutočňuje za priamej podpory ZSVTS

PARTNERI KONFERENCIE



https://dis.lf.tuke.sk/

Poznámky:

Poznámky:

Poznámky:

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH

VÝZVA PRE TVOJU BUDÚCNOSŤ

Letná 1/9
042 00 Košice - Sever
tel.: +421 55 602 25 01

www.tuke.sk

ISSN 1337-8252