

DIAGNOSTIKA V PRAXI

Dušan GERLACHOVSKÝ

Anotácia

Technická diagnostika je trvalou súčasťou manažmentu strojného zariadenia vo väčšine podnikov, od tej jednoduchšej až po metódy strojového učenia. V článku je popísaná technická diagnostika v podniku SLOVNAFT, a.s., od vibračnej diagnostiky až po použitie metód strojového učenia na dvoch príkladoch z praxe.

Kľúčové slová: technická diagnostika, strojové učenie, AspenTech, MTELL

SLOVNAFT, a.s.

SLOVNAFT, a.s., patrí medzi kľúčové energetické spoločnosti na Slovensku. Je lídrom na domácom trhu s motorovými palivami a jedným z najvýznamnejších exportérov. Slovnaft sa hlási k princípom trvalo udržateľného rozvoja, podporuje vzdelanie, umenie, kultúru, šport a ochranu životného prostredia. Je členom medzinárodnej Skupiny MOL – poprednej ropnej a plynárenskej spoločnosti v strednej a východnej Európe.

V chemickom podniku takejto veľkosti sa nachádza veľké množstvo zariadení, či už statických alebo rotačných. Vedomosť o ich stave je veľmi dôležitá nielen z pohľadu ekonomického, ale aj z pohľadu starostlivosti o bezpečnosť a zdravie v podniku i životného prostredia v širšom okolí. A v tomto smere je technická diagnostika veľmi dôležitou zložkou.

V SLOVNAFT, a.s., je technická diagnostika zabezpečovaná cez dcérsku spoločnosť SLOVNAFT MONTÁŽE A OPRAVY, a.s., buď priamym výkonom, alebo subdodávateľmi v prípade špecializovaných spôsobov technickej diagnostiky. Podstatná časť je sústredená v oddelení Monitorovanie stavu strojov & BigData.

Oddelenie Monitorovanie stavu zariadení & BigData

Oddelenie v súčasnosti má 12 pracovníkov a zaoberá sa vibrodiagnostikou on-line aj off-line, údržbou hardware Bently Nevada v podniku, termodiagnostikou, videoendoskopiou, tribodiagnostikou a aplikáciou strojového učenia v oblasti diagnostiky strojného zariadenia.

Historicky najstaršou činnosťou bola vibrodiagnostika, ktorá sa začala používať už začiatkom sedemdesiatych rokov, kedy boli zaobstarané prvé prenosné meracie prístroje. Tieto prístroje sú stále uchovávané v našom „súkromnom minimúzeu“ a dokladujú vývoj techniky v tejto oblasti.



Obr. č. 1 : Ukážka historických prístrojov na meranie vibrácií

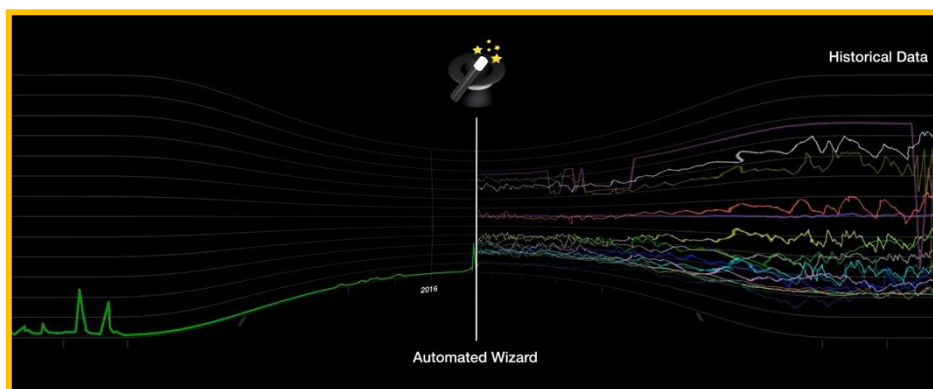
Všetky spomenuté metódy technickej diagnostiky je už možno považovať za štandardné a všeobecne bežne používané. SLOVNAFT, a.s., bol ale vždy na úrovni doby a v tomto trende chceme pokračovať. Preto na úrovni Skupiny MOL bolo rozhodnuté o postupnej aplikácii najmodernejších poznatkov v oblasti strojového učenia, resp. umelej inteligencie do oblasti technickej diagnostiky.

AspenTech – Machine Intelligence (MTELL)

Spoločnosť AspenTech bola založená v roku 1981 a vznikla v rámci spoločného výskumného projektu medzi Massachusetts Institute of Technology (MIT) a americkým ministerstvom energetiky – projekt Advanced System for Process Engineering (ASPEN) (Pokročilý systém pre procesné inžinierstvo). [1]

V súčasnosti so svojimi produktami, ktoré sú zamerané na procesné inžinierstvo, výrobu a zásobovanie a optimalizáciu výkonu, pôsobia najmä v oblastiach, ako ropný priemysel, baníctvo, preprava a farmaceutický priemysel. [2]

Medzi produktami AspenTechu je aj produkt MTELL. Jedným z jeho cieľov a možností je sledovať a upozorniť na odchýlky od štandardného procesu a predikcia nadchádzajúcej poruchy. Avšak to len za podmienky, že sa už takáto porucha alebo havária stala aspoň raz v minulosti. Pomocou metód strojového učenia dokáže systém MTELL spracovať obrovské množstvo dát z meraní. Zjednodušene povedané – spracuje ľubovoľný počet online meraní a hodnôt, kde nie je nutné, aby boli veličiny od seba úmerné alebo závislé a preklolí ich do jednej krivky pravdepodobnosti (obr. č. 2).



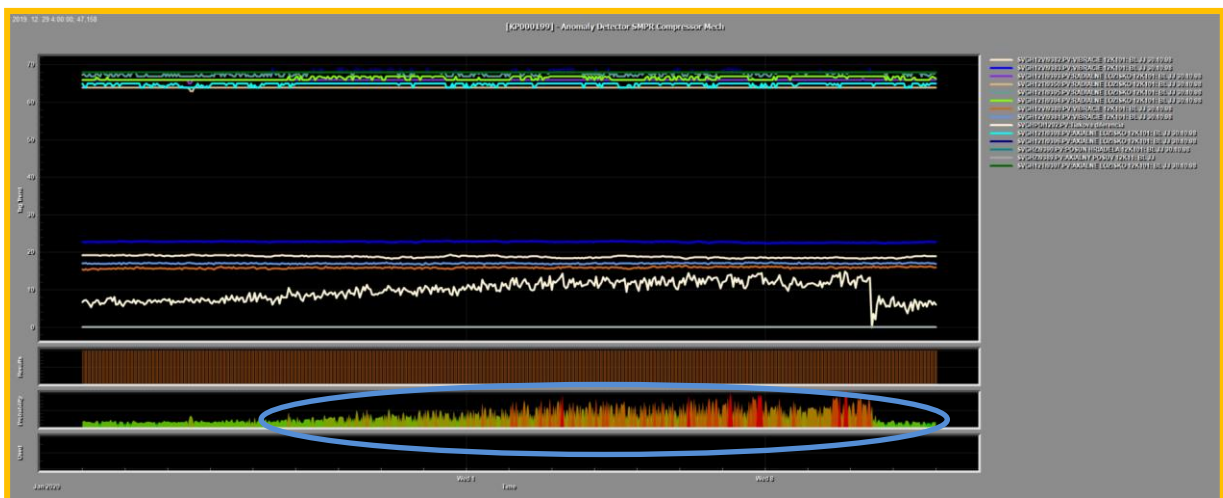
Obr. č. 2 – krivka pravdepodobnosti (ilustračný obrázok)

Systém MTELL potom, pomocou nástrojov nazývaných „agenti“, sleduje a rozpoznáva v trende niekoľko vzorov v aktuálnom čase, ktoré vykazujú normálne alebo aj chybové správanie zariadenia. Poruchovej, respektíve havarijnej udalosti predchádza vývin parametrov a trendov s predstihom niekoľko dní, aj mesiacov. Program, pomocou algoritmu, vie takýto vývin predpovedať a včas naň prostredníctvom agenta upozorniť.

Agent je komponent softvéru, ktorého úlohou je včas upozorniť na blížiacu sa poruchu, prípadne odchýlky od prevádzkových parametrov. Na toto slúži tzv. Anomaly Agent (agent anomálie) a Failure Agent (agent zlyhania). Každý agent umožňuje nakombinovať ľubovoľný počet snímačov z rôznych zariadení, napr. nádrže, čerpadlá, pomocné systémy (mazanie, chladenie), pričom nie je podmienkou, že všetky snímače musia byť na konkrétnom sledovanom zariadení.

Anomaly Agent

Je to základný typ agenta, ktorého úlohou je sledovanie odchýlok v prevádzkovaní zariadenia. Pri kompresoroch to môže byť napr. skupina, resp. agent, ktorý sleduje chod motora, ale napr. aj jednotlivé stupne viacstupňového kompresora samostatne. Pred nasadením agenta je potrebné ho natrénovať a naučiť, čo si má všímať, čo má považovať za normálne prevádzkové hodnoty a naopak – aké hodnoty sú alarmové, ale aj ako vyzerá režim, kedy zaradenie nie je v prevádzke. Po natréňovaní na normálny prevádzkový stav sa nastaví tolerancia na jeho odchýlku. V prípade, že sa tento prah dosiahne – posiela upozornenie, že niečo nie je v poriadku.



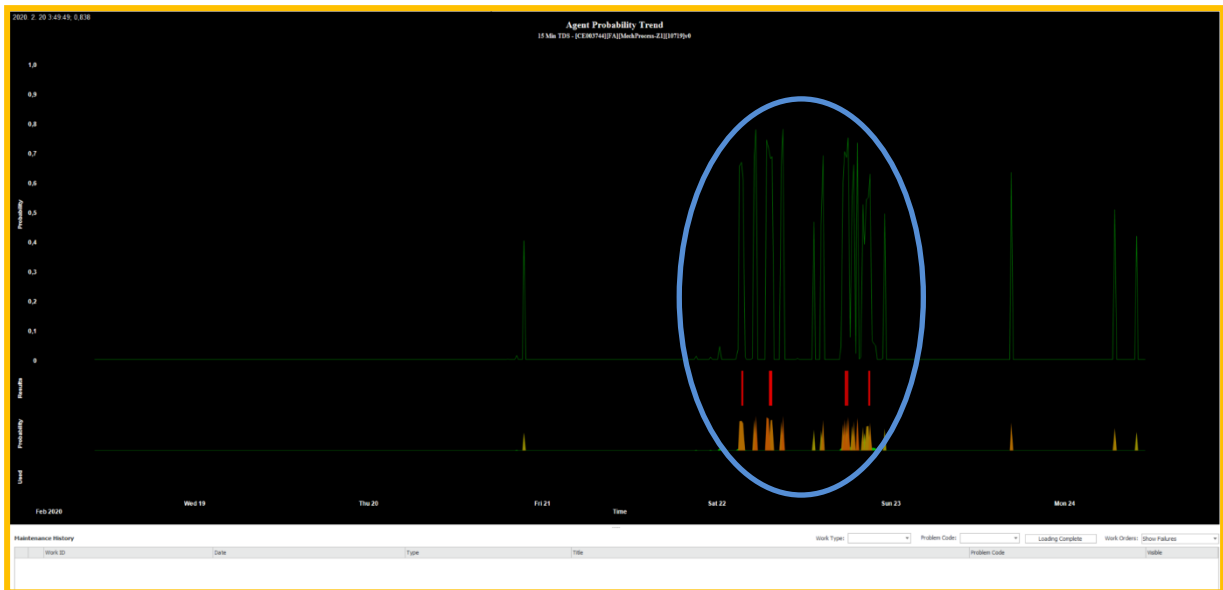
Obr. č. 3 – Upozornenie na nárast tlakovej diferencie na site kompresora

Failure Agent

Tento typ agenta je presne trénovaný na konkrétne zlyhanie zariadenia. Logika jeho tvorby je rovnaká ako tvorba Anomaly agenta. No úlohou takéhoto agenta je predpovedať prípadnú poruchu alebo haváriu.

Ako bolo spomenuté, týmto prípadom predchádza špecifický vývin, teda vzorec v parametroch a ich hodnotách. Agent potom v trendoch hľadá len tento konkrétny vzorec. Pomocou algoritmov sa snaží takýto vzorec predvídať. Záleží aj na type poruchy. Pokiaľ ide o klasickú mechanickú poruchu – je

možné ju predpovedať oveľa skôr ako poruchy, ktorých vývoj je nárazový (napríklad znečistenie ventilov piestového kompresora).



Obr. č. 4 – Krivka pravdepodobnosti poruchy upchávky

Nevýhodou tohto Failure agenta je, že porucha, na ktorú chceme dostať upozornenie, respektíve predpoveď, sa musí stať aspoň raz. Je to žiaľ nevyhnutné, aby sa na takýchto dátach mohol agent trénovať.

Príklady aplikácie MTELL

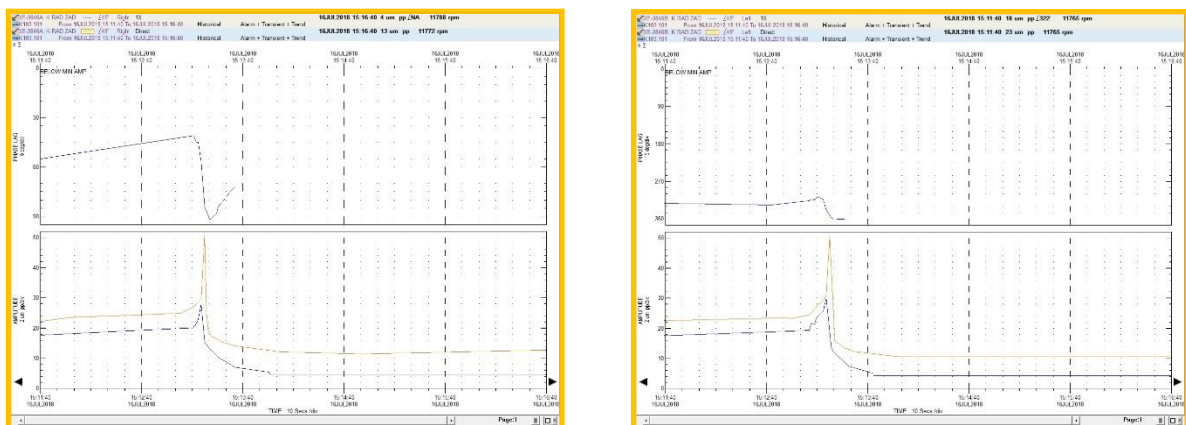
Príklad prvý - udalosti na kompresore

Zariadenie je kompresor recyklového plynu, ktorý stláča a dopravuje vodíkový plyn v jednom kompresnom stupni z vysokotlakového separátora do reakčnej časti výrobnjej jednotky, čím zabezpečuje využitie nezreagovaného vodíka v procese hydrokrakovania. Odstredivý turbokompresor výrobcu Nuovo Pignone je barelového typu s radiálne deleným telesom, s piatimi obežnými kolesami menovitého priemeru 300 mm. Kompresor je poháňaný protitlakovou parnou turbínou, taktiež od výrobcu Nuovo Pignone, s výkonom 3MW, ktorá je spojená s kompresorom zubovou spojkou firmy RENK. Stroje sú namontované na spoločnej základovej doske. Točivý pohyb turbíny zabezpečuje vysokotlaková 3,5 MPa(g) para, ktorá v telese turbíny expanduje na tlak cca 0,4 MPa(g). Otáčky turbíny sú riadené mechanickým governorom Woodward typu PG/PL.

Dňa 16.7.2018 o 15:13 hod. bola spozorovaná mimoriadna udalosť, keď za krátkeho kvílivého zvuku v kompresore nastala skoková zmena v prietoku a zmena tlakových pomerov. Zároveň došlo k zakolísaniu otáčok na kompresore. Skokovú zmenu prevádzkových parametrov sa podarilo zachytiť a systém vyregulovať bez nutnosti obmedzenia chodu výrobnjej jednotky. Následne po udalosti bola zistená pretrvávajúca strata upchávkového oleja v množstve cca 150 litrov/12 hodín, ktorú až do odstavenia kompresora sa nepodarilo eliminovať a zistiť príčinu. K zisteniu príčin neštandardného chodu kompresora boli vykonané analýzy procesných dát technologického uzla kompresora, ktoré nenasvedčovali problém v technológii. Boli taktiež viackrát preverené parametre cirkulačného plynu

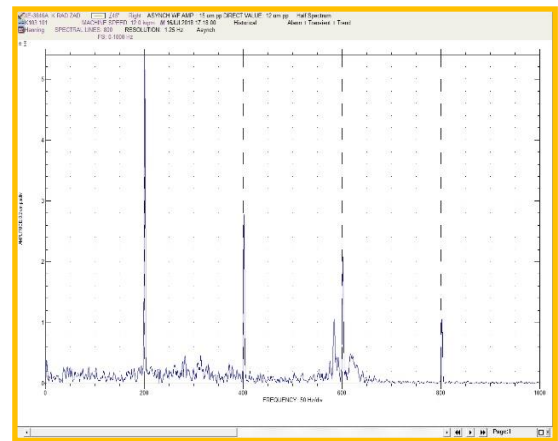
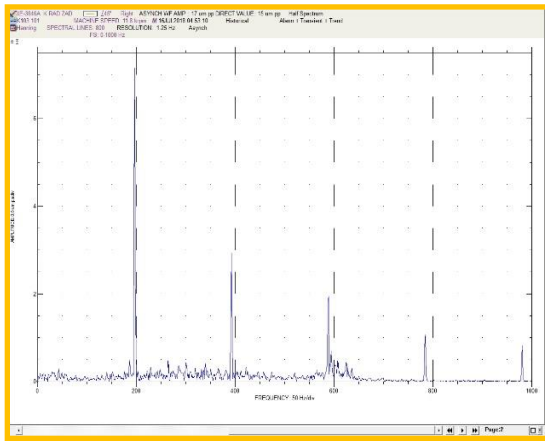
analýzou, či prípadne nedošlo k zmene objemovej hmotnosti plynu, a tým k zmene procesných parametrov. Všetky procesné dáta a veličiny boli opätovne posúdené a preverená ich správnosť. Z dôvodu straty upchávkového oleja bola preverená aj funkčnosť upchávkového systému a kontrola funkčnosti olejových odlučovačov, ako aj vizuálna kontrola celého sústrojenstva.

Nakoľko je kompresor vybavený komplexným diagnostickým systémom Bently Nevada – System1, mechanický chod a stav kompresora bol preverený samozrejme aj diagnostickou kontrolou, na základe ktorej sústrojenstvo kompresora nevykazovalo známky anomálií a z pohľadu relatívnych vibrácií mohlo byť naďalej štandardne prevádzkované. Aj napriek ustáleným trendom vibrácií, ktoré boli v norme, kompresor nedosahoval optimálne výkonové parametre, ktoré ale na druhej strane nepredstavovali podstatné obmedzenia pre chod výrobnjej jednotky. Z tohto dôvodu bolo zástupcami prevádzky a údržby rozhodnuté vo výrobe pokračovať, no s obmedzeniami v prevádzkovaní a so zvýšenou monitorovacou aktivitou. Stále však pretrvávali vážne podozrenia na poškodenie stroja, ktoré sa neskôr aj potvrdili. Z hľadiska vibrodiagnostiky turbosústrojenstvo bolo od predchádzajúcej generálnej revízie v roku 2017 prevádzkované s ustáleným trendom všetkých sledovaných vibračných parametrov. Pričom merané hodnoty relatívnych vibrácií vo všetkých radiálnych smeroch sa pohybovali pri nefiltrovaných vibráciách do 25 μm , a to všetko pri výrobcom stanovených hraniciach 80 μm pre Výstrahu a 130 μm pre Nebezpečenstvo.



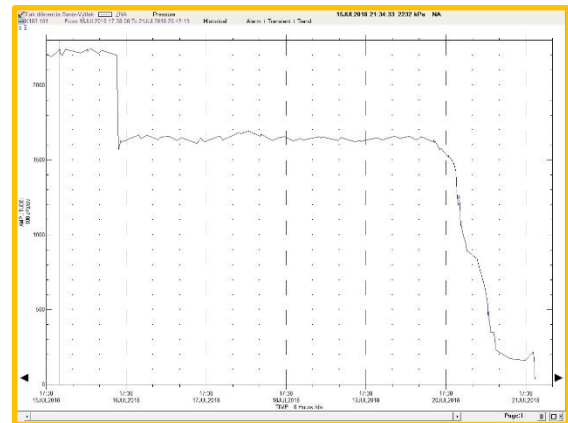
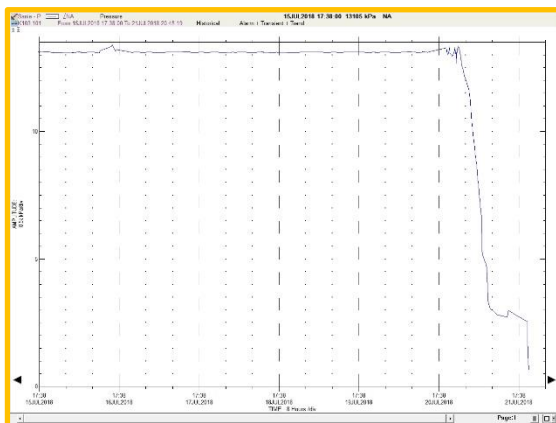
Obr. č. 5 : Radiálne vibrácie na voľnom konci kompresora v čase udalosti

Po zaznamenaní neštandardnej udalosti vibrodiagnostici ihneď vykonali analýzu zaznamenaných údajov. Jedno z prvých zistení bolo, že počas udalosti neboli dosiahnuté žiadne prednastavené alarmové hodnoty. Z toho dôvodu diagnostický systém vykonával iba sekvenčné ukladanie meraných údajov, a tak nedošlo k zaznamenaní údajov uložených v medzipamäti, ani k následnému ukladaniu podrobných meraní. To znamená, že v čase udalosti sa zaznamenávali iba celkové trendové hodnoty. Podrobnejšie údaje (spektrá, orbity a pod.) boli zaznamenané iba s odstupom niekoľkých hodín pred a po udalosti.



Obr. č. 6 : Frekvenčné spektrum na voľnom konci pred (vľavo) a po (vpravo) udalosti

Podrobná analýza naznačila, že síce vibrácie v čase udalosti krátkodobo významne vzrástli zhruba na štvornásobok (hlavne celkové vibrácie), no nedosiahli žiadnu definovanú alarmovú hodnotu a po udalosti sa amplitúdy vibrácií pomerne rýchlo vrátili na porovnateľné hodnoty s hodnotami pred udalosťou a zariadenie sa vrátilo k prevádzke pri nízkych vibráciách. Trvalo sa zmenili iba prevádzkové parametre – hlavne pokles tlakovej diferencie. Na základe týchto údajov bola vyslovená domnienka, že na kompresore došlo k strate integrity na jednom z obežných kolies.



Obr. č. 7: Tlak na saní kompresora a tlaková diferencia na kompresore

Dňa 20.7.2018 bola odstavená jednotka Hydrokrak. Hlavným dôvodom odstavenia boli netesnosti na inom technologickom zariadení. Súčasne s opravou tohto zariadenia sa pristúpilo k inšpekcii kompresora, ktorej prvotným cieľom bolo zistenie dôvodu netesnosti olejových upchávok. Výsledkom inšpekcie však bolo potvrdenie straty integrity 1. obežného kolesa, spolu so stratou integrity 1. medzisteny, a tým aj nutnosť väčšej opravy.

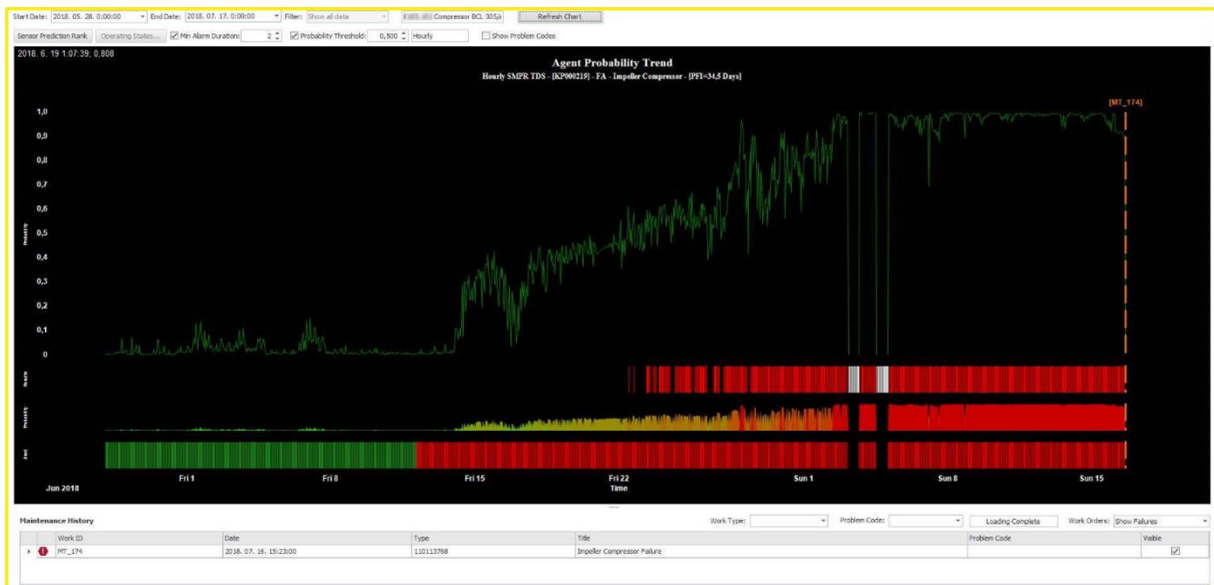


Obr. č. 8: Zaznamenané poškodenia na komponentoch kompresora

Pri pohľade iba z hľadiska klasickej vibrodiagnostiky sa zdá, že i keď je zariadenie osadené monitorovacím a diagnostickým systémom na vysokej úrovni, aj napriek tomu môže vzniknúť poškodenie vedúce k deštrukcii častí kompresora bez predchádzajúcej signalizácie.

Ale zavedenie diagnostiky na základe strojového učenia naznačuje zmenu. Keďže to bola havária so značným ekonomickým dopadom, tak tento kompresor bol jedným z prvých zariadení, na ktoré bol v podniku systém strojového učenia nasadený. Po spracovaní všetkých potrebných vstupných údajov sa pristúpilo k vytvoreniu Failure agenta pre tento typ poruchy, jeho trénovaniu a dostupné údaje sa nechali spracovať systémom strojového učenia.

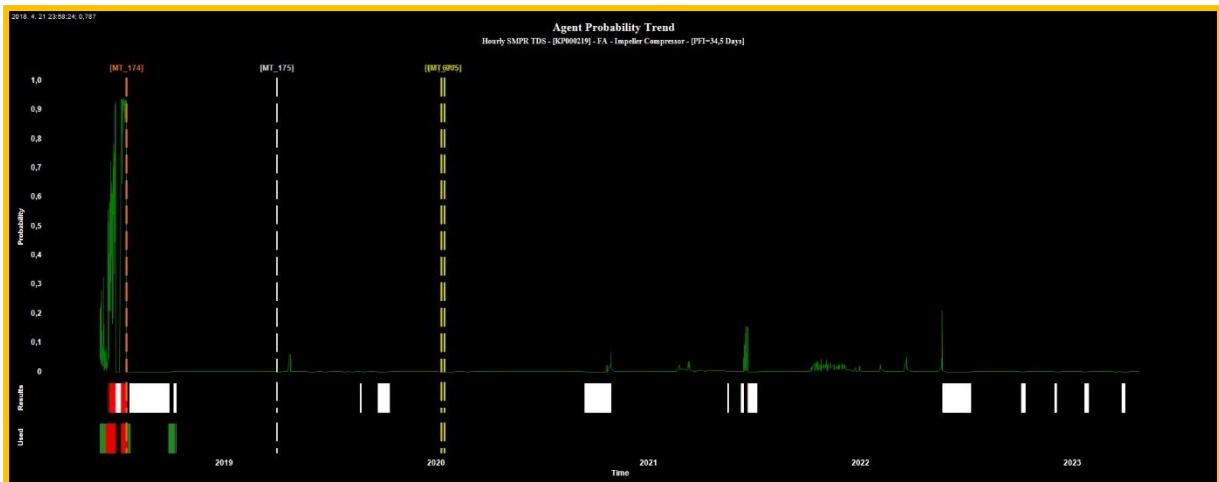
Na nasledujúcom obrázku je zobrazený priebeh krivky pravdepodobnosti pre poruchu straty integrity obežného kola 1. stupňa.



Obr. č. 9: Priebeh pravdepodobnosti pre poruchu straty integrity obežného kola 1. stupňa

Ako je vidno, tak krivka pravdepodobnosti dosiahla hodnoty okolo 100 % už cca. 14 dní pred udalosťou a alarmovanie bolo cca. 20 dní vopred.

Keďže obmedzenie tejto metódy je v skutočnosti, že sledovaná udalosť sa musí aspoň raz vyskytnúť, tak nás zaujíma situácia po oprave. Na nasledovnom obrázku je krivka pravdepodobnosti od spustenia do prevádzky po oprave až do súčasnosti.



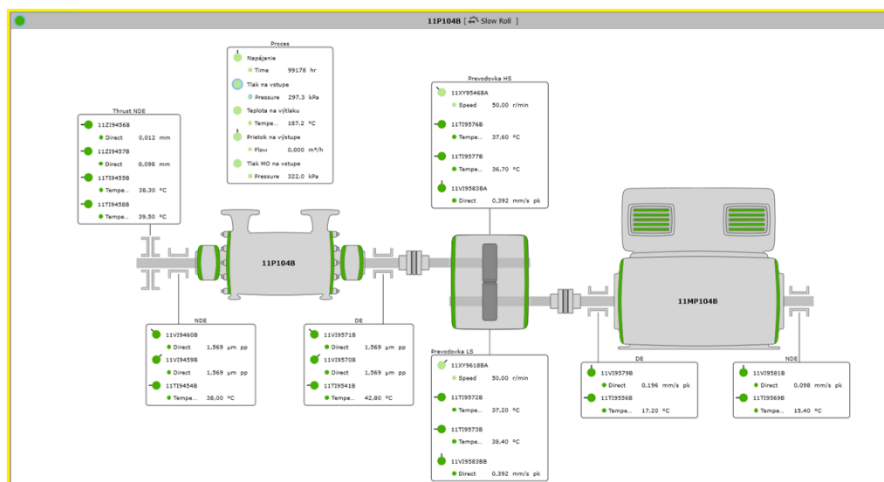
Obr. č. 10: Priebeh pravdepodobnosti pre túto poruchu po spustení do prevádzky

Je zrejmé, že od spustenia sme nezaznamenali prakticky žiadnu pravdepodobnosť výskytu tejto poruchy. Čo nás samozrejme teší.

Príklad druhý – poškodenie upchávky na veľkom čerpadle

V tomto príklade ide o tri nástrekové čerpadlá na prevádzke Hydrokrakovanie ťažkých zvyškov, ktoré zabezpečujú nástrek média (vákuového zvyšku) do reaktorov. Výrobcom je firma Ingersoll Dresser a sú barelového typu s vodorovnou deliacou rovinou a radiálne deleným vonkajším telesom. Každé čerpadlo ma 10 stupňov. Cez mechanickú spojku Metastream ich poháňa buď elektromotor s výkonom 1,35 MW cez prevodovku alebo turbína s výkonom 1,255 MW. Čerpadlá sú vyhotovené podľa normy API 610 a dopravujú médium o nominálnej teplote 280 °C.

Nakoľko ide o kritické zariadenia pre chod prevádzky, sú aj tieto čerpadlá vybavené trvalo nainštalovaným monitorovacím systémom Bently Nevada System1.



Obr. č. 11: Základná obrazovka monitorovacieho systému BN System1 pre nástrekové čerpadlo

Údaje o vibráciách, získané cez on-line monitorovací systém, umožňujú spoľahlivo predpovedať výskyt porúch ako nevývaha (zanášanie obežných kolies), nesúososť či poškodenia ložísk. No pomerne častou poruchou je zlyhanie mechanických upchávok. Táto porucha sa ale zjavne zväčšenými vibráciami prejavuje až pri veľmi rozvinutej poruche, keď v dôsledku znečistenia už dochádza k veľkej netesnosti a znečisteniu upchávok.

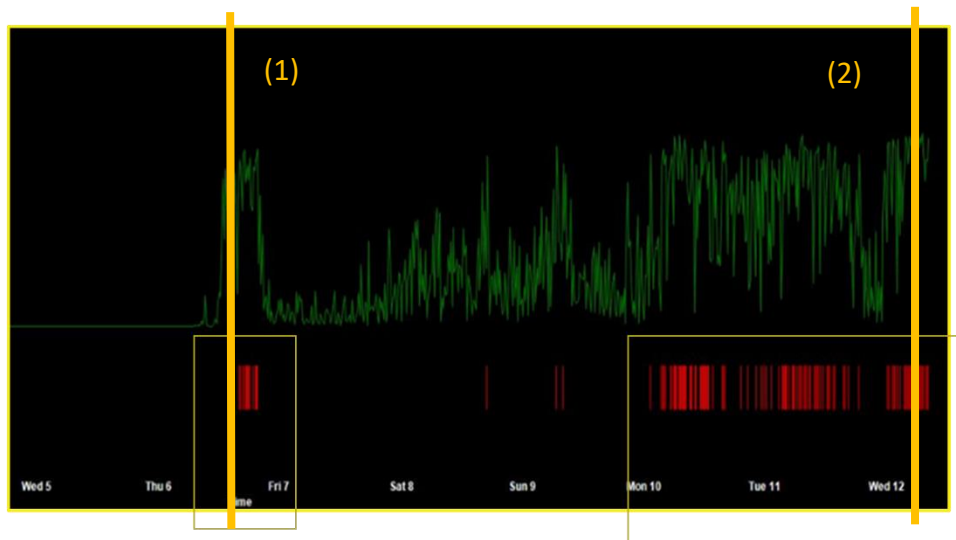


Obr. č. 10: Príklad znečistených mechanických upchávok z tohto čerpadla

Keďže ide o kritické zariadenia, aj na tieto zariadenia bol nasadený systém MTELL. Pričom jedným z nasadených agentov je aj Failure agent na poškodenie mechanickej upchávky.

Pretože podmienkou pre natrénovanie Failure agenta je, aby daná porucha, ktorá by mala byť predikovaná, sa stala aspoň raz, tak boli využité údaje zaznamenané pred poruchou upchávky začiatkom roku 2020. Vtedy systém zaznamenal vývoj jednotlivých trendov pred poruchou. Následne sa pomocou rôznych algoritmov spustila predikcia pre túto poruchu – Failure agent.

Na obrázku č. 11 je zobrazená krivka pravdepodobnosti ako výstup z tohto agenta pre zlyhanie upchávky. Je vidno, že prvý alarm prišiel 6.8.2020 okolo 16:00. Tento alarm je možné interpretovať v zmysle, že zaznamenané trendy jednotlivých veličín, po matematickom spracovaní, naznačujú pravdepodobnosť zlyhania upchávky nad 40 % (1). Na grafe je dosiahnutie hodnoty pre alertovanie zobrazené červenou čiarou v spodnej časti grafu pod zobrazením krivky pravdepodobnosti. A 12.8.2020 vonkajší operátor zaznamenal únik média cez upchávku čerpadla (2), čím bola potvrdená predikcia tohto agenta.



Obr. č. 12: Zobrazenie trendu pravdepodobnosti pre zlyhanie upchávkvy

Záver

Postupný rozvoj používania princípov umelej inteligencie a strojového učenia v rôznych ekonomických, technických a lekárskech oblastiach prináša stále viac poznatkov o možnostiach, ale aj obmedzeniach tejto technológie.

Oblasť diagnostiky strojného zariadenia pomocou princípov strojového učenia v priemyselných podnikoch je ďalšou perspektívnou metódou k už zavedeným diagnostickým metódam, čo môže významne zvýšiť spoľahlivosť a bezpečnosť prevádzkovania priemyselného zariadenia.

Použitá literatúra:

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Aspen_Technology
- [2] <https://www.aspentech.com/en/resources/video/introduction-to-aspen-mtell>

Autor:

Ing. Dušan Gerlachovský
 Vedúci oddelenia
 SLOVNAFT MONTÁŽE A OPRAVY a.s.
 Vlčie hrdlo 1
 820 03 Bratislava 23
 Tel.: +421 917 921124

E-mail: dusan.gerlachovsky@mao.slovnaft.sk

