



ZAJIŠTĚNOST ÚDRŽBY V KONCEPCI PRŮMYSL 4.0

Materiály ze 72. semináře Odborné skupiny pro spolehlivost,
konaného dne 11. 9. 2018 v Praze

Česká společnost pro jakost, Novotného lávka 5, 110 00 Praha 1, www.csq.cz
© ČSJ 2018

OBSAH

Management a inženýrství Údržby 4.0 výrobního zařízení <i>Prof. Ing. Václav Legát, DrSc.</i>	3
Koncepce prediktivní údržby – aplikace na automobilech <i>Doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.</i>	16
Analýza provozních parametrů – vstup pro optimalizaci preventivní údržby výrobního zařízení <i>Doc. Ing. Zdeněk Aleš, Ph.D.</i>	25

Management a inženýrství Údržby 4.0 výrobního zařízení

Václav Legát

Výzva Průmysl 4.0 a její transformace do konceptu Údržba 4.0 dělá zodpovědným manažerům údržby mnoho vrásek na čele. Jde nikoliv o revoluční, ale evoluční proces změn v managementu a inženýrství údržby. Podstata údržby výrobního zařízení se nemění. Mění se zejména informační systém údržby, který umožňuje sofistikovanější řízení údržby, objektivnější rozhodování o potřebě a době provedení údržby, o častější a zdůvodněné provádění prediktivní údržby, lepší tvorbu programů údržby, řízení zásob náhradních dílů apod. s cílem dále zvyšovat produktivitu údržby, zvyšovat pohotovost výrobního zařízení při optimálních nákladech na údržbu. Ruce na provádění údržby mechanických systémů budou pořád potřeba. Výrobci snad urychlí konstrukci a výrobu chytrých strojů, údržbáři na modernizaci sami nestačí. Tvorba Údržby 4.0 bude potřebovat bezesporu finanční zdroje. Obávám se, že bez státní podpory projektů pro rozvoj Údržby 4.0 pod koncepcí výzvy Průmysl 4.0 podniky samy nezvládnou.

1. Úvod

Mnoho manažerů údržby si dnes klade otázku, kam se údržba ubírá a jak bude vypadat v blízké i vzdálenější budoucnosti. V současné době se na nás valí čtvrtá průmyslová revoluce, jejíž aspekty jsou popsány již v mnoha publikacích, např. [1, 2], zpravidla pod názvem Průmysl 4.0. Jako pozitivní lze označit, že i vláda ČR se hlásí k této výzvě a snad přijde i nezbytná finanční podpora formou grantů aplikačnímu výzkumu a jiných aktivit. Je pravda, že uvedené publikace [1, 2] neřeší samostatně management a inženýrství údržby a pohybují se v rovině průmyslu jako celku.

Nicméně Česká společnost pro údržbu (ČSPÚ) šíří osvětu aplikování myšlenek Průmyslu 4.0 do údržby ve všech vzdělávacích aktivitách od roku 2016, jak ve svých kurzech, tak i seminářích a konferencích – viz sborníky [3, 4, 5, 6, 7].

Cílem tohoto příspěvku je vypracování studie očekávaného vývoje managementu a inženýrství údržby v nejbližší budoucnosti a ve světle výzvy Průmysl 4.0.

2. Údržba a zajištění údržby

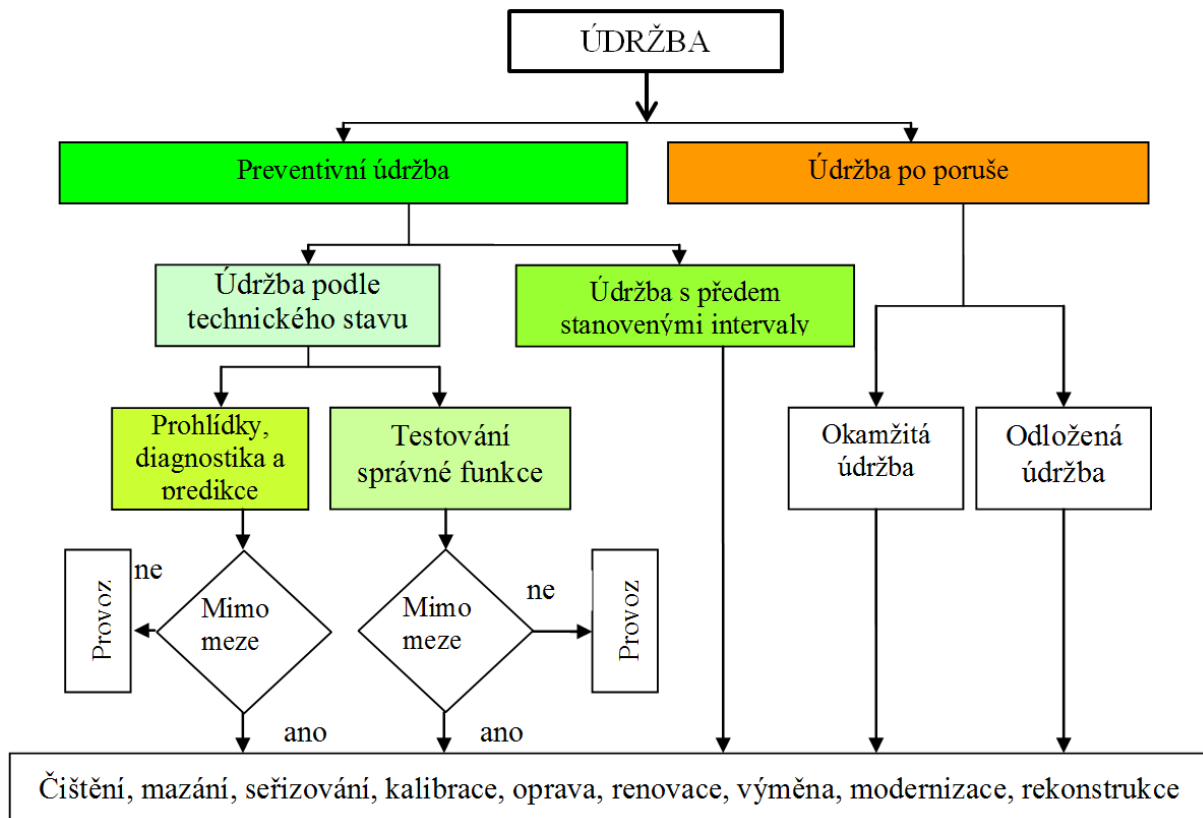
Podmínky pro údržbu výrobních zařízení bude čím dál více zlepšovat jejich výrobce tím, že se více než dosud zaměří na jejich bezporuchovost, udržitelnost a některé aspekty, nebo na celou zajištěnost údržby. Bude také mnohem více sledovat provozní spolehlivost v celém životním cyklu zařízení, tj. od koncepce a stanovení požadavků, návrh a vývoj, přes výrobu, instalaci, provoz a údržbu až po vypořádání.

Pokud jde o zajištění údržby interními a externími zdroji (insourcing a outsourcing) bude mnohem citlivěji vyvažován jejich poměr podle zásady, které procesy udělám interně kvalitněji, levněji a s celoročně vytíženými vlastními údržbáři, budou zajišťovány insourcinglem a procesy, které budou vykonány externě ještě s vyšší kvalitou, ještě levněji a v nichž by nebyly využity interní kapacity na 100 %, ty budou zajišťovány outsourcingem. Lze říci, že údržba výrobního zařízení bude i nadále ve většině případů zajišťována vyváženým smíšeným způsobem obou zdrojů údržeb.

Nepředpokládám, že by se měnila definice údržby, jako *kombinace všech technických a administrativních činností, včetně činností dozoru, zamýšlených k udržení objektu ve stavu, ve kterém provádí požadovanou funkci, nebo k obnově toho stavu.*

Manažeri údržby budou muset věnovat mnohem větší pozornost **politice údržby**, která *vymezuje obecný přístup pro poskytování údržby a zajištění údržby na základě cílů a politik vlastníků, uživatelů a zákazníků v průběhu celého životního cyklu objektu.*

Nelze očekávat, že se změní typy údržbářských úkolů na obr. 1, pouze se přesune význam na údržbu preventivní a zejména pak podle technického stavu (diagnostickou údržbu) a prediktivní (předpovídanou) údržbu – obr. 2



Obr. 1 Typy údržbářských úkolů



Obr. 2 Systém údržeb

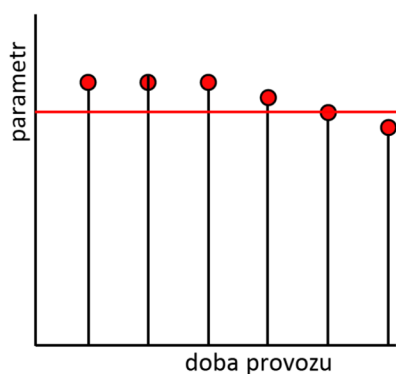
Stále je třeba připomínat normovanou terminologii [8], zejména pokud jde o systémy (typy) údržeb, neboť v praxi je používána různá hantýrka.

Údržba po poruše - údržba prováděná **po zjištění poruchového stavu** a zaměřená na uvedení objektu do stavu, ve kterém může vykonávat požadovanou funkci.

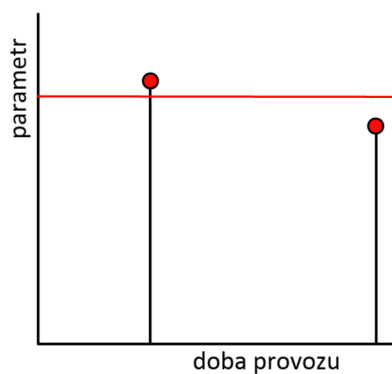
Údržba s předem stanovenými intervaly (periodická údržba) - **preventivní** údržba prováděná v souladu se stanovenými **časovými intervaly** nebo stanoveným **počtem jednotek používání** (Usage Based Maintenance, mth, km, tkm, počet cyklů, m³ spotřebovaného paliva aj.), avšak **bez předchozího zjišťování stavu objektu**.

Údržba podle technického stavu (diagnostická údržba) je preventivní údržba, která se skládá z **monitorování** výkonnosti a/nebo parametrů a z **následných opatření**. Monitorování je plánováno v pravidelných intervalech (obr. 3) a rozhodování o dalším provozu je prováděno **dvoustavově** (vyhovuje – nevyhovuje) vůči stanovenému meznímu stavu pro obnovu a **neobsahuje informaci o dispoziční době provozu**.

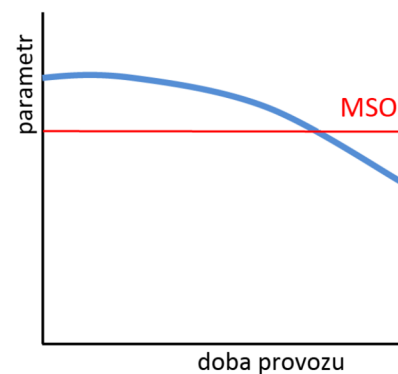
Monitorování výkonnosti a parametrů může být časově **plánováno**, prováděno **na požádání** nebo může být **nepřetržité** – obr. 3, 4 a 5. Vývoj směřuje k nepřetržitému monitorování (diagnostice) pomocí různých senzorů.



Obr. 3 Plánované monitorování



Obr.4 Monitorování na požádání



Obr. 5 Nepřetržité monitorování (MSO – mezní stav pro obnovu)

Prediktivní údržba (předpovídána) podle stavu je prováděná na základě předpovědi odvozené z **analýzy** a vyhodnocení významných **parametrů degradace objektu** – viz obr. 6.

Predikování je založeno **na analýze a extrapolaci parametrů degradace objektu** (obr. 5, 6, 7 a 8), či na jiných sofistikovanějších metodách (např. neuronové sítě, umělá inteligence, multi-parametrické analýze aj.).

Nelineární extrapolace pomocí polynomů n-tého stupně (1) se nedoporučuje, protože není jisté, zda se bude správně vyvíjet předpověď trendu podle této funkce.

$$S(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_nt^n \quad a_n \neq 0 \quad (1)$$

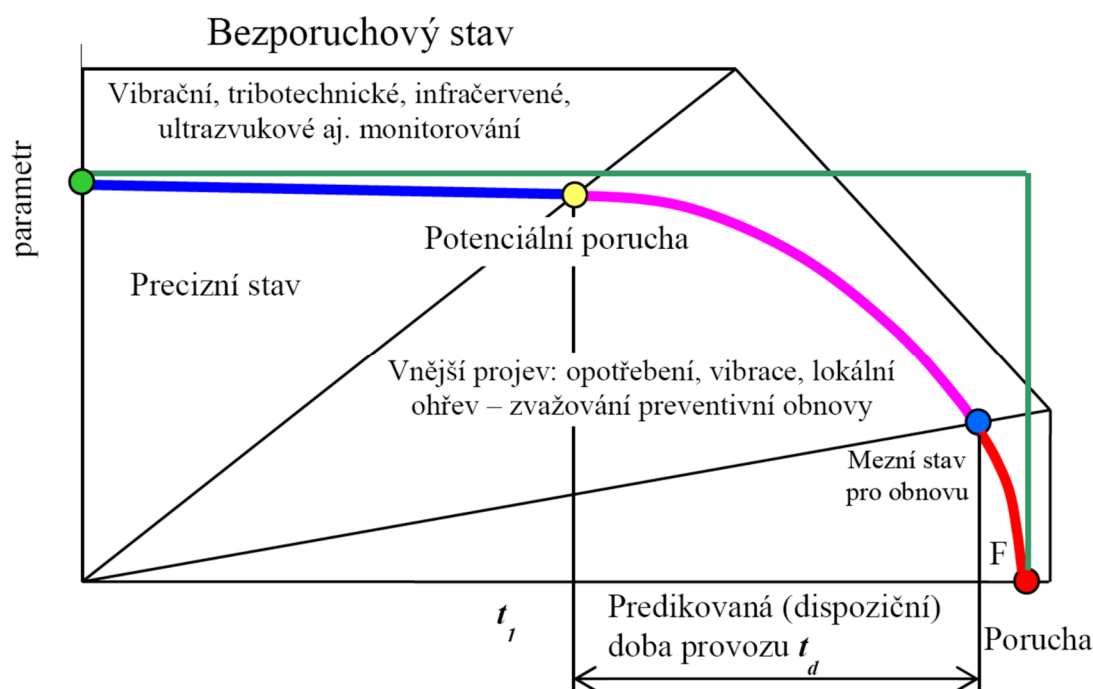
Co lze očekávat od prediktivní údržby?

Výhody:

- vyšší využití fyzického života,
- lepší předcházení výskytu poruch.

Nevýhody:

- musí být monitorován a vyhodnocován technický stav objektu,
- vícenásledky na monitorování (diagnostiku),
- obtížnější plánování – okamžik obnovy pro stejný typ objektu je různý.

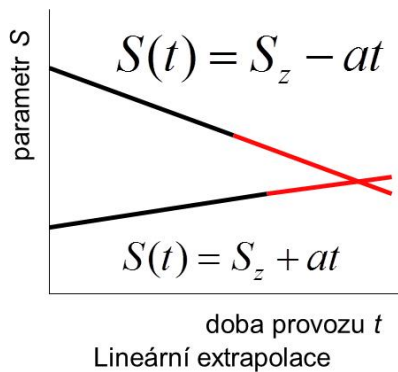


Obr. 6 Princip předpovídání doby do obnovy (poruchy) (PF křivky)

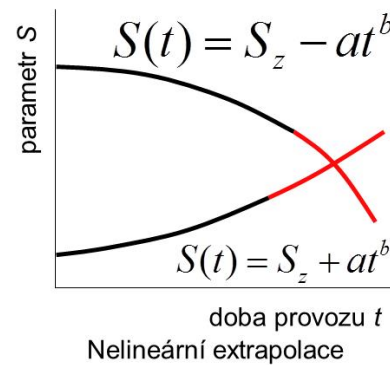
Zásada: Aplikuj prediktivní údržbu všude tam, kde je to technicky možné a ekonomicky výhodné. Toto je důležitý **perspektivní požadavek** na údržbu. V současné době se o prediktivní údržbě hodně mluví, ale plně funkčních aplikací v provozu je pořád hodně málo.

U všech typů údržby bude stále více uplatňována **proaktivní údržba**, která je založena na analýze příčin, ať již potenciálních nebo reálných poruch, a na **odstraňování všech nežádoucích zjištěných příčin**. Např. než údržbář vymění porouchané valivé ložisko, přesvědčí se, zda příčinou poruchy a krátkého života nebyla nesouosost, vibrace nebo špatné

mazání. Při uplatnění proaktivní údržby údržbář v průběhu výměny ložiska odstraní tyto nedostatky, a tím zajistí nominální (předepsaný, vypočtený) život tohoto ložiska.



Obr.7 Lineární jednoparametrická extrapolace



Obr. 8 Nelineární jednoparametrická extrapolace

3. Odpovědnost managementu údržby

Manažer údržby s podporou vrcholového managementu organizace je odpovědný za zajištění, že jsou údržba a zajištění údržby poskytovány jako součást celkového plánu provozu a provozní spolehlivosti výrobního zařízení tak, aby byly splněny ekonomické provozní podmínky. Do této činnosti managementu musí být stále více zahrnovány tyto aktivity:

- a) stanovení politiky údržby,
- b) rozhodování o optimalizaci nákladů a přínosů mezi funkčními potřebami, způsobilostí, náklady životního cyklu a bezporuchovostí, udržovatelností a zajištěností údržby,
- c) poskytování a zlepšování zdrojů údržby a zajištění údržby během etapy provozu a údržby.

Definování politiky údržby v organizacích je na nízké úrovni, nebo žádné. Požadavky na definování politiky údržby porostou. Politika údržby má minimálně stanovit, *jak se bude řídit plánování, provádění, posuzování, analýza a zlepšování údržby a zajištění údržby*. Cíle údržby se stanovují na základě politik organizace. Tyto *cíle mohou zahrnovat pohotovost, bezpečnost, výkonnost a náklady na údržbu* a mají být sděleny všem pracovníkům zapojeným do údržby a zajištění údržby včetně externích stran.

Při **plánování údržby a zajištění údržby** je třeba stále více uvážit, posoudit a realizovat:

- a) **cíle provozní spolehlivosti** (pohotovosti) a cíle týkající se bezpečnosti a nařízení či předpisů,
- b) **systémy údržby**, které se budou používat (údržba po poruše, periodická, diagnostická a prediktivní s výrazným prosazením proaktivní údržby),
- c) **metodiku optimalizace údržby** s využitím metod FMECA, RCM, RCFA, matematicko-ekonomického modelování aj.,
- d) **zdroje**, zejména personální, potřebné k zajištění a uplatnění aktualizovaných programů údržby,
- e) **spoluodpovědnost vrcholového managementu** organizace za údržbářské činnosti a zejména za uplatnění požadavků koncepce Průmysl 4.0 i do údržby.

4. Procesy údržby

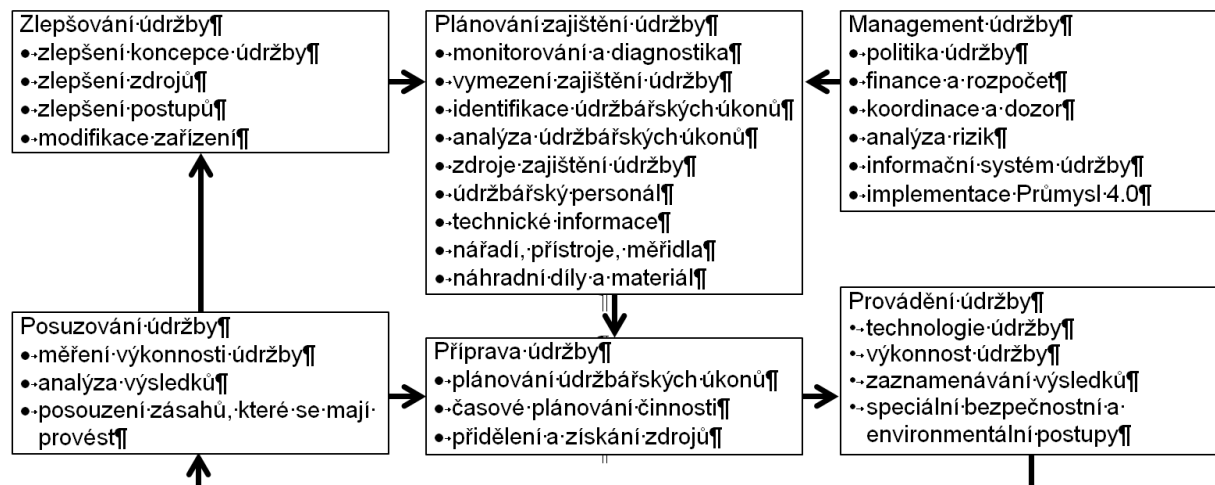
Požadavky na kvalitu procesů údržby stále rostou a lze je obecně vyjádřit v několika bodech:

1. Pořizování majetku s vysokou spolehlivostí a nízkými náklady životního cyklu v souladu s požadavky asset managementu [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].
2. Udržování hmotného majetku (HM) v provozuschopném a způsobilém stavu.
3. Předcházení vzniku poruch a následujících poruchových stavů.
4. Operativní odstraňování vzniklých poruch.
5. Snižování environmentálních dopadů provozu výrobního zařízení.
6. Zajištění bezpečnosti provozu a údržbářů.
7. Snižování rizik.
8. Eliminování kritických poruch.
8. Vynakládání optimálních nákladů na údržbu.
9. Vedení managementu majetku a jeho údržby k excelenci s používáním metod a nástrojů nejlepší světové praxe, asset managementu a v souladu s výzvou Průmysl 4.0.

Co nejvíce chybí v praxi z hlediska kvality procesů údržby? Audity a analýzy údržby, které ČSPÚ provedlo a provádí na objednávku v různých průmyslových podnicích, dovolují zobecnit některé poznatky. **Zásadně chybí koncepce a strategie údržby** a její propojení s výrobou, se změnou časové struktury, výrobním úkolem, sortimentem výrobního zařízení apod. **Koncepce Průmysl 4.0** přímo vyžaduje vysokou integraci všech vývojových, výrobních, logistických, ale i údržbářských procesů. V této oblasti je co implementovat a zlepšovat. Určité **slabiny jsou i v administrativě a plánování údržby**, velmi málo je využíván vhodný **informační plánovací systém**. Stále značně **převládá systém údržby po poruše**, a jak už jsem výše uvedl,

poroste tlak na prediktivní a proaktivní údržbu. Rovněž **logistika ND v údržbě je na nízké úrovni**, požadavky porostou, neboť jde o **reálný zdroj úspor**. Hodnocení výkonnosti údržby pomocí KPIs je na nízké úrovni, **chybí účinný informační systém údržby (ISÚ)**, i když na trhu je celá řada ISÚ, přesto v současné době **nesplňují plně požadavky Průmyslu 4.0**. Nakonec konstatuji, že **kvalitu údržby dělá především kvalitní údržbářský personál** od řadového údržbáře až po vrcholového manažera údržby a KPIs jsou sice pomocné nástroje, ale velmi důležité pro zpětnou vazbu.

Jiný pohled na strukturu procesů údržby je zřejmý z obr. 9 [12], kam jsou doplněny další procesy, kterým je třeba věnovat zvýšenou pozornost.



Obr. 9 Procesy údržby

Masivní implementace Průmyslu 4.0, nasazení senzorů technického stavu, analýzy RCM a využití dat z analýzy FMECA **umožní mnohem přesněji a účinněji identifikovat úkoly preventivní údržby s cílem:**

- **detekovat a napravovat vznikající poruchy** buď před tím, než nastanou, nebo před tím, než se z nich stanou kritické poruchy,
- **snížit pravděpodobnost** vzniku poruchy,
- **detekovat skryté poruchy**, které vznikly,
- **zvyšovat nákladovou efektivnost** programu údržby.

Jestliže mohou být následky poruchy tolerovány a **náklady na údržbu po poruše jsou menší než náklady na preventivní údržbu**, může nejlepší přístup spočívat v tom, že se **nepoužije žádná plánovaná údržba**.

Procesy managementu údržby ve světle výzvy Průmysl 4.0 by se měly významně měnit. **Zvýší se tlak na přechod od údržby po poruše a údržby periodické na údržbu prediktivní a proaktivní** všude tam, kde to bude **technicky možné a ekonomicky výhodné**. Technické možnosti implementace prediktivní údržby jsou již teď umožněny nabídkou velké palety cenově dostupných sensorů.

ČSPÚ, na současné úrovni poznání, ve svých kurzech Manažera (MÚ), Technika (TÚ) a Mistra údržby (MiÚ) reaguje na řadu problémů výzvy Průmysl 4.0, upozorňuje a účastníky kurzů připravuje na jejich řešení. Na druhé straně je nutné poznamenat, že **výzkum zpracování dat v oblasti managementu údržby má ještě mnoho úkolů před sebou a jeho intenzita je velmi nízká**. Lze říci, že v současné době **není ještě management údržby připraven rutinně řešit výzvu Průmysl 4.0**.

5. Management zdrojů pro údržbu

Základní zdroje použitelné pro údržbu a zajištění údržby jsou a ještě dlouho budou [17, 18]:

- a) **lidské zdroje**, včetně interních i externích pracovníků, používané k provádění údržby a zajištění údržby,
- b) **materiály a náhradní díly** používané k opravě nebo obnově objektů,
- c) **infrastruktura**, která se skládá z pracovišť používaných pro údržbu a generální opravy, z nástrojů, vybavení pro zajištění údržby a z dopravních a zvedacích zařízení,
- d) **informační zdroje** požadované k řízení a provádění údržby a zajištění údržby,
- e) **finanční zdroje** k finančnímu krytí údržby a zajištění údržby.

Ad. a) Lidské zdroje byly, jsou a budou nejdůležitějším faktorem zajištění údržby. Je jedno, zda máme na mysli interní nebo externí pracovníky. **Všeobecná příprava pracovníků pro údržbu** je záležitostí školství (od učňovského až po vysoké), ale i výrobních organizací (zakládání vlastních učilišť). Budoucnost vidím ve staronovém **duálním vzdělávání**, v němž je zakotvena smluvní spolupráce škol a podniků, přičemž školy zabezpečují teoretickou přípravu a podniky odbornou přípravu učňovského dorostu i pro údržbu. **Bez iniciativy a podpory vlády ČR to však plošně nepůjde**, na Slovensku již začali. Mimořádná pozornost musí být věnována přípravě **mechatroniků**, kteří zvládají jak elektronické, tak i mechanické systémy.

Ad. b) Logistická podpora údržby zahrnuje především **koncept nákupu, zásobování, skladování a řízení zásob náhradních dílů a materiálů** (NDM) pro potřeby údržby. Musí být stanoveny požadavky na základní principy řízení materiálových toků tahem a tlakem, **požadavky na metody a normativy řízení zásob** a způsoby hodnocení dodavatelů nejenom NDM, ale i všech nakupovaných údržbářských služeb. Nejdůležitějším úkolem je **určit, které NDM musí mít organizace na skladě** (kritické NDM) a které v případě potřeby získá přímo z vnějších zdrojů. V současné době jsou již k dispozici různé metody a SW řízení zásob NDM (např. min. max., ABC analýza, kritéria pořízení položky na sklad, boot strapping aj.). Hlavním

úkolem do budoucna je tyto metody implementovat a využívat jako prostředek snižování nákladů v údržbě. Lze také zvažovat řešení této problematiky formou služby, např. firma LOGIO, s.r.o. poskytuje tyto služby. Zásadním a **novým aspektem** v logistice ND budou technologie 3D tiskáren.

Ad. c) Infrastruktura a technologie údržby má být zahrnuta do strategie údržby tak, že jsou stanoveny hlavní používané technologie udržování, diagnostikování a oprav, ať již jde o procesy a postupy nebo o základní technologická vybavení dílenských prostor a údržbářů.

Ad. d) Informační zdroje, systémy a technologie v údržbě patří do strategických úkolů, neboť pořizovací náklady jsou vysoké a přínosy závisejí na pečlivém uvážení a výběru nakupované informační technologie včetně softwaru a zejména na důkladném zmapování informačních toků a skutečné potřeby jednotlivých dat. Tato oblast je jádrem požadavků Průmyslu 4.0. Ve strategii **nesmějí chybět zdroje nejenom na pořízení a implementaci, ale zejména pro trvalé udržování a aktualizování.**

Informační systémy údržby budou ovšem vyžadovat **zásadní zlepšení v oblasti zpracování dat a jejich vyhodnocování.** Současný hardware v oblasti sběru, přenosu a ukládání dat je již na vysoké úrovni (sensory, bezdrátové přenosy dat, koncentrovaná a sdílená úložiště – clouds, internet věcí aj.) a umožňuje část řešení problematiky, a to sběr, přenos a ukládání dat.

Největší problém v současné době spatřuji v absenci analýz dat obecně a automatizovaných analýz zvláště. **Chybí propracované analýzy dat, umělá inteligence v diagnostice technického stavu a poruchových stavů, algoritmy pro výpočty predikcí mezních stavů pro obnovu, rutinní plánování preventivní údržby, odstávek, sortimentu a zásob náhradních dílů (ND) apod.** Bohužel, musím říci, že systém managementu údržby ani údržbářský personál (na všech úrovních) není na tuto výzvu v současné době ještě plošně připraven. Výjimečné postavení v pokročilosti aplikace Průmysl 4.0 má **automobilový průmysl**, ale ani tam není ještě vše na úrovni excelence.

Jaká data by ISÚ v oblasti managementu údržby měl sbírat a zpracovávat?

Všeobecně:

- popis objektů a data o jejich umístění,
- popis úkolů preventivní údržby a údržby po poruše,
- historie preventivní údržby a údržby po poruše,
- podávání zpráv o poruchách a vadách včetně provozních podmínek, když byla zjištěna porucha,
- modifikace provedené u objektů,
- informace o materiálech a náhradních dílech,
- práce plánovaná a rozvrhovaná pro provádění údržeb,
- dokonalé pracovní příkazy,
- informace a rady pro údržbu na základě nových znalostí či zkušeností,
- stav konfigurace produktu a data o tomto stavu,
- servisní bulletiny vydávané výrobcí aj.

Dále data:

a) **údaje časového charakteru:**

- **doby provozu** do poruchy a mezi poruchami t a doby používání T strojů a jejich prvků,
- **intervaly** revizních t_{rp} , preventivních t_{pp} a diagnostických t_{dp} prohlídek, preventivních údržeb - oprav t_p ,
- **průběžné doby** t_{pr} a **pracnosti** údržbářských zásahů T_{pr} , plánované technické - užitečné životy T_{uz} strojů a zařízení,

- časy **prostoju** strojů a zařízení způsobené:
 - organizačními příčinami, logistikou - $t_{ORG.}$,
 - čerpáním času na odpočinek a osobní potřebu $t_{OSOB.}$,
 - preventivní údržbou t_{PU} ,
 - poruchami t_{UP} ,
 - nutným přestavováním a seřizováním t_{PS} ,
 - technologickými poruchami t_{TP} aj.

b) **údaje o technickém stavu** - různé diagnostické signály S_i , např.:

- vibrotechnická data,
- teploty,
- velikost napětí a proudu,
- tribotechnická data,
- velikost opotřebení,
- vůle, průtoky,
- změna účinnosti zařízení,
- skutečná výkonnost W_{SK} aj.

Tato skupina dat b) při aplikaci on line monitorování a diagnostiky je nejobsáhlejší a nejnáročnější na analýzu a vyhodnocování. **Jde o rozsáhlý úkol, jehož řešení je stále před námi.**

c) **údaje ekonomického charakteru:**

- náklady nebo cena preventivní údržby N_O ,
- náklady na revize N_{rp} , preventivní (inspekční) prohlídky N_{pp} a diagnostiku N_{pd} ,
- náklady nebo cena údržbářských zásahů po poruše N_h ,
- náklady na prostoje (funkce výrobních ztrát) N_p ,
- náklady vyvolané narůstajícím opotřebením funkčních ploch N_{Pe}
- ztráty z rizika výskytu poruchy Z_h a z nedodržení normativu pro obnovu Z_{no} ,
- výrobní cena jednoho výrobku CV ,
- náklady - pracovní, materiálové a režijní - na interní N_{iu} a externí údržbu N_{eu} , náklady na zásoby náhradních dílů N_{zND} aj.

Tato data c) vyžadují **zavést důkladnou spolupráci s finančním controllingem, rozšíření jeho náplně a zásadní úpravu ISÚ.**

d) **údaje o spolehlivosti (bezporuchovosti, udržovatelnosti a zajištěnosti údržby):**

A) **kvantitativní údaje:**

- doba provozu do poruchy t_{dp} a mezi poruchami t_{mp} ,
- doba do obnovy t_{dob} ,
- hustota rozdělení pravděpodobnosti výskytu poruch $f(t)$,
- pravděpodobnost poruchy $F(t)$ a bezporuchového provozu $R(t)$, intenzita $\lambda(t)$ a parametr proudu poruch $A(t)$,
- doba nezjištěného poruchového stavu t_{nprs} ,
- doba administrativního zpoždění t_{az} ,
- doba údržby po poruše t_{up} , doba preventivní údržby t_{pu} ,
- počet neshodných výrobků v důsledku chybného výrobního procesu z_{chyb} a v důsledku náběhu výroby z_{NAB} ,
- spotřeba náhradních dílů n_{ND} , počet údržbářů $n_{ú}$,

B) **kvalitativní údaje:**

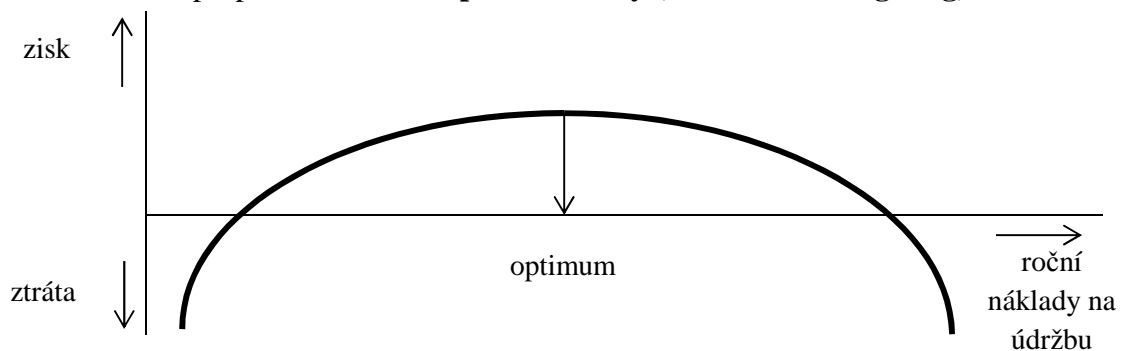
- popis módu poruchy, příčiny poruchy, odhalitelnosti poruchy, důsledku poruchy,
- způsob jejího nahlášení a odstranění, zajištěnosti údržby,
- data o zásobách NDM, apod.

Provozní spolehlivost je jednou z nejdůležitějších vlastností (znaků) kvality výrobního zařízení. Pomocí charakteristik (ukazatelů) spolehlivosti **měříme bezporuchovost, udržovatelnost a zajištěnost údržby** strojů a zařízení, která pak ovlivňuje stupeň využití jejich nominální výkonnosti a celkovou produktivitu, kvalitu a efektivnost výroby. Jak již jsem uvedl, sběr dat a **znalost charakteristik bezporuchovosti umožňuje optimalizovat preventivní údržbu obecně a společně s monitorováním a diagnostikou pak optimalizovat a aplikovat prediktivní údržbu zvláště.**

V této souvislosti musím ještě jednou upozornit na velmi důležitou úlohu **finančního controllingu** při poskytování dat pro všechny **optimalizační úkoly** (většinou minimalizujeme náklady nebo maximalizujeme zisk). Máme-li procesy zabezpečování provozní spolehlivosti strojů a zařízení **řídít**, musíme je také umět **měřit**. **Oddělení provozní spolehlivosti** organizované při útvaru údržby by se mělo věnovat výrobnímu zařízení a **oddělení inherentní spolehlivosti** by mělo být součástí útvaru managementu kvality a mělo by se plně věnovat spolehlivosti a životnosti neopravovaných, ale především opravovaných finálních výrobků (součástí, strojů a zařízení – pokud takové výrobky jsou výsledkem výrobního procesu).

Z uvedeného vyplývá, že **předmětem činnosti** těchto oddělení spolehlivosti by měl být **sběr dat o spolehlivosti, jejich analýza a zpracování do příslušných charakteristik, optimalizace programů preventivní údržby** a uplatňování nástrojů spolehlivosti pro zlepšování spolehlivosti výrobního zařízení, ale i finálních výrobků.

Ad. e) **Vrcholový management** organizací **musí zásadně změnit přístup k financování údržby** a **nechápat údržbu pouze jako nákladovou položku**. Bez údržby se nedá dlouhodobě vyrábět, stejně tak, jako bez pracovních sil, návrhu a vývoje, surovin a polotovarů, bez výrobního zařízení, infrastruktury, logistiky aj. **Bez údržby se dříve nebo později výrobní zařízení zastaví**, výroba spadne na nulu a finanční příjem včetně zisku poklesne rovněž na nulu či do ztráty. Při financování a tvorbě rozpočtů údržby je třeba vždy **hledat optimum** a nikoliv za každou cenu minimum – viz obr. 10. **Najít optimální velikost finančních zdrojů do údržby není lehké**, lze např. použít tvorbu **rozpočtu od nuly (zero-based budgeting)**.



Obr. 10 Očekávaná závislost zisku na intenzitě financování údržby (např. na ročních nákladech na údržbu)

6. Měření, analýza a zlepšování údržby

Práce údržbáře, natož manažera údržby nekončí předáním stroje nebo zařízení zpět do provozu, ale musí čím dál více se věnovat měření, analýze a zlepšování údržby. Manažer údržby by měl **sledovat a podílet se na vyhodnocování i ukazatelů přesahujících proces údržby** [17], např.:

- kapacita výroby,
- pohotovost zařízení či výroby,
- doba nepoužitelného stavu či výpadky,
- bezpečnost a životní prostředí,
- soulad s nařízeními a předpisy,

- celkové provozní náklady a z toho náklady na údržbu,
- analýza rizik,
- zisk společnosti,
- kvalita produktu aj.

Měření týkající se vlastních procesů údržby a výrobního zařízení nebo skupiny obdobných zařízení bude více zahrnovat:

- pohotovost, bezporuchovost a udržovatelnost,
- dobu nepoužitelného stavu a dobu výpadku,
- střední dobu mezi poruchami,
- střední dobu opravy,
- dobu do poruchy zpracovanou statistickou metodou, jako je Weibullova analýza,
- náklady na plánovanou a neplánovanou údržbu aj.

Monitorování údržby se se bude stále více skládat z měření:

- vzájemného poměru plánovaných a neplánovaných úkolů,
- plánované práce nedokončené včas,
- rozdílu mezi plánovanými a skutečnými zdroji,
- dostupnosti náhradních dílů,
- výkonnosti interní (insourcing) a externí (outsourcing) údržby,
- využití pracovních sil a úrovně odbornosti aj.

Úkoly **preventivní údržby** budou vyžadovat důkladné revize zaměřené na optimalizaci **intervalů** preventivní periodické údržby a na optimalizaci hodnot **diagnostických signálů pro obnovu** (prediktivní a proaktivní údržbu).

U **údržby po poruše** je očekávaným trendem plné vyzkoumání závažných poruch, aby byla identifikována preventivní opatření a opatření k nápravě, a u závažných a nákladných poruch má být toto zkoumání zahrnuto do analýzy základních příčin poruch. **Podrobná analýza základních příčin poruch** se bude skládat z těchto úkonů:

- vytvoření a přípravy týmu odborníků,
- shromáždění důkazů,
- analýza výsledků a stanovení příčin poruch, případně provedení analýzy FMEA - analýza příčin a důsledků poruch, FTA - analýza stromu poruchových stavů, RCFA – analýza kořenových příčin poruch a jiné metody (umělá inteligence, analýza dat aj.),
- stanovení základní příčiny poruchy,
- navržení, testování a validování hypotéz mechanismů poruch,
- doporučení preventivních opatření,
- uplatnění (praktická realizace) zlepšení.

Při celkovém přezkoumání údržby po poruše se obvykle odhalí opakované poruchy a trendy týkající se provozních podmínek, problémy s obchodníky a problémy s kvalitou.

Zlepšení činnosti údržby a zajištění údržby se dosáhne pomocí podpory vrcholového managementu a managementu údržby, použitím efektivních procesů a komunikačních a analytických funkcí. Zlepšení údržby a zajištění údržby **bude dosahováno např. těmito změnami:**

- koncepce (politiky) údržby,
- stupňů údržby,
- údržbářských postupů,
- odbornosti a výcviku pracovníků údržby a provozu,
- zásobování a řízení zásob náhradních dílů a materiálů (NDM),

- nástrojů a vybavení (díleňské infrastruktury) pro zajištění údržby,
- použití (optimalizace) externích zdrojů,
- provozních postupů a podmínek,
- bezpečnostních a environmentálních postupů,
- návrhu (konstrukce) zařízení a systému,
- udržitelnosti a zajištěnosti údržby objektu aj.

K zajištění, že byla provedena vhodná opatření k nápravě či preventivní opatření a že bylo dosaženo zlepšení, bude více využíván proces **validace**.

Lze očekávat rozsáhlejší **modifikace** (modernizace, rekonstrukce, upgrade) zařízení, ať již jsou prováděny ke zlepšení funkčnosti či udržitelnosti (montáž dalších senzorů, autodiagnostiky, komunikačních a paměťových prostředků, uplatnění analytického SW aj.), povedou k lepšímu posouzení potřeb procesů údržby. To bude mít za následek změny koncepce údržby, zdrojů, výcviku a přidružené dokumentace.

7. Závěr

1. Požadavky na údržbu průmyslového výrobního zařízení nikdy nezaniknou.
2. Progresivně porostou požadavky na vzdělání a výcvik údržbářů, žádanou profesí bude mechatronik.
3. Výrobci budou dodávat spolehlivější, výkonnější, efektivnější, bezpečnější, ekologičtější a ergonomičtější výrobní zařízení.
4. Sebelepší uplatnění robotizace a digitalizace procesů údržby mechanických systémů nenahradí v plném rozsahu „ruce“ údržbářů, pouze urychlí a ulehčí práci údržbářů a sníží nežádoucí prostoje.
5. Elektronické systémy budou řízeny a kontrolovány ve velkém rozsahu na dálku.
6. Diagnostika a analýza získaných dat s využitím umělé inteligence a prediktivní údržby sníží provozní poruchovost, resp.lepší bezporuchovost a pohotovost výrobního zařízení.
7. S daty získanými monitorováním a diagnostikováním technického stavu výrobního zařízení a finančním controllinem jeho provozu se bude efektivněji pracovat a budou intenzivně využívána v procesech řízení údržby.
8. Logistika NDM bude podpořena technologií 3D tisku.
9. Vláda podpoří rozvoj školství i v oblasti výchovy údržbářů, počínaje duálním učňovským školstvím, přes střední vzdělání na průmyslových školách až po vysoké školství s obory mechatroniky, managementu a inženýrství údržby v souladu s výzvou Průmysl 4.0.
10. Generální a výrobní ředitelé budou plně vnímat význam a budou podporovat management údržby výrobního zařízení, jako nezbytný předpoklad a zdroj pro zlepšování hospodářského výsledku organizací.

Použitá literatura

- [1] MAŘÍK, V. a kol.: Národní iniciativa Průmysl 4.0. Ministerstvo průmyslu a obchodu 2015
- [2] MAŘÍK, V.: *Průmysl 4.0: výzva pro Českou republiku*. Praha: Management Press, 2016. ISBN 978-80-7261-440-0.
- [3] Management majetku a jeho údržby – cesta k prosperitě výrobní organizace. Sborník konferenčního semináře, 27. a 28. 4. 2016. Česká společnost pro údržbu. ISBN 978-80-213-2644-6

- [4] Integrace procesů obnovy a využívání fyzického majetku, efektivní plánování údržby a včasná identifikace poruch – cesta k vysoké pohotovosti zařízení. Sborník semináře, 9. 6. 2016. Česká společnost pro údržbu.
- [5] Údržba 2016. Sborník mezinárodní odborné konference, 12. a 13. 10. 2016. Česká společnost pro údržbu. ISBN 978-80-213-2668-2
- [6] Národné fórum údržby 2017. Sborník mezinárodní konference, 30. a 31. 5. 2017. Slovenská spoločnosť údržby. ISBN 978-80-554-1335-8
- [7] Průmysl 4.0 a význam spolehlivosti zařízení – výzva pro údržbu. Sborník semináře, 7. 6. 2017. Česká společnost pro údržbu.
- [8] ČSN EN 13306 Údržba – Terminologie údržby
- [10] PAS 55-2:2008 Asset Management, Part 2 Guidelines for the application of PAS 55-1 (Pokyny pro aplikaci PAS 55-1)
- [11] HLADÍK, T.: Asset management pohledem EFNMS a ISO 55000. In: Sborník konference Údržba 2015, Liblice 14. A 15. 10. 2015. ČSPÚ Praha 2015. ISBN 978-80-213-2590-6
- [12] ČSN ISO 55000:2015 Management aktiv – Přehled, zásady a terminologie
- [13] ČSN ISO 55001:2014 Management aktiv – Systémy managementu - Požadavky
- [14] ČSN ISO 55002:2014 Management aktiv – Příručka pro použití ČSN ISO 55001
- [15] ČSN EN 16646:2015 Údržba – Údržba v rámci managementu fyzického majetku
- [16] WILSON, A.: Asset Management focusing on developing maintenance strategies and improving performance. Published by Conference Communication, Monks Hill, Tilford, Farnham, Surrey HU10 2AJ, 2013. ISBN 978-0-9506465-6-5
- [17] ČSN EN 60300-3-14:2005 Management spolehlivosti – Část 3-14: Pokyn k použití – Údržba a zajištění údržby
- [18] LEGÁT, V. a kol.: Management a inženýrství údržby. Professional Publishing, Praha 2016. ISBN 978-80-7431-119-2

Autor

prof. Ing. Václav Legát, DrSc.

Česká zemědělská univerzita v Praze, technická fakulta, katedra jakosti a spolehlivosti strojů,
165 21 Praha 6 – Suchbátka

předseda předsednictva České společnosti pro údržbu (ČSPÚ)

E-mail: legat@tf.czu.cz

Koncepce prediktivní údržby – aplikace na automobilech

Martin Pexa, Jakub Čedík, Bohuslav Peterka, Jindřich Pavlů, Zdeněk Aleš

Již od počátku vzniku automobilismu bylo nutné vozidla udržovat. Tak jako i u jiných strojů a zařízení jsou i zde na jednotlivé prvky aplikovány rozdílné systémy údržby od údržby po poruše, přes údržbu preventivní (periodickou, diagnostickou) až po údržbu prediktivní, která se v současné době výrazně rozvíjí a to zejména díky výzvě Průmysl 4.0. Velké množství sensorické techniky, která se v současnosti objevuje u vozidel, předurčuje vozidla k rozšíření diagnostické, ale i prediktivní diagnostiky. Velkou měrou se však na přesnosti predikce projevuje přesnost měření jednotlivých veličin a značně proměnný provozní režim vozidel. V příspěvku jsou uvedeny aplikace prediktivní diagnostiky již známé, ale i zamyšlení nad dalšími možnými aplikacemi.

1. Úvod

Strategie údržby je podle normy ČSN EN 13306 Údržba – Terminologie údržby definována jako metoda managementu používaná k dosažení cílů údržby. [11] K obecným cílům údržby patří:

- provádět správnou obnovu, modernizaci a rekonstrukci majetku a dbát o jeho optimální využívání,
- udržovat hmotný majetek (HM) v provozuschopném a způsobilém stavu a na požadované úrovni pohotovosti, efektivity, využití a jeho optimální obnovy jako celku,
- předcházet vzniku poruch a následujících poruchových stavů,
- operativně odstraňovat vzniklé poruchy,
- snižovat environmentální dopady provozu a údržby výrobních zařízení,
- zajišťovat bezpečnost provozu a údržbu výrobních zařízení,
- vynakládat optimální náklady na údržbu ve vztahu k dosahované pohotovosti a efektivnosti zařízení,
- vést management majetku a jeho údržbu k excelenci s používáním metod nejlepší světové praxe. [10]

Politika údržby ve srovnání se strategií údržby je užší termín, i když aktualizovaná norma IEC 60050-192 Mezinárodní elektrotechnický slovník – Část 192: Spolehlivost definuje politiku údržby jako stanovení cílů údržby, místa údržby, stupňů rozčlenění, stupňů údržby, zajištění údržby a jejich vzájemných vztahů s poznámkou, že politika údržby poskytuje základ pro plánování údržby, určování požadavků na podporovatelnost a pro přípravu logistické podpory, patří takto definované prvky a procesy v praxi spíše do strategie údržby a rozhraní mezi strategií a politikou se rozostřuje. [10] V odborné literatuře bývá zužována politika údržby na problematiku stanovení vhodných systémů údržby, tj. údržby po poruše nebo preventivní (periodické s předem stanovenými intervaly, podle technického stavu, prediktivní a proaktivní) údržby daného objektu. Od politiky údržby se v praxi očekává většinou vypracování programů údržby (obr. 1). Tato politika (systémy, programy) údržby je kotvena do pokynů (manuálů) pro údržbu. [12, 13]

Údržbu po poruše lze charakterizovat jako systém sice zastaralý, ale stále používaný. Používá se, protože není možné vždy předpovědět vznik poruchového stavu – není možno absolutně zabránit vzniku poruch ani periodickou preventivní údržbou a ani údržbou diagnostickou. [4]

Preventivní údržba periodická je pokrok a první systém, který částečně předchází výskytu poruch tím, že údržba je vykonána dříve, než dojde k poruše. Samozřejmě i tento systém údržby má nevýhody, které spočívají v tom, že není možné využít celou dobu fyzického života udržovaného objektu a dále je nezbytné používat již plánovací systém a sledovat i dobu používání (stáří) a/nebo dobu provozu. Hlavní výhodou tohoto systému je předcházení výskytu poruch (včetně závislých poruch) s různou pravděpodobností, nikoliv s absolutní jistotou a velmi jednoduché plánování, zejména když interval je stanoven dobou používání (kalendářní dobou). Rovněž vyvolané ztráty na výrobě jsou menší nebo žádné, stejně tak jsou menší nebo žádné environmentální a bezpečnostní ztráty a logistika NDM se dá řídit výhodnějším tažným způsobem. [1, 2, 3, 5, 17]

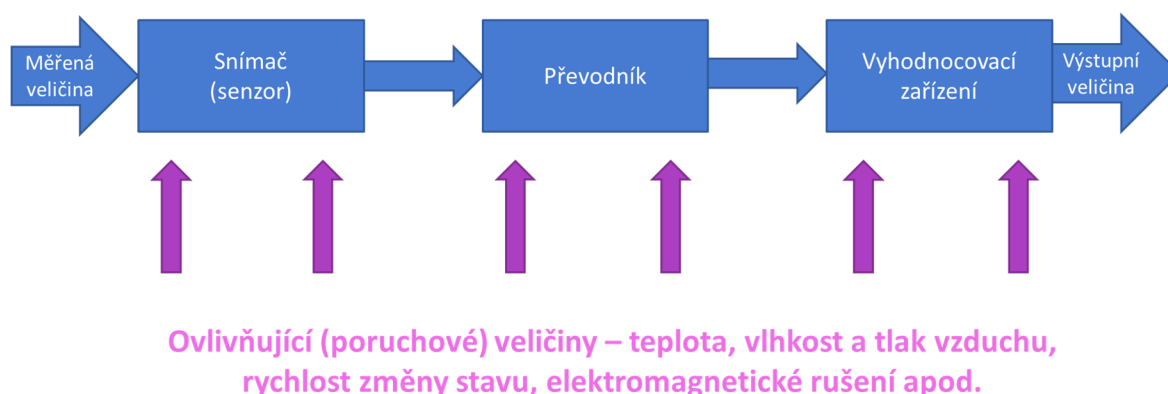
Preventivní údržba podle stavu (diagnostická) patří k modernímu způsobu řešení údržby a rovněž částečně předchází výskytu poruch tím, že údržba je vykonána dříve, než dojde k poruše. Rozdíl proti periodické údržbě je v tom, že je nespojitě nebo spojitě sledován technický stav objektu a údržba se provede při dosažení mezního stavu pro údržbu, který se nachází poměrně blízko fyzického mezního stavu (okamžiku vzniku poruchy). Tento systém údržby je možné uplatňovat bez předpovědi dispoziční doby provozu nebo s předpovědí, za jakou dobu provozu bude dosažen mezní stav pro údržbu (**PREDIKTIVNÍ ÚDRŽBA**). [6, 7, 8, 9, 14, 15, 16]

Cílem příspěvku je ukázat možnosti využití prediktivní diagnostiky u automobilů a zároveň upozornit na možná úskalí s tím spojená.

2. Měření a přesnost měření

Diagnostika je činnost prováděná za účelem vyslovení diagnózy (popis současného technického stavu) a prognózy (popis vývoje technického stavu) technického stavu objektu. Pro popis technického stavu objektu je třeba realizovat řadu měření, jejichž cílem je zjištění hodnoty měřené veličiny. Měření je tedy kvantitativní zkoumání vlastností objektů, obvykle porovnáním s obecně přijatou jednotkou. Výsledkem měření je pak číslo, které vyjadřuje poměr zkoumané veličiny k jednotce.

Měřicí řetězec se skládá z vlastního snímače (je ve styku s objektem, primární zdroj informace), převodníku (transformuje měřící veličinu na unifikovaný signál) a vyhodnocovacího zařízení (signál pro vstup regulátoru směřující k vyslovení diagnózy a prognózy technického stavu objektu) a je zobrazen na obrázku číslo 1. Na měřicí řetězec působí ovlivňující (poruchové) veličiny (teplota, tlak apod.) a vznikají tak chyby měření.



Obr. 1. Měřicí řetězec

Chyba měření je rozdíl mezi výsledkem měření a pravou hodnotou měřené veličiny. Nejistota měření je parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině. Chyba má složku systematickou a náhodnou.

Systematická chyba je chyba, která při větším počtu měření, prováděných za týchž podmínek téže hodnoty určité veličiny zůstává co do absolutní hodnoty a znaménka stejná, anebo která se při změně podmínek mění podle určité zákonitosti. Příčiny systematických chyb mohou být známé i neznámé. Korekce chyby je hodnota, která, je-li algebraicky přičtena k nekorigovanému výsledku měření, kompenzuje předem uvažovanou systematickou chybu. Korekce se rovná předpokládané systematické chybě, avšak s opačným znaménkem. Nemůželi být systematická chyba poznána exaktně, je korekce zatížena nejistotou.

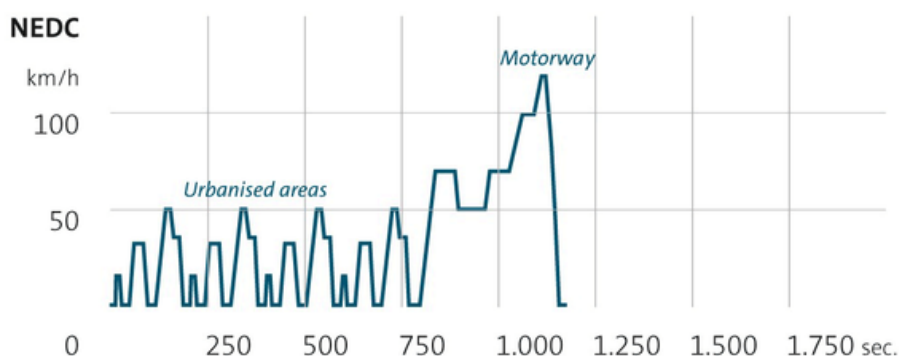
Náhodná chyba je chyba měnící se náhodným způsobem při opakovaných měřeních téže veličiny za týchž podmínek. Nelze ji korigovat. Lze ji zmenšovat opakovaným měřením.

Chyba měření tak má významný vliv na stanovení diagnózy technického stavu objektu a současně značně komplikuje predikci technického stavu objektu. V některých případech lze systematickou chybu měření využít ve svůj prospěch a ovlivnit chod spalovacího motoru vozidla tím, že bude zkreslen správný signál snímače, např.:

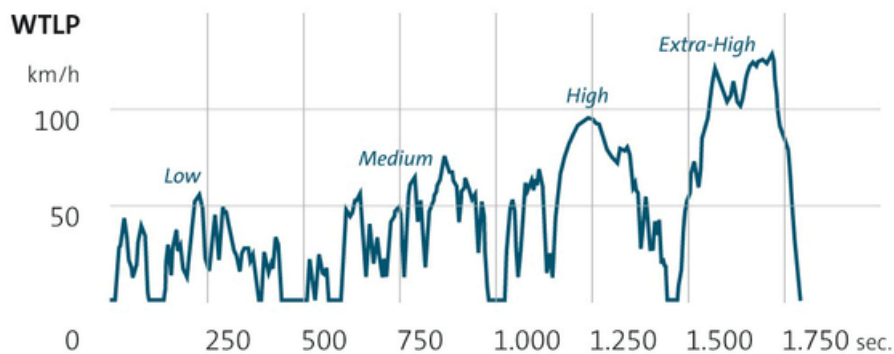
- snímač teploty nasávaného vzduchu trvale informuje o teplotě výrazně nižší a to vede k reakci řídicí jednotky motoru ke zvýšení dodávky paliva pro udržení pravidelného chodu motoru – výsledkem je změna průběhu výkonových parametrů motoru,
- obdobná situace nastává při zkreslení informace ze snímače o množství nasávaného vzduchu, zejména u přeplňovaných motorů.

3. Zvláštnosti prediktivní údržby na automobilech

Možnosti predikce u vozidel a vozidlových motorů je značně ovlivněna režimem provozu, na níž má kromě technických podmínek vliv především řidič daného vozidla. To po dlouhé diskusi vedlo k tomu, že test NEDC pro stanovení emisí a spotřeby paliva vozidel při homologaci byl nahrazen testem WLTP, který lépe vystihuje současnou situaci. Konkrétně jde o to, že tomuto testu, přesněji tomuto způsobu provozu vozidla, se blíží větší procento současných řidičů. Srovnání testů NEDC a WLTP je zobrazeno na obrázku číslo 2.



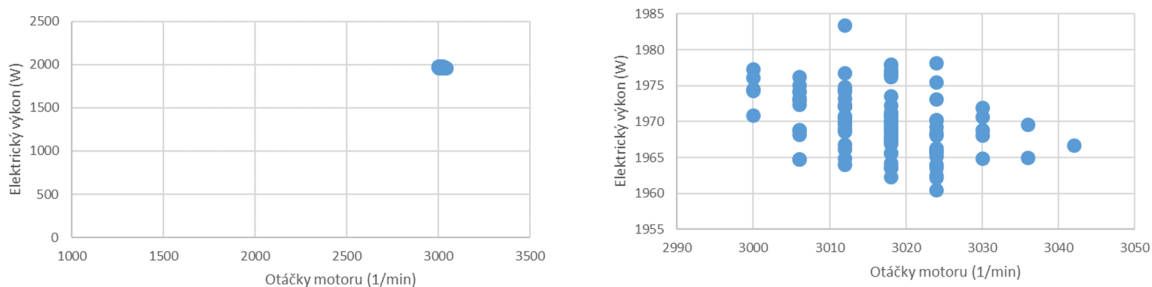
a) Test NEDC



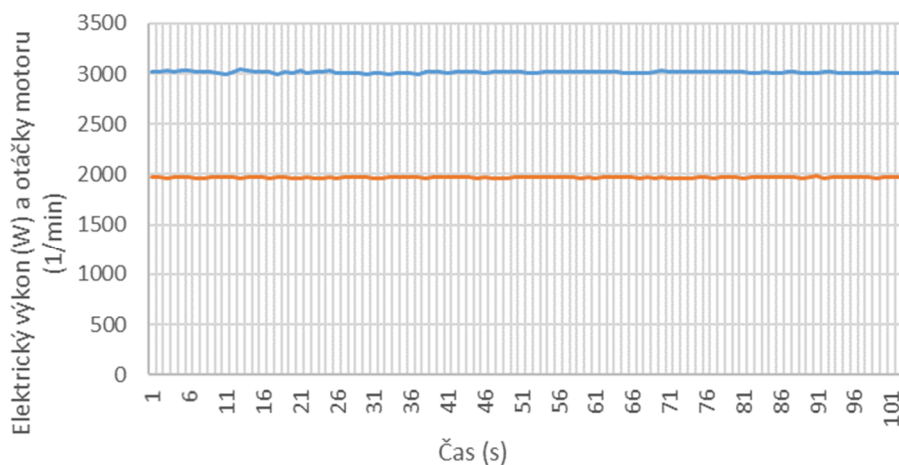
b) Test WLTP

Obr. 2. Průběh testu NEDC a WLTP [18]

Odlišná situace nastává u motorů, které jsou zatíženy odběrem stálého množství energie. Například se může jednat o motor elektrocentrály s trvalým odběrem energie do elektrického topení. Průběh točivého momentu v závislosti na otáčkách je zobrazen na obrázku číslo 3 a pro srovnání v závislosti výkonu a otáček na čase na obrázku číslo 4.



Obr. 3. Závislost zatížení motoru elektrocentrály na otáčkách – obrázek vpravo ukazuje detail regulace elektrocentrály



Obr. 4. Závislost otáček a zatížení elektrocentrály na čase

4. Praktické příklady

Typickým příkladem je **výměna motorového oleje**. U osobních vozidel jsou známy interval běžný (15000 km nebo 1 rok) a prodloužený (30000 km a 2 roky). V současné době se vedou diskuse o tom, že intervaly jsou příliš dlouhé, ale to je otázka mimo příspěvek. Tyto základní intervaly hlídá a koriguje řídicí jednotka motoru. Přesněji na základě provozního režimu (např. počet studených startů) interval zkracuje (obr. 5). Skutečnou analýzu motorového oleje řídicí jednotka nevykonává.

Na vozidle užívaném ke krátkým jízdám (dojezd do práce, rozvoz dětí do školy a školky apod.), tak může docházet k výraznému ovlivnění stavu motorového oleje, zejména pak u přímovstříkových motorů. U vozidla, které jezdí 6 km ráno a 6 km odpoledne zpět je používán motorový olej longlife s výměnným intervalem 30000 km. Řídicí jednotka si žádala výměnu po cca 11000 km. Bude-li se ale sledovat stav oleje (vzhledem ke způsobu provozu stačí sledovat podíl těkavých složek v oleji) je překročen již při nájezdu vozidla 3000 až 4000 km a to velmi výrazně. Bod vzplanutí se pohybuje pod hranicí 100 °C, přičemž limitem pro zážehové motory je 150 °C.



Obr. 5. Příklad informace o zbývajícím počtu ujetý km do výměny motorového oleje

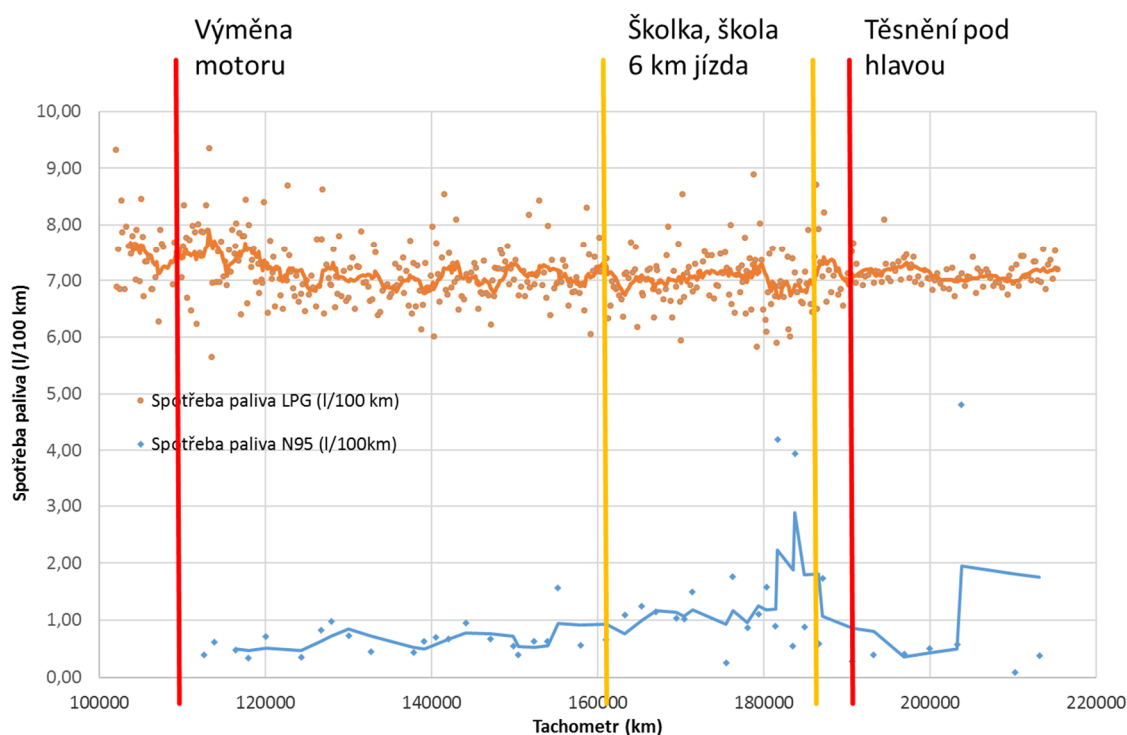
Dalším příkladem je **predikce dojezdu vozidla** na současný stav palivové nádrže. Pro popis situace se bude vycházet ze situace na obrázku číslo 5 a bude doplněna o informace zobrazené na obrázku číslo 6.



Obr. 6. Informace k dojezdu vozidla

Vozidlo má najeto 144732 km a od posledního vynulování (tankování do plné nádrže) ujelo 278 km průměrnou rychlostí 52 km/h s průměrnou spotřebou paliva 3,4 litru na 100 km jízdy. Při současné situaci je dojezd vozidla 1479 km. Spotřeba paliva podle plnění nádrže je dlouhodobě 3,83 l/100km. Zda je přesnější řídicí jednotka motoru nebo měření u stojanu na čerpací stanici je ovlivněno doplněním paliva na stejnou hladinu, rozdílnou teplotou paliva ve vozidle, ve stojanu a v podzemní nádrži. Tento problém zde již řešen nebude, ale bude sledována řídicí jednotka motoru, která zobrazuje spotřebu paliva 3,4 l/100km, když je průměrná spotřeba paliva v intervalu 3,40 až 3,49 l/100km. Pokud se vezme v úvahu průměrná spotřeba paliva 3,4 l/100 km zbývá v nádrži cca 50,29 l a při průměrné spotřebě paliva 3,5 l/100 km zbývá v nádrži cca 51,77 l paliva. Rozdíl v dojezdu se tak může lišit o cca 42 km. Prakticky jsou známy případy, kdy vozidlo hlásí dojezd 30 km a už nejede nebo hlásí dojezd 0 km a stále jede.

Z hlediska spotřeby paliva by jistě bylo zajímavé sledovat dlouhodobé trendy, které dokáží napovědět více o vývoji technického stavu více než okamžitá spotřeba paliva. Příklad je zobrazen na obrázku číslo 7 na vozidle Škoda Felicia 1,3 MPi při kombinovaném provozu benzín a LPG.



Obr. 7. Průběh spotřeby paliva u vozidla Škoda Felicia

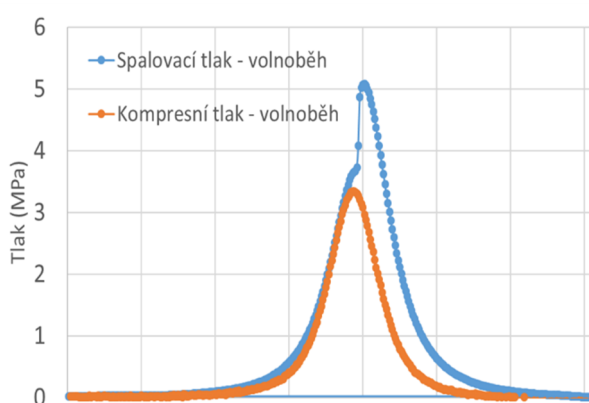
Z hlediska uživatelů by bylo zajímavé predikovat průběh **státní technické kontroly**, tzn. Mít k dispozici informace o technickém stavu součástí majících vliv na ekologičnost a bezpečnost provozu. Například to může být frekvence vypalování filtru pevných částic, tlak ve spalovacím prostoru, teplota výfukových plynů, tloušťka brzdového obložení apod.

Filtr pevných částic se vypaluje průměrně každých 300 až 700 km především v závislosti na stupni dokončení vypalování v minulém případě, na způsobu jízdy řidičem (provozní zatížení vozidla) a na technickém stavu spalovacího motoru a jeho součástí. Bude-li se předpokládat

dlouhodobě neměnné provozní zatížení vozidla, lze na základě zkracujícího se intervalu usuzovat na technický stav především palivové soustavy vozidla.

Pro životnost turbodmychadel by zajisté bylo zajímavé, aby byl řidič informován o předpokládaném zahájení vypalování filtru pevných částic. V případě již krátké jízdy by bylo záhodno vypalování nezahajovat, aby při následném ukončení jízdy během vypalování filtru nedošlo k poškození turbodmychadla a znehodnocování olejové náplně v důsledku vysoké teploty.

Diagnostickým signálem popisujícím technický stav pístní skupiny je **kompresní tlak**. V současné době již někteří výrobci osazují do spalovacích motorů žhavicí svíčky s možností měřit tlak během spalování, aby bylo možno lépe řídit průběh hoření palivové směsi. Pravidelně však je možno vynechat vstříknutí paliva (například při spouštění motoru) a sledovat kompresní tlak (obr. 8).



Obr. 8. Kompresní tlak a tlak během hoření palivové směsi

Dalším velmi zajímavým diagnostickým signálem je **teplota výfukových plynů**. Hodí se zejména pro dlouhodobé sledování provozu motorů, které pracují v konstantním provozním režimu, jako jsou například kogenerační jednotky. Nevýhodou tohoto signálu je, že se velmi obtížně stanovuje konkrétní technický problém. Na teplotu výfukových plynů má totiž vliv druh paliva, otáčky motoru, předvstřík, časování ventilů, opotřebení pístu a válce, stav palivové soustavy apod.

Významný vliv na bezpečnost provozu vozidel má stav brzdového obložení. Aby uživatel vozidla věděl, kdy má obložení vyměnit jsou brzdové destičky vybaveny snímačem, který informuje, že je třeba je vyměnit nebo dvěma snímači, jedním jako upozornění o blížící se výměně a druhým jako signál k výměně. Při informaci o ujeté vzdálenosti a při konkrétních znalostech rozměrů brzdových destiček a umístění senzorů, by bylo možné předpovídat, kdy daný okamžik na výměnu nastane. Případně by bylo možné osadit destičky více snímači nebo snímačem stupňovitým.

5. Závěr

V příspěvku bylo naznačeno současné využití, ale i možné budoucí využití predikce u silničních vozidel. Vozidla disponují celou řadou senzorů, které poskytují řadu informací, jež lze využít

ke sledování, trendování a za určitých podmínek i k predikování technického stavu do budoucna.

Nevýhodou těchto sledování a z toho odvození závěrů pro vývoj technického stavu je přesnost měření dané veličiny a také provozní režim vozidla. Je prokázáno dlouhodobým sledováním, že každý řidič je i při řízení vozidla individualitou, která umí méně či více využít potenciál vozidla. Jsou naprosto běžné případy, že řidiči při řízení jednoho a téže vozidla po jedné a téže trase dosahují spotřeby paliva odlišné i o několik desítek procent. Lze ale předpokládat, že řidič svůj styl jízdy obvykle moc nemění, pokud k tomu není školením či jinými prostředky (finančními) přinucen.

Celkově lze říci, že lze s výhodou aplikovat prediktivní diagnostiku u silničních vozidel, ale je nutné řadu případů posuzovat individuálně nebo se smířit s tím, že přesnost predikce bude do jisté míry omezena.

Použitá literatura

- 1) AGOSTINI, A. a BERCHIOLLI, S.. Condition based maintenance in the paper industry. Maintworld: maintenance & asset management. Helsinki, Finland: Promaint, 2014, (2), 26-29. ISSN 1798-7024.
- 2) BLACKFORD, D. Remote diagnostics a good option for your condition monitoring programme? Maintworld: maintenance & asset management. Helsinki, Finland, 2013 (1), 50-53. ISSN 1798-7024.
- 3) BRION, F. Remote diagnostics improve reliability. Maintworld: maintenance & asset management. Helsinki, Finland: Promaint, 2015, (4), 32-33. ISSN 1798-7024.
- 4) ČSN EN 13460 Údržba - Dokumentace pro údržbu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- 5) ČSN EN 60706-2 Udržovatelnost zařízení - Část 2: Požadavky na udržovatelnost a studie udržovatelnosti v etapě návrhu a vývoje. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.
- 6) GREŇČÍK, J. MANAŽÉRSTVO ÚDRŽBY - synergia teórie a praxe. Slovenská spoločnosť údržby - Košice: BEKI design, 2013. ISBN 978-80-89522-03-3.
- 7) IRLBECK, A. Wireless brings freedom. Maintworld: maintenance & asset
- 8) JURČA, V. a ALEŠ, Z. Maintenance management systems in agricultural companies in the Czech Republic. Eksploatacja i niezawodność, Maintenance and Reliability. 2012, 14(3), 233-238. ISSN 1507-2711.
- 9) KELLY, A. Maintenance management auditing: in search of maintenance management excellence. New York, NY: Industrial Press, 2006. ISBN 9780831132675.
- 10) LEGÁT, V. a kol. Management a inženýrství údržby. Druhé doplněné vydání. Praha: Kamil Mařík - Professional Publishing, 2016. ISBN 978-80-7431-163-5.
- 11) LEGÁT, V. a kol. Systémy managementu jakosti a spolehlivosti v údržbě. 1. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2007. ISBN 978-800-2019-497.
- 12) LEGÁT, V., a ALEŠ, Z.. Expected trends in dependability management within agricultural engineering and manufacturing. In: Conference Proceeding - 4th International Conference Trends in Agricultural Engineering 2010. Prague, Czech Republic: Czech University of Life Sciences Prague; Faculty of Engineering, 2010, 685 – 690. ISBN 978-80-213-2088-8.
- 13) LEGÁT, V., JURČA, V. a ALEŠ, Z. Contribution to plough shares and chisels useful life optimization. Scientia Agriculturae Bohemica. Czech University of Life Sciences Prague, 2011, 42(2), 74–79. ISSN 1211-3174.

- 14) LUTZ, P. Industrial communication in the context of Industry 4.0 and IoT. Maintworld: maintenance & asset management. Helsinki, Finland: Promaint, 2017, (1), 26-27. ISSN 1798-7024.
- 15) Pexa, M., Kadleček, B., Pejša, L., Svítek, M., 2006: Údržba a elektronické mytné. Sborník příspěvků čtvrté mezinárodní vědecké konference "Údržba 2006", Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha. ISBN 80-213-1557-1, 2006, s. 163-167.
- 16) Pexa, M., Mařík, J., Veselá, K., Kotek, T., Králík, P., 2013: Dynamická měření výkonových parametrů spalovacích motorů, Mezinárodní odborná konference - "Údržba 2013 - Maintenance 2013", Česká společnost pro údržbu, Praha, ISBN 978-80-213-2410-7, 2013, s. 233-239.
- 17) Pošta, J., Pexa, M., 2003: Technika a technologie mazání strojů. In: Sborník - *Mezinárodní odborná konference "ÚDRŽBA 2003"*, Česká společnost pro údržbu a Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha. ISSN 80-213-1065-0, 2, s. 156-162.
- 18) Měření vozidel, www.dieselnet.com – citováno 5. února 2018.

Autoři

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D., Ing. Jakub Čedík, Ph.D., Ing Bohuslav Peterka, Ph.D., Ing Jindřich Pavlů, Ph.D., doc. Ing Zdeněk Aleš, Ph.D.

Česká zemědělská univerzita v Praze, technická fakulta, katedra jakosti a spolehlivosti strojů,
165 21 Praha 6 – Suchbátka

E-mail: pexa@tf.czu.cz

Analýza provozních parametrů – vstup pro optimalizaci preventivní údržby výrobního zařízení

Zdeněk Aleš, Jindřich Pavlů, Václav Legát, Bohuslav Peterka

Současné postavení údržby v průmyslových podnicích se oproti předchozím rokům významně zlepšilo, ve prospěch uplatňování preventivní údržby. Zároveň podniky začaly ve větší míře uplatňovat nástroje prediktivní údržby s využitím řady diagnostických metod pro stanovení provozních či strukturních parametrů konkrétního výrobního zařízení. Trend současného vývoje technického pokroku v souvislosti s aktuální výzvou Průmysl 4.0 je mimo jiné charakterizován enormním nárůstem sběru dat. Průmyslové podniky disponují velkým množstvím dat, která ovšem většinou nejsou schopny analyzovat a tím získat cenné informace, které mohou sloužit jako zpětná vazba pro rozhodování. Předložený text se zabývá možnostmi, jak využít data získaná z řízení údržby. Primárně se jedná o data o dobách provozu do poruchy s údaji o hodnotách diagnostických signálů v okamžiku poruchy jednotlivých strojních prvků. Příspěvek popisuje, jakým způsobem využít nástroje statistické analýzy za účelem získání charakteristik bezporuchovosti. Znalost charakteristik bezporuchovosti je nutností pro aplikaci teorie obnovy za účelem stanovení optimální strategie údržby.

1. Úvod

Preventivní údržbu lze chápat jako soubor činností zaměřených na předcházení vzniku poruch a havárií. Preventivní údržba je prováděna za účelem udržení a zvýšení bezporuchovosti strojů a zařízení pomocí obnovy opotřebených strojních objektů než dojde k jejich poruše. Činnosti preventivní údržby zahrnují kontroly strojů a zařízení, částečné nebo úplné výměny v předem stanovených intervalech, výměny olejů, mazání a další. Mimo to, pracovníci v údržbě mohou sbírat údaje o postupném zhoršování technického stavu strojů a zařízení. Získané údaje pomáhají při rozhodování o výměně či údržbě opotřebených strojních objektů před vznikem poruchy. Současný technologický pokrok umožňuje sledovat velké množství diagnostických signálů s poměrně velkou přesností. Oblast zpracování a vyhodnocování dat o spolehlivosti úzce souvisí i s provozem strojů a zařízení ve všech odvětvích průmyslu. [9, 10]

Cílem tohoto příspěvku je seznámit čtenáře s metodikou zpracování dat z řízení údržby za účelem stanovení optimální strategie údržby.

2. Základní charakteristiky dvouparametrického Weibullova rozdělení

Weibullovo rozdělení je používáno v případech, kdy bezporuchovost konkrétního objektu je závislá na době používání (době provozu), případně vhodném diagnostickém signálu. **Weibullovo rozdělení je běžně aplikováno při určování ukazatelů bezporuchovosti** (Obrázek 1), které představují důležitou informaci nezbytnou pro předpověď, hodnocení a porovnání životnosti výrobků, vyhodnocení konstrukčních a technologických změn, porovnání alternativních konstrukcí či technologií, porovnání životnosti objektů při použití různých technologií výroby, vytváření záruční politiky, při proaktivním přístupu k řízení zásob náhradních dílů nebo při plánování oprav. V oblasti údržby je **Weibullovo rozdělení používáno při aplikaci teorie obnovy pro určení optimálního intervalu preventivní údržby**. Mimo to se Weibullovo rozdělení používá i při modelování různých jevů jako například pro předpověď

počasí, pro předpověď délky doby zaměstnanecké stávky, případně při hodnocení pravděpodobnosti vzniku zemětřesení. [13]

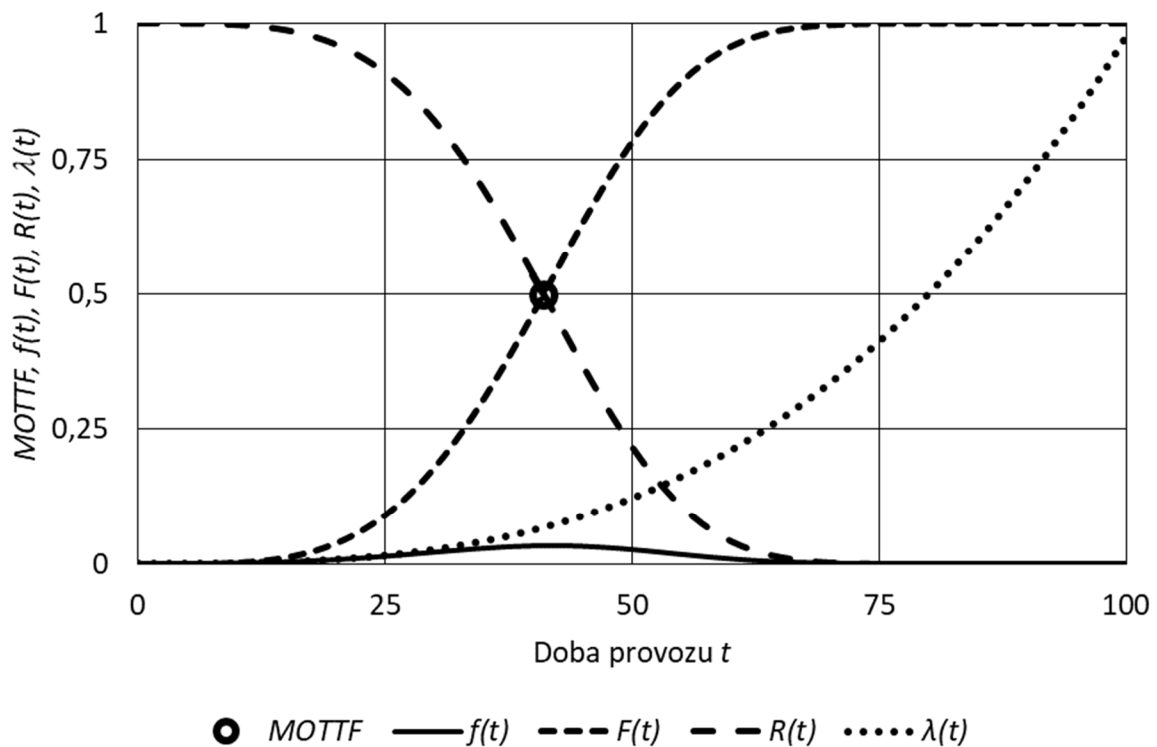
Matematicky je hustota pravděpodobnosti poruchy dvouparametrického Weibullova rozdělení definována vztahem (1)

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} t^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad \text{pro } t > 0$$

$$f(t) = 0 \quad \text{pro } t \leq 0 \quad (1)$$

Kde: α – parametr tvaru,
 β – parametr měřítka.

Parametr tvaru α obvykle nabývá hodnot v intervalu 0,5 – 8,0 a má vliv na tvar (sklon) funkce hustoty pravděpodobnosti. **Parametr měřítka β** má vliv na měřítko na ose doby provozu. Změny hodnoty tohoto parametru nezpůsobí skutečnou změnu aktuálního tvaru rozdělení (Obrázek 1). Parametr měřítka bývá někdy nazýván Weibullovým charakteristickým životem. [6]



Obr. 1 Charakteristiky bezporuchovosti dvouparametrického Weibullova rozdělení pro parametr tvaru $\alpha = 4$ a parametr měřítka $\beta = 45$

Předpis (distribuční funkce) pravděpodobnost poruchy $F(t)$ Weibullova rozdělení je dán vztahem (2)

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (2)$$

Pravděpodobnost bezporuchového provozu $R(t)$ je definována vztahem (3)

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (3)$$

Intenzitu poruch $\lambda(t)$ lze vypočítat pomocí vztahu (4)

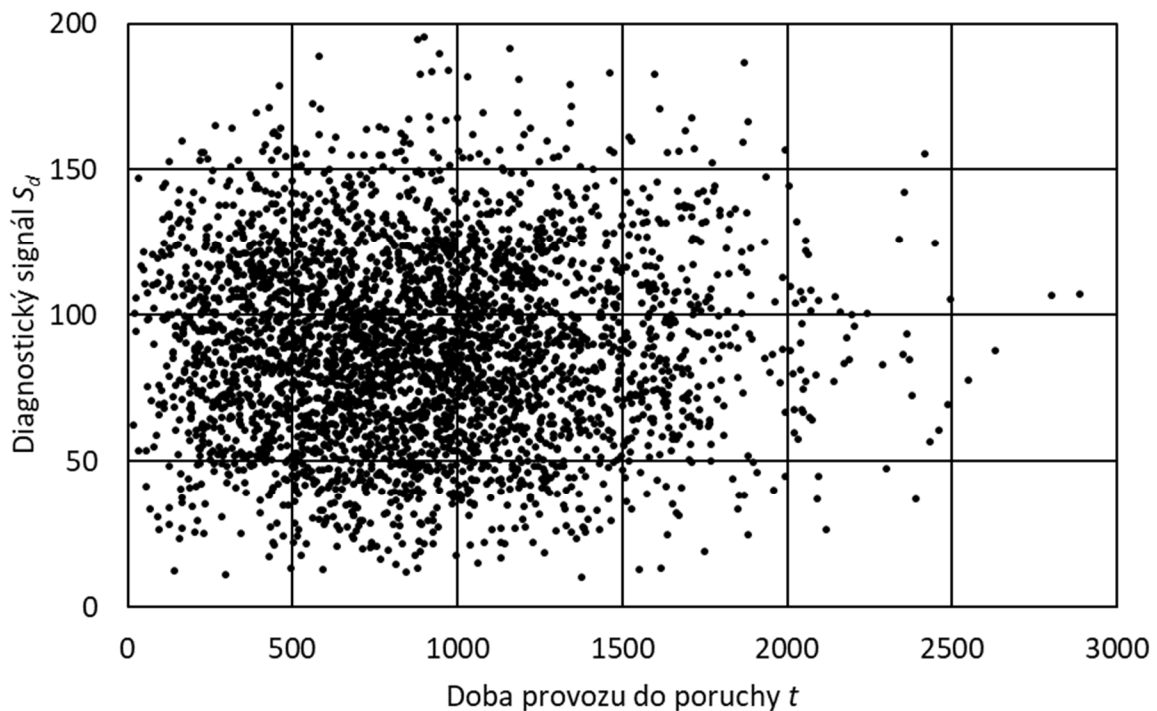
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta} \right)^{\alpha-1} \quad (4)$$

Střední doba provozu do poruchy $MOTTF$ lze vypočítat podle vztahu (5)

$$MOTTF = \beta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (5)$$

3. Bodový odhad parametrů Weibullova rozdělení

Postup odhadu parametrů Weibullova rozdělení je předveden na simulovaných datech o dobách provozu do poruchy t ve dvojici s hodnotou diagnostického signálu S_d těsně před okamžikem poruchy (Obrázek 2). Uvedený příklad se skládá z 3500 dvojic dat a byl zpracován pomocí tabulkového procesoru MS Excel. [3]



Obr. 2 Doby provozu do poruchy t a hodnoty diagnostického signálu S_d těsně před okamžikem poruchy

Nejdříve je nutné jednotlivé hodnoty uspořádat vzestupně v pořadí $i = 1, 2, 3, \dots, n$. [4, 7] Pro odhad distribuční funkce $F(t)$ se používá pořadové statistiky s označením mediánové pořadí (Tabulka 1). Zpravidla se pro výpočet mediánového pořadí používá Bernardova aproximace:

$$F_i(t) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad (6)$$

kde: F_i - odhad mediánové hodnoty (-),
 i - počet pořadové číslo doby provozu do poruchy t ,
 n - rozsah výběru.

Následně lze použít metodu lineární regrese, která představuje aproximaci daných hodnot přímkou metodou nejmenších čtverců. [8] Následující vztahy (7-15) reprezentují odvození výpočtů parametru tvaru α a parametru měřítka β Weibullova rozdělení z distribuční funkce $F(t)$:

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (7)$$

$$\ln \left\{ \ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] \right\} = \alpha \cdot \ln(t) - \alpha \cdot \ln(\beta) \quad (8)$$

Po jednoduchých matematických úpravách a dvojnásobným logaritmováním lze distribuční funkci $F(t)$ transformovat do tvaru rovnice přímky:

$$y = k \cdot x + q \quad (9)$$

Kde osa x a y jsou reprezentovány vztahy:

$$x = \ln(t) \quad (10)$$

$$y = \ln \left\{ \ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] \right\} \quad (11)$$

Z odvozených vztahů vyplývá, že hodnota parametru tvaru α je rovna směrnici přímky k , tudíž:

$$\alpha = k \quad (12)$$

Parametr měřítka β lze vypočítat z rovnice přímky následujícím způsobem:

$$q = -\alpha \cdot \ln(\beta) \quad (13)$$

$$\ln(\beta) = - \left(\frac{q}{\alpha} \right) \quad (14)$$

$$\beta = \exp \left[- \left(\frac{q}{\alpha} \right) \right] \quad (15)$$

Tabulka 1 zobrazuje část vypočítaných hodnot pro následné získání hodnot parametrů tvaru α a parametru měřítka β Weibullova rozdělení.

Tab. 1 Bernardova aproximace funkce $F_i(t)$ a výpočet hodnot pro osu x a y dob provozu do poruchy t (zkráceno)

Pořadové číslo i	Doba provozu do poruchy t	Bernardova aproximace $F_i(t)$	$x = \ln(t)$	$y = \ln\{-\ln[1-F(t)]\}$
...
2213	995,957	0,63213	6,90370	0,00002
2214	996,424	0,63241	6,90417	0,00080
2215	996,708	0,63270	6,90446	0,00157
2216	997,248	0,63298	6,90500	0,00235
2217	997,645	0,63327	6,90540	0,00313
2218	997,687	0,63356	6,90544	0,00390
2219	998,063	0,63384	6,90582	0,00468
2220	998,372	0,63413	6,90613	0,00546
2221	998,470	0,63441	6,90622	0,00623
2222	999,235	0,63470	6,90699	0,00701
2223	999,760	0,63498	6,90752	0,00779
2224	1000,152	0,63527	6,90791	0,00856
2225	1000,815	0,63556	6,90857	0,00934
...

Aplikací lineární regrese lze z hodnot v tabulce 1 získat předpis (16) lineární funkce ve tvaru:

$$y = 2,00485281x - 13,83335872 \quad (16)$$

Grafické vyjádření výpočtu rovnice přímky je uvedeno na obrázku 3 a 4.

Pomocí již odvozených vztahů (7-15) je možné vypočítat hodnoty parametrů Weibullova rozdělení pro doby provozu do poruchy t :

$$\alpha_t = k = 2,0049 \quad (17)$$

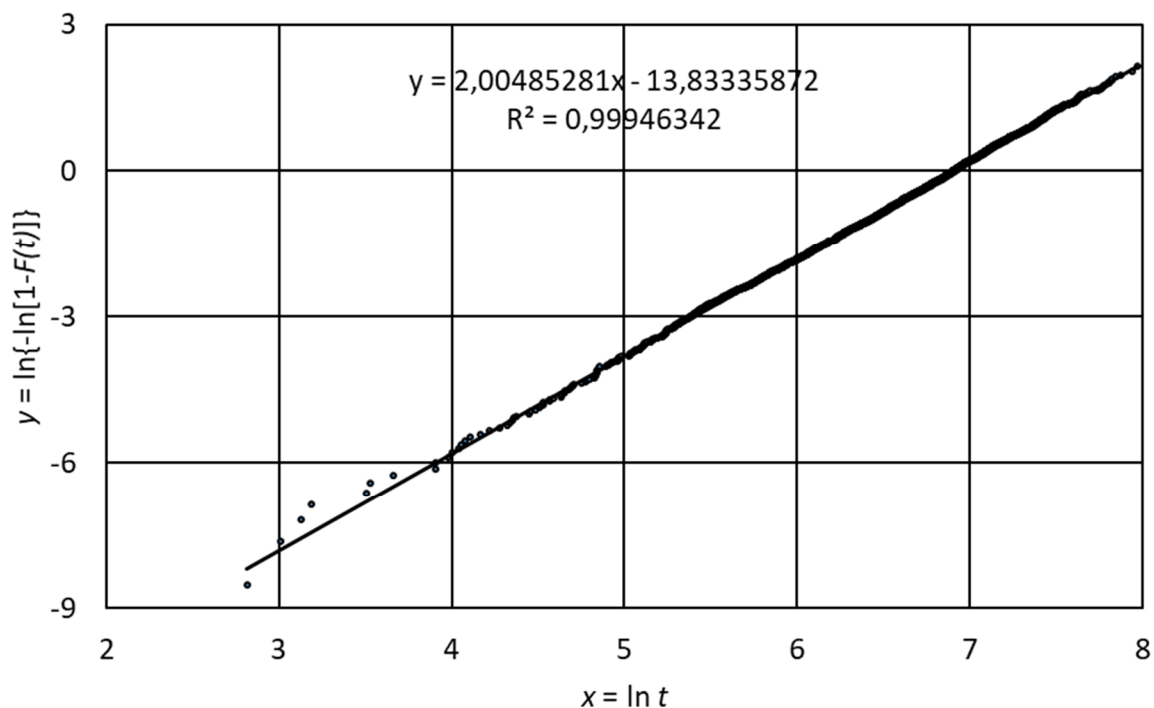
$$\beta_t = \exp\left[-\left(\frac{q}{\alpha_t}\right)\right] = \exp\left[-\left(\frac{-13,83335872}{2,00485281}\right)\right] = 992,213 \quad (18)$$

Analogicky lze postupovat při výpočtu parametrů Weibullova rozdělení v případě diagnostického signálu S_d :

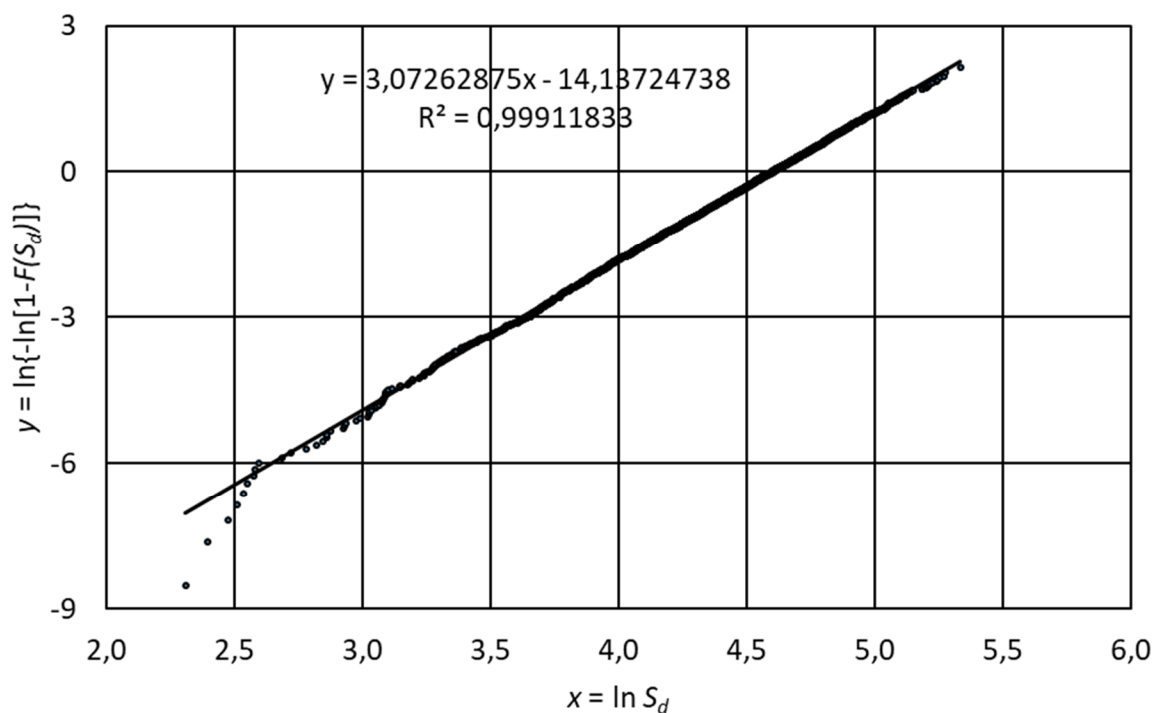
$$y = 3,07262875x - 14,13724738 \quad (19)$$

$$\alpha_{S_d} = k = 3,0726 \quad (20)$$

$$\beta_{S_d} = \exp\left[-\left(\frac{q}{\alpha_{S_d}}\right)\right] = \exp\left[-\left(\frac{-14,13724738}{3,07262875}\right)\right] = 99,587 \quad (21)$$

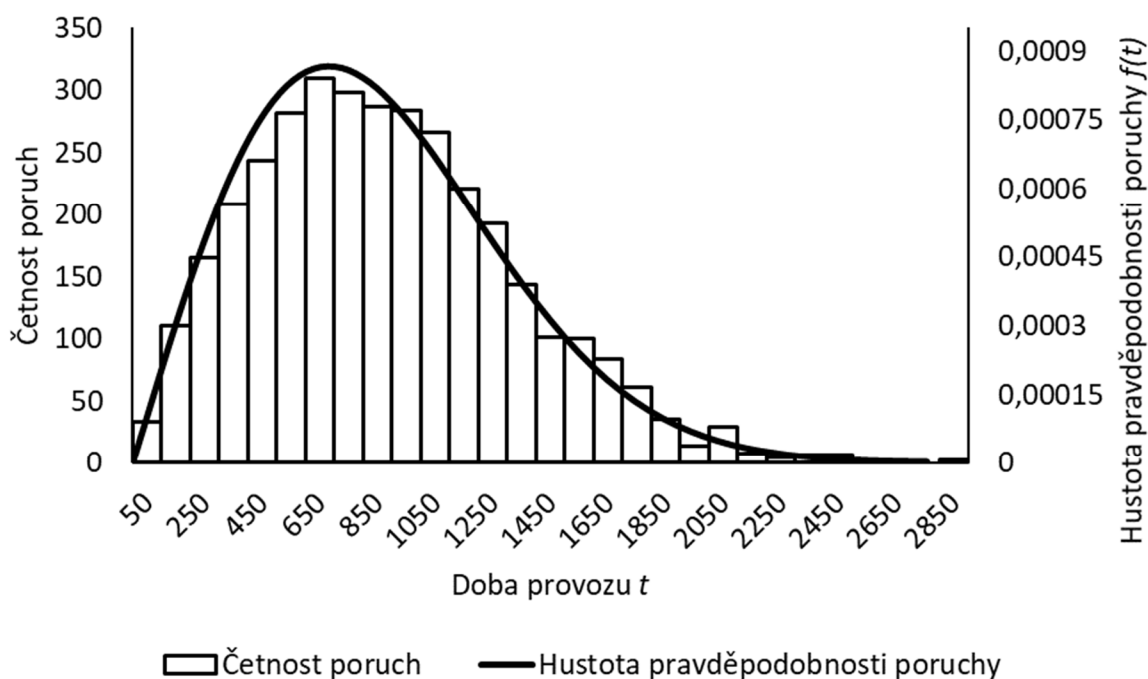


Obr. 3 Grafické vyjádření výpočtu rovnice přímky pomocí lineární regrese pro doby provozu do poruchy t

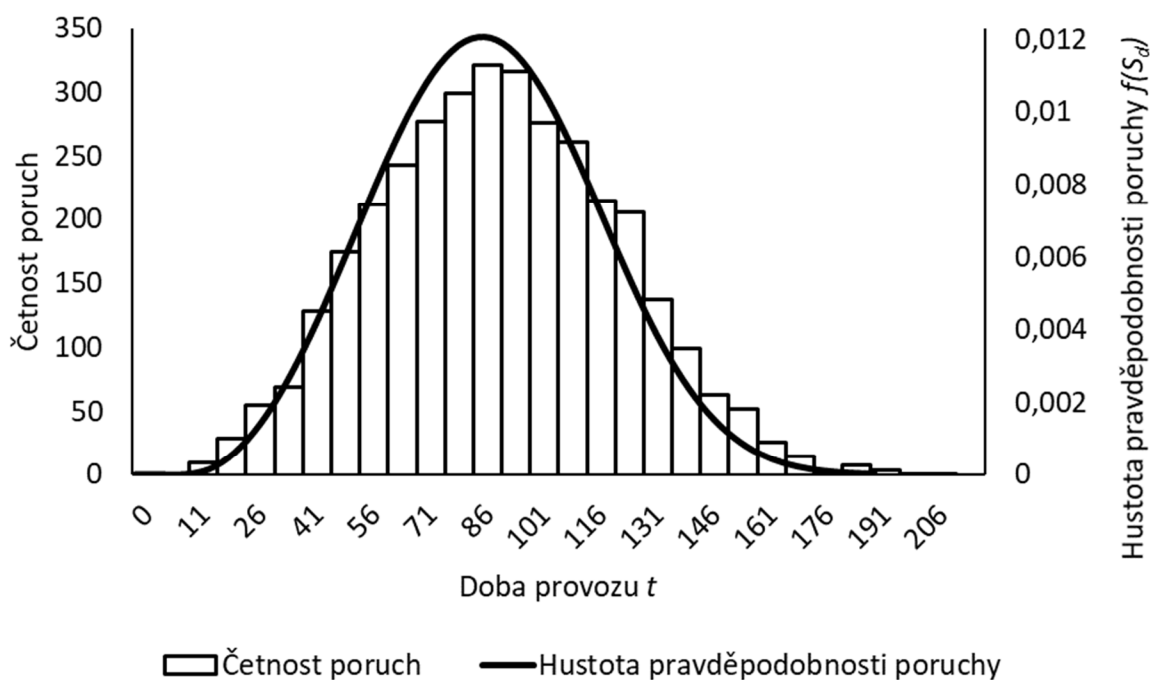


Obr. 4 Grafické vyjádření výpočtu rovnice přímky pomocí lineární regrese pro hodnoty diagnostického signálu S_d v okamžiku poruchy

Pro ověření vhodnosti vypočítaných bodových odhadů parametrů Weibullova rozdělení byl použit χ^2 test dobré shody. Statistický test prokázal vhodnost vypočítaných hodnot, což je ostatně i graficky zobrazeno na obrázku 5 a 6. [7]



Obr. 5 Histogram četností doby provozu do poruchy t a průběh teoretické hustoty pravděpodobnosti poruchy $f(t)$



Obr. 6 Histogram četností hodnot diagnostického signálu S_d těsně před okamžikem poruchy a průběh teoretické hustoty pravděpodobnosti poruchy $f(S_d)$

Vypočítané parametry Weibullova rozdělení (17-21) lze využít pro optimalizaci preventivní údržby výrobního zařízení.

Každý **systém údržby** má vliv na ekonomiku provozu a údržby strojů a zařízení.

K základním systémům údržby patří:

- údržba po poruše** (okamžitá a odložená),
- preventivní periodická údržba** (s předem stanovenými intervaly),
- preventivní diagnostická údržba** (podle technického stavu s predikcí dispoziční doby provozu). [9, 11]

Pokud po provedení výpočtu parametrů Weibullova rozdělení dosáhne parametr tvaru $\alpha < 1$, potom jde o **časné poruchy, jejichž hustota pravděpodobnosti klesá**. Bývá to období záběhu, nebo při náběhu nového výrobního zařízení. Během tohoto období je třeba vznikající poruchy pečlivě analyzovat a příčiny poruch odstraňovat. Pokud parametr tvaru $\alpha = 1$, nebo velmi blízké jedné, jedná se o exponenciální rozdělení hustoty poruch, **intenzita poruch je konstantní** a periodická preventivní údržba nemá vliv na úspěšné předcházení poruchám. Údržbářům zbývá hledání vhodné diagnostické metody pro predikci poruchy, lepší materiálové a konstrukční řešení apod. Na druhé straně je to období stabilního provozu. Pokud parametr $\alpha > 1$, potom je **intenzita poruch s dobou provozu rostoucí**, zařízení stárne a preventivní periodická (někdy také věková) údržba má šanci na úspěch a může předcházet nežádoucím poruchám. [1, 2]

4. Výpočetní postup při optimalizaci preventivní údržby

Pro **optimalizaci preventivní údržby** je nutné sledovat tyto zpravidla nákladové, ale i jiné položky a ukazatele:

- náklady na údržbu po poruše** (náklady na primární a sekundární (závislé) poruchy, držení zásob NDM, ztráty výroby, environmentální dopady, bezpečnost, pohotovost údržbářů) N_{up} (Kč), [12]
- ztráty v důsledku údržby po poruše** (důsledek poruchy – nežádoucího jevu) Z_{up} (Kč)
 $Z_{up} = N_{up} - N_{pu}$ (Kč),
- náklady na preventivní údržbu** (náklady na plánování údržby a NDM, náklady na vlastní preventivní údržbu **bez** nákladů na závislé poruchy, držení zásob ND, ztráty výroby, environmentální dopady, bezpečnost, pohotovost údržbářů) N_{pu} , (Kč),
- doba provozu do poruchy** t_{up} .
- pravděpodobnost poruchy** $F(t_{pu})$ v závislosti na době (předem stanovený interval) provozu do preventivní údržby t_{pu} .
- jednotkové náklady na diagnostiku** (změření diagnostického signálu a jeho vyhodnocení), predikci a plánování údržby u_d (Kč/h),
- pravděpodobnost poruchy** $F(S_{dm})$ v závislosti na mezí hodnotě diagnostickém signálu (hodnota signálu, po níž dojde bezprostředně k poruše) S_{dm} ,
- mezní hodnota diagnostického signálu**, po níž bezprostředně dojde k poruše - (vůle, teplota, napětí, proud, vibrace, obsah nečistot v oleji apod.) S_{dm} ,
- doba provozu i -tého objektu, žijícího při stavu (diagnostickém signálu) S_d , $t_i(S_d)$ (h),
- doba provozu (fyzický život) j -tého objektu, který při stavu S_{dm} ukončil život $t_j(S_{dj})$. [10]

Demonstrováný příklad lze rozšířit o chybějící vstupní ukazatele (Tabulka 2).

Tab. 2 Vstupní ukazatele nákladových položek údržby

Název ukazatele	Označení ukazatele	Hodnota ukazatele
Náklady na údržbu po poruše	N_{up}	2.500.000,- Kč
Náklady na preventivní údržbu	N_{pu}	200.000,- Kč
Ztráty v důsledku údržby po poruše	Z_{up}	2.300.000,- Kč
Jednotkové náklady na diagnostiku	u_d	40,- Kč/h

Získané ukazatele o údržbě je třeba dosadit do následujících vztahů teorie obnovy:

1. **Jednotkové náklady na údržbu po poruše** $u_{up}(MOTTF)$ jsou dány podílem nákladů na údržbu po poruše a střední doby provozu do poruchy a vypočítají se podle vztahu (22):

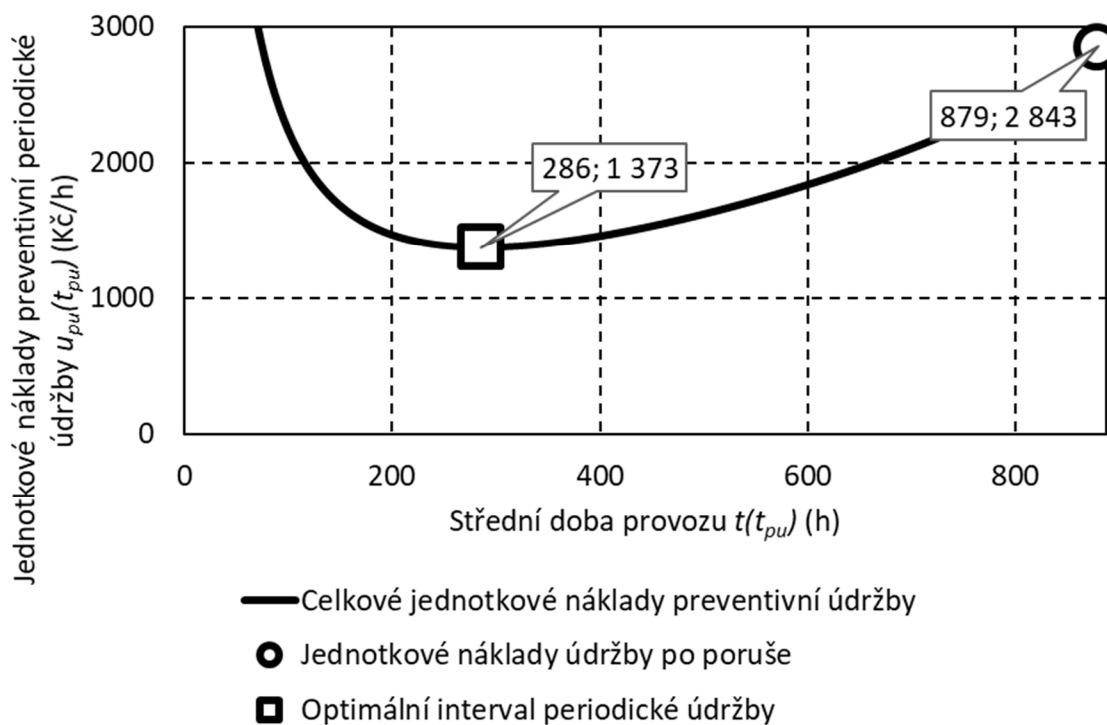
$$u_{up}(MOTTF) = \frac{N_{up}}{MOTTF} = \frac{N_{up}}{\beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} = \frac{2.500.000}{992,216 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha \cdot 2,0049}\right)} = 2.843,2 (\text{Kč/h}) \quad (22)$$

kde: N_{up} jsou náklady na údržbu po poruše (náklady na primární a sekundární (závislé) poruchy, držení zásob NDM, ztráty výroby, environmentální dopady, bezpečnost, pohotovost údržbářů); Γ – Gamma funkce.

2. **Jednotkové náklady na preventivní periodickou údržbu** $u_{pu}(t_{pu})$ (Obrázek 7) jsou dány opět podílem, kde v čitateli je součet nákladů na preventivní údržbu vynásobenými pravděpodobnostmi bezporuchového provozu pro zvolený interval periodické údržby (jde o stav bez poruch) a nákladů na údržbu po poruše vynásobených pravděpodobnostmi poruchy pro zvolený interval periodické údržby (jde o stav s výskytem poruch), a kde ve jmenovateli je střední doba provozu do provedení preventivní periodické údržby a vypočítají se podle vztahu (23):

$$u_{pu}(t_{pu}) = \frac{N_{pu} \cdot R(t_{pu}) + N_{up} \cdot F(t_{pu})}{\bar{t}(t_{pu})} = \min \Rightarrow t_{pu} = t_{puo} \quad (23)$$

kde: $R(t_{pu})$ je pravděpodobnost bezporuchového provozu v době t_{pu} , $F(t_{pu})$ je pravděpodobnost poruchy v intervalu periodické údržby t_{pu} , $\bar{t}(t_{pu})$ je střední doba provozu do provedení preventivní periodické údržby s intervalem t_{pu} a t_{puo} je optimální interval periodické údržby.



Obr. 7 Průběh celkových průměrných jednotkových nákladů preventivní periodické údržby

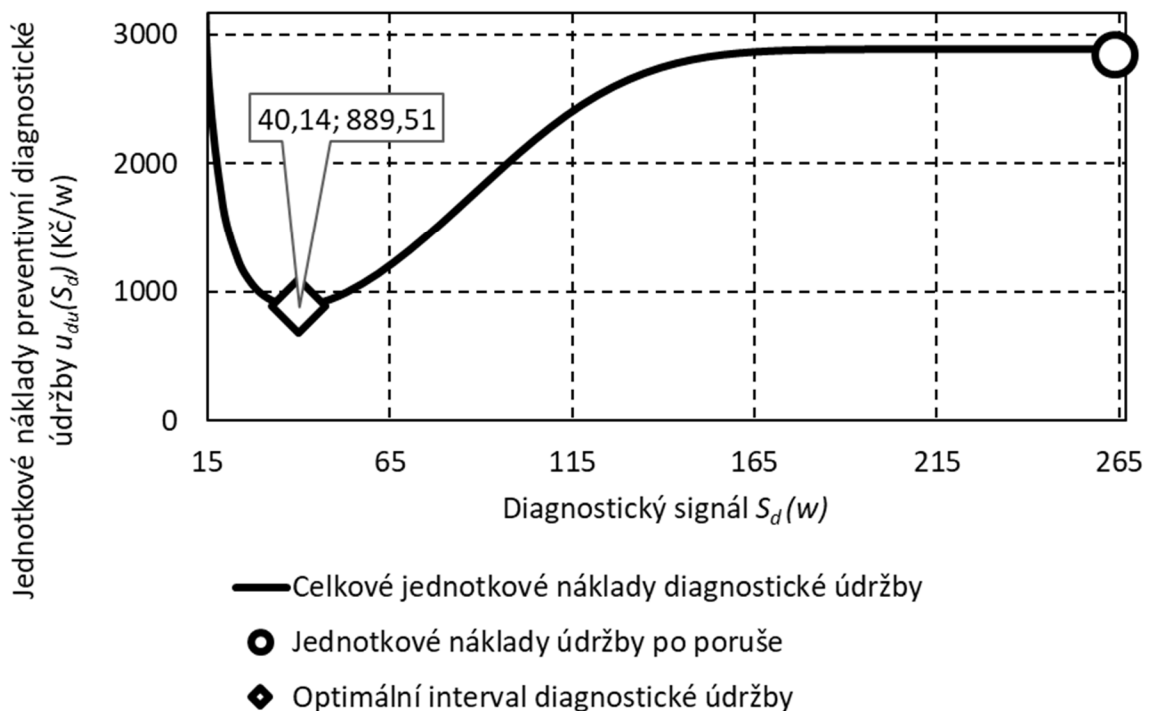
Střední dobu provozu do provedení preventivní periodické údržby $\bar{t}(t_{pu})$ v intervalu t_{pu} lze vypočítat jako integrál pravděpodobnosti bezporuchového provozu $R(t)$ podle vztahu (24):

$$\bar{t}(t_{pu}) = \int_{t_p=0}^{t_{pu}} R(t) dt \quad (24)$$

3. **Jednotkové náklady na preventivní diagnostickou údržbu $u_{du}(S_d)$** (Obrázek 8) jsou dány opět podílem, kde v čitateli je součet nákladů na preventivní údržbu vynásobenými pravděpodobnostmi bezporuchového provozu pro zvolenou hodnotu diagnostického signálu S_d (jde o stav, kdy se předchází poruchám) a nákladů na údržbu po poruše vynásobených pravděpodobnostmi poruchy pro zvolenou hodnotu diagnostického signálu S_d (jde o stav, kdy se nedá předejít poruchám), a kde ve jmenovateli je střední doba provozu do provedení diagnostické údržby při hodnotě diagnostického signálu S_d a vypočítají se podle vztahu (25):

$$u_{du}(S_d) = \frac{N_{pu} \cdot R(S_d) + N_{up} \cdot F(S_d)}{\bar{t}(S_d)} + u_d = \frac{N_{pu} + Z_{up} \cdot F(S_d)}{\bar{t}(S_d)} = \min \Rightarrow S_d = S_{do}$$

kde: S_d je obecný diagnostický signál (jde o proměnnou veličinu v intervalu S_{dz} až S_{dmax} , S_{dz} je počáteční hodnota diagnostického signálu po uvedení objektu do provozu, S_{dmax} je maximální hodnota diagnostického signálu, při níž došlo k poruše, S_{do} je optimální velikost diagnostického signálu pro údržbu, $R(S_d)$ je pravděpodobnost bezporuchového provozu pro zvolenou hodnotu diagnostického signálu S_d , $F(S_d)$ je pravděpodobnost poruchy pro zvolenou hodnotu diagnostického signálu S_d , u_d jsou jednotkové náklady na diagnostiku a $\bar{t}(S_d)$ je střední doba provozu do provedení preventivní diagnostické údržby.

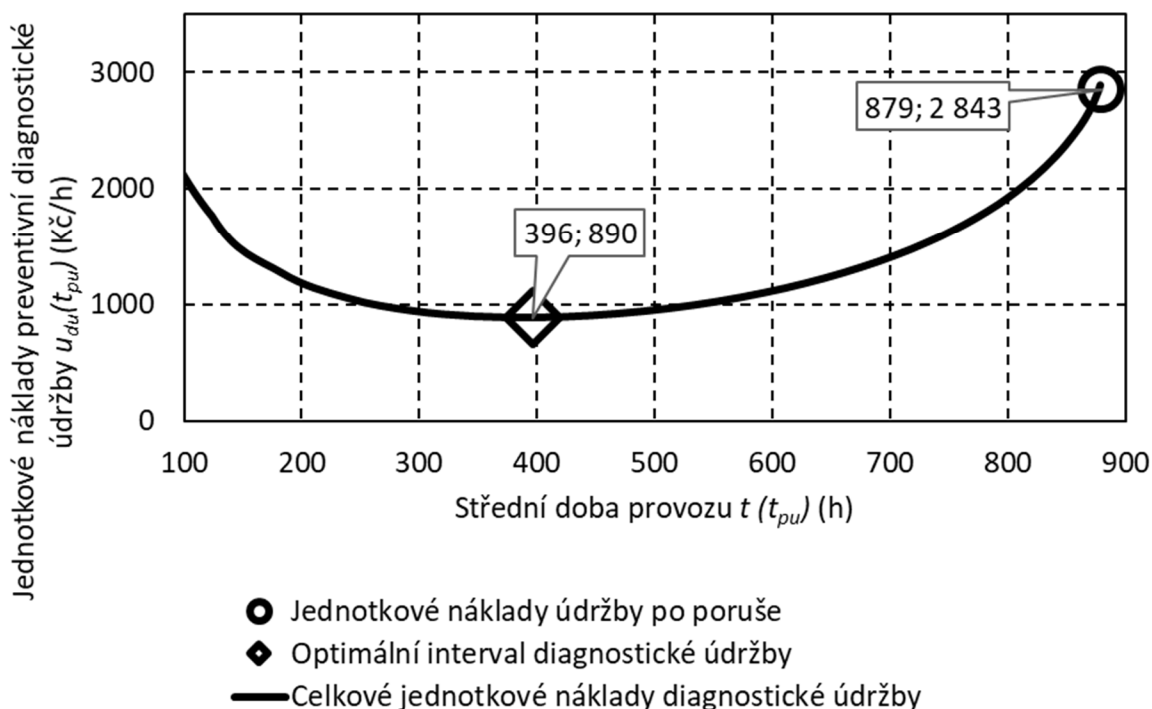


Obr. 8 Průběh průměrných jednotkových nákladů preventivní diagnostické údržby v závislosti na diagnostickém signálu

Střední dobu provozu do provedení preventivní diagnostické údržby $\bar{t}(S_d)$ pro velikost signálu S_d vypočítáme podle vztahu (26):

$$\bar{t}(S_d) = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{m(S_d)} t_i(S_d) + \sum_{j=1}^{n-m(S_d)} t_j(S_d) \right] \quad (26)$$

kde: $t_i(S_d)$ je doba provozu i -tého objektu, žijícího při stavu S_d , $t_j(S_{dm})$ je doba provozu (fyzický život) j -tého objektu, který při stavu S_{dm} ukončil život a při stavu S_d již nežije, $m(S_d)$ je počet objektů žijících při stavu S_d a n je počet všech sledovaných objektů daného typu.



Obr. 9 Průběh průměrných jednotkových nákladů preventivní diagnostické údržby v závislosti na střední době provozu

Tab. 3 Vypočítané ukazatele jednotlivých strategií údržeb

Ukazatel	Strategie údržby		
	Údržba po poruše	Preventivní periodická údržba	Preventivní diagnostická údržba
u (Kč/h)	2.843	1.373	890
\bar{t} (h)	879	286	396
R	0	0,92	0,94
t (h)	-	295	-
S_{do} (w)	-	-	40

Dosažením do výpočetních vztahů získáme průběhy celkových jednotkových nákladů na údržbu preventivní a diagnostické údržby. Pro rozhodnutí, kterou strategii údržby zvolit je nezbytné porovnat výši jednotkových nákladů údržby po poruše s minimy průběhů celkových jednotkových nákladů na údržbu preventivní a diagnostické údržby (Tabulka 3).

5. Závěr

Z dosažených výsledků pro tento konkrétní případ je patrné, že nevhodnější strategií údržby je preventivní diagnostická údržba, která má nejnižší průměrné jednotkové náklady oproti preventivní periodické údržbě a údržbě po poruše. Mimoto má preventivní diagnostická údržba delší interval střední hodnoty doby provozu oproti preventivní periodické údržbě a zároveň nižší hodnotu pravděpodobnosti poruchy. Uvedené výsledky optimalizace jsou platné pro konkrétní vstupní hodnoty. V případě, že dojde ke změně vstupních hodnot, může vycházet jiná strategie údržby jako optimální.

Navržená metodika zpracování dat poměrně jednoduchým způsobem umožňuje na základě dostupných dat stanovit optimální interval preventivní údržby pro konkrétní strojní objekt, a to jak pro dobu provozu, tak pro hodnoty sledovaných diagnostických signálů. Kromě toho lze pomocí změny vstupních hodnot modelovat různé případy, které mohou potenciálně nastat a na základě vstupních dat jednoduše zjistit, jakým způsobem dojde ke změně optimalizovaných veličin. Zároveň by bylo vhodné navrženou metodiku zpracování dat, zahrnout například formou modulu do informačních systémů využívající prvky Průmyslu 4.0.

Poděkování

Článek vznikl za podpory Ministerstva průmyslu a obchodu, program TRIO - projekt FV20286 - Informační systém řízení údržby s nadstavbou benchmarkingu a s přihlédnutím k výzvě Průmyslu 4.0, interní číslo ČZU 2017: 31 190/1484/31 4802.

Použitá literatura

- [1] ALEŠ, Z. a LEGÁT, V.: Stanovení parametrů Weibullova rozdělení hustoty pravděpodobnosti poruch v MS Excel. In: Weibullovo rozdělení náhodných veličin: Materiály 64. semináře Odborné skupiny pro spolehlivost. Praha: Česká společnost pro jakost, 2016, s. 12-23. ISBN 978-80-02-02696-9.
- [2] ALEŠ, Z. a LEGÁT, V.: Weibullova analýza a její využití pro optimalizaci údržby. In: Středoevropské fórum údržby 2016: sborník mezinárodní odborné konference. Konferenční centrum AV ČR - zámek Liblice: Česká společnost pro údržbu, 2016, s. 62-70. ISBN 978-80-213-2668-2.
- [3] ALEXANDER, M. a KUSLEIKA, D.: Excel 2016 power programming with VBA. Indianapolis, IN: Wiley, 2016. ISBN 9781119067726.
- [4] ČSN EN 61649 (010653): 2009 Weibullova analýza
- [5] ČSN IEC 50(191): 1993 Mezinárodní elektrotechnický slovník. Kapitola 191: Spolehlivost a akost' služieb
- [6] FAMFULÍK, J. MÍKOVÁ, J. a KRZYŽANEK, R.: Teorie údržby. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-248-1509-1.
- [7] HOLUB, R. Bodové a intervalové odhady ukazatelů spolehlivosti. In: Zpracování dat o spolehlivosti z provozu: 7. setkání odborné skupiny pro spolehlivost. Praha: Česká společnost pro jakost, 2002, s. 9-16.
- [8] HRUBÁ, J. a SLAVÍK, V.: Matematika I. Praha. NORMA, 1998.
- [9] JURČA, V. HLADÍK T. a ALEŠ, Z.: Optimization of preventive maintenance intervals. Eksploatacja i niezawodnosc, Maintenance and Reliability. 2008, 10(3), 41-44. ISSN 1507-2711.
- [10] LEGÁT, V. a kol.: Systémy managementu jakosti a spolehlivosti v údržbě. 1. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2007. ISBN 978-800-2019-497.
- [11] LEGÁT, V. STÁVEK, M. A ALEŠ, Z.: Preventivní údržba - cesta k vyšší kvalitě a efektivitě výroby. In: Sborník konference Kvalita 2014, Ostrava 2014

- [12] LEGÁT, V. STÁVEK, M. a ALEŠ, Z.: Preventivní údržba - cesta k vyšší výrobě a tržbám. In: Sborník konference Národní fórum údržby 2014, Štrbské Pleso, SSÚ Bratislava 2014, ISBN 978-80-554-0880-4
- [13] MAŠÍN, I. a LEPŠÍK. P.: Analytické a kreativní postupy v údržbě strojů a zařízení. V Liberci: Technická univerzita, 2015. ISBN 978-80-7494-224-2.

Autoři

doc. Ing Zdeněk Aleš, Ph.D., Ing Jindřich Pavlů, Ph.D., prof. Ing. Václav Legát, DrSc., Ing. Bohuslav Peterka, Ph.D

Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, katedra jakosti a spolehlivosti strojů, 165 21 Praha 6 – Suchbát

E-mail: ales@tf.czu.cz, pavluj@tf.czu.cz, legat@tf.czu.cz, peterka@tf.czu.cz

220 – Česká společnost pro jakost

ISBN 978-80-02-02819-2

Zajištění údržby v koncepci Průmysl 4.0,

Sborník přednášek, kolektiv autorů, 1. vydání, rok vydání 2018, vazba brožovaná

