



SPOLEHLIVOST SLOUŽÍ ÚDRŽBĚ

Materiály z 65. semináře Odborné skupiny pro spolehlivost,
konaného dne 6. 12. 2016 v Praze

Česká společnost pro jakost, Novotného lávka 5, 110 00 Praha 1, [www. csq.cz](http://www.csq.cz)
© ČSJ 2016

Obsah

K čemu údržba potřebuje spolehlivost <i>Prof. Ing. Václav Legát, DrSc.</i>	3
Využití charakteristik bezporuchovosti k optimalizaci preventivní údržby s podporou Excelu <i>Ing. Zdeněk Aleš, Ph.D.</i>	17
Poruchové stavy – typická poškození strojních součástí <i>Prof. Ing. Josef Pošta, CSc.</i>	29

K ČEMU ÚDRŽBA POTŘEBUJE SPOLEHLIVOST

prof. Ing. Václav Legát, DrSc

Klíčová slova

požadavky na kvalitu údržby, udržovatelnost, zajištěnost údržby, ukazatele kvality

Anotace

Autor v příspěvku definoval základní charakteristiky spolehlivosti (bezporuchovost, udržovatelnost, zajištěnost a podporu údržby) se zaměřením především na udržovatelnost a zajištěnost údržby. Dále definoval požadavky na kvalitu údržby a stanovil inherentní charakteristiky objektů a vybrané provozní znaky procesů údržby, které ovlivňují její kvalitu. Autor ukázal na využití charakteristik a nástrojů spolehlivosti v oblasti plnění požadavků na kvalitu údržby. V neposlední řadě bylo předloženo několik motivačních příkladů, proč by manažeři údržby měli studovat a používat nástroje a ukazatele spolehlivosti.

Abstract

Author defined in this paper basic dependability characteristics (reliability, maintainability, supportability and maintenance support), particularly with a view to maintainability and maintenance support. Further he defined requirements on maintenance quality and determined inherent characteristics of objects and chose operating characteristics of maintenance processes which influence the maintenance quality. Author showed a utilization of dependability characteristics and tools in the field of maintenance quality requirements fulfillment level. Last but not least there was submitted some motivation examples, why maintenance manager should be study and use dependability tools and measures.

1. Úvod

Kvalitní údržba je taková údržba, která splňuje požadavky na [1]:

- a) *udržování hmotného majetku (HM) v provozuschopném a způsobilém stavu,*
- b) *předcházení vzniku poruch a následujících poruchových stavů,*
- c) *operativní odstraňování vzniklých poruch,*
- d) *snižování environmentálních dopadů provozu výrobního zařízení,*
- e) *zajištění bezpečnosti provozu,*
- f) *snižování rizik,*
- g) *vynakládání optimálních nákladů na investice a údržbu,*
- h) *management majetku a jeho údržby k excelenci s používáním metod a nástrojů nejlepší světové praxe.*

Spolehlivost je schopnost fungovat tak, jak je požadováno, a tehdy, když je to požadováno [2]. Do spolehlivosti se zahrnuje pohotovost, bezporuchovost, zotavitelnost, udržovatelnost a zajištěnost údržby a v některých případech i jiné charakteristiky, jako je životnost, bezpečnost a zabezpečení. Spolehlivost se používá popisně jako souhrnný termín pro charakteristiky kvality objektu, které se vztahují k času.

Bezporuchovost je schopnost fungovat v daných podmínkách během daného časového intervalu bez poruchy tak, jak je požadováno [2]. Doba trvání **časového**

intervalu může být vyjádřena v jednotkách vhodných pro dotýčný objekt, jako je např. kalendářní doba, provozní cykly, ujetá vzdálenost atd., a jednotky mají být vždy jasné stanoveny. Mezi dané **podmínky** se zahrnují hlediska, která ovlivňují bezporuchovost, jako jsou: režim provozu, úroveň namáhání, podmínky prostředí a údržba. Bezporuchovost může být **kvantifikována** s použitím vhodných ukazatelů.

Udržovatelnost je *schopnost objektu v daných podmínkách používání a údržby být udržen ve stavu nebo být navrácen do stavu, ve kterém funguje tak, jak je požadováno* [4]. Dané podmínky zahrnují hlediska, která ovlivňují udržovatelnost, jako jsou: místo údržby, přístupnost, údržbářské postupy a zdroje údržby. Udržovatelnost může být kvantifikována s použitím vhodných ukazatelů.

Zajištěnost údržby je definována jako *efektivnost organizace ohledně zajištění údržby* [2]. Zajištěnost údržby může být kvantifikována s použitím vhodných ukazatelů.

Podpora údržby (zajištění údržby) je definována jako *poskytování zdrojů pro udržování objektu* [2]. Mezi zdroje se zahrnují lidské zdroje, podpůrné zařízení, materiály a náhradní díly, vybavení pro údržbu, dokumentace a informace a informační systémy údržby.

Zajištěnost údržby, jinými slovy, představuje schopnost organizace poskytující údržbářské služby (údržbářský útvar, servisní organizace) zajišťovat podle požadavků v daných podmínkách prostředky (zdroje – podpora údržby) potřebné pro údržbu podle dané koncepce údržby. Zajištěnost údržby tedy vytváří nezbytné zázemí pro hladký a spolehlivý průběh všech údržbářských procesů [3].

Cílem tohoto příspěvku je ukázat vztah spolehlivosti, ukazatelů a nástrojů spolehlivosti na kvalitu procesů údržby a dále, v jakých oblastech managementu a inženýrství údržby lze tyto ukazatele využít.

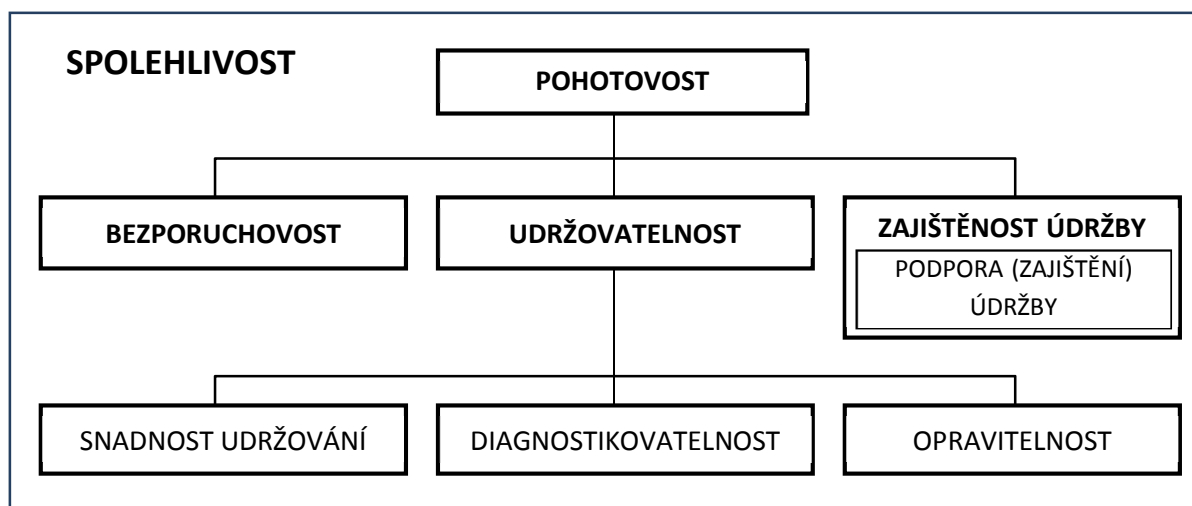
Začlenění termínů udržovatelnost, zajištěnost a podpora údržby do spolehlivosti je znázorněno na obr. 1.

2. Stručná kvantifikace spolehlivosti

Lze říci, že manažeři údržby za posledních patnáct let bezesporu přispěli ke zlepšení provozní spolehlivosti, a tím i spolehlivosti produktů (výrobků a služeb). Jestliže dnes mnozí manažeři údržby zvládají metody FMEA a FMECA, nelze to již tvrdit o zvládnutí elementárních nástrojů kvantifikace spolehlivosti. Proto uveďme v tomto příspěvku několik elementárních kvantitativních znaků spolehlivosti, s jejichž naplňováním by se měl manažer údržby zabývat či je uplatňovat v praxi.

Je nutno předeslat, že rozlišujeme **inherentní spolehlivost** (ta je do produktu „vprojektovaná“, „vkonstruovaná“, je produktu vlastní a měří se v přesně definovaných a stabilních, zpravidla laboratorních podmínkách provozu a údržby) a **provozní spolehlivost** (měří se v reálných podmínkách provozu a údržby, které se zpravidla vyznačují mnohem vyšší variabilitou).

Při výpočtu ukazatelů spolehlivosti je nutné rozlišovat **neopravované** objekty (porucha je řešena prostou výměnou produktu, např. žárovky, pojistky, valivá ložiska apod.) a **opravované** objekty (porucha je řešena údržbou produktu, např. stroje, zařízení, aparáty, vozidla apod.).



Obr. 1 Vztahy mezi termíny z oblasti spolehlivosti

2.1 Ukazatele spolehlivosti neopravovaných objektů

V této stati uveďme bez odvozování a zdůvodňování šest základních empirických a teoretických ukazatelů:

1. Odhad hustoty doby provozu do poruchy $\hat{f}(t)$

$$\hat{f}(t) = \frac{n_s(t) - n_s(t + \Delta t)}{n \cdot \Delta t}, \text{ teoretická hodnota } f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1)$$

kde $n_s(t)$ je počet objektů, které jsou v časovém okamžiku t ještě v provozu, $(n_s(0) = n)$, $n_s(t) - n_s(t + \Delta t)$ je počet objektů, které měly v časovém intervalu $(t, t + \Delta t)$ poruchu.

2. Odhad pravděpodobnosti poruchy $\hat{F}(t)$

$$\hat{F}(t) = \frac{n - n_s(t)}{n}, \text{ teoretická hodnota } F(t) = \int_{t=0}^t f(x) \cdot dx \quad (2)$$

kde $n_s(t)$ je počet objektů, které jsou v časovém okamžiku t ještě v provozu $(n_s(0) = n)$

3. Odhad pravděpodobnosti bezporuchového provozu $\hat{R}(t)$

$$\hat{R}(t) = \frac{n_s(t)}{n} = 1 - \hat{F}(t), \text{ teoretická hodnota } R(t) = 1 - F(t) \quad (3)$$

kde $n_s(t)$ je počet objektů, které jsou v časovém okamžiku t ještě v provozu $(n_s(0) = n)$

4. Odhad intenzity poruch $\hat{\lambda}(t)$

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n_s(t) - n_s(t + \Delta t)}{n_s(t) \Delta t}, \text{ teoretická hodnota } \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4)$$

kde $n_s(t)$ je počet objektů, které jsou v časovém okamžiku t ještě v provozu $(n_s(0) = n)$, $n_s(t) - n_s(t + \Delta t)$ je počet objektů, které měly v časovém intervalu $(t, t + \Delta t)$ poruchu.

5. Odhad střední doby do poruchy (středního života objektu) \hat{MTTF}

$$\hat{MTTF} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \text{ teoretická hodnota; } MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (5)$$

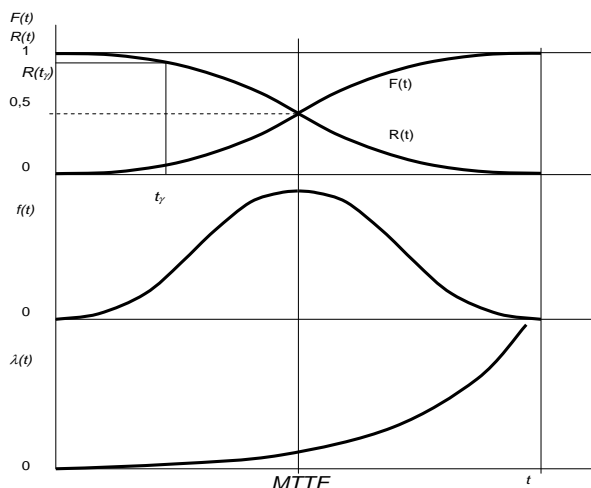
kde n je počet sledovaných objektů do poruchy,
 t_i je doba života (provozu) i -tého objektu do poruchy.

6. Gama procentní život t_γ

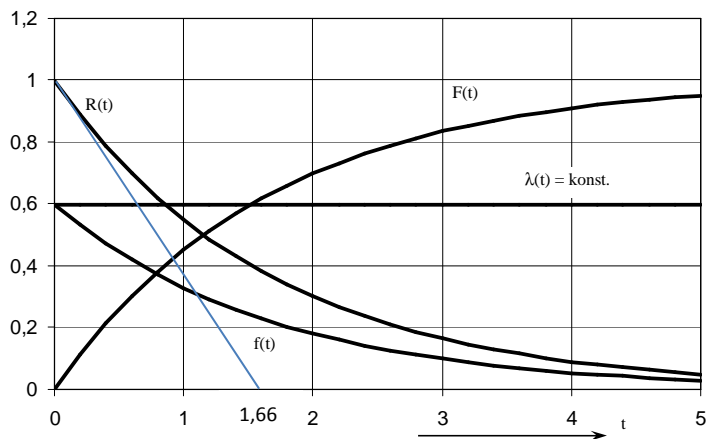
$$\hat{R}(t_\gamma) = \gamma \quad (6)$$

kde γ je kvantil náhodné veličiny - doby provozu do poruchy s pravděpodobností bezporuchového provozu $\hat{R}(t_\gamma)$.

Průběh jednotlivých funkčních závislostí pro normální useknuté rozdělení dob do poruchy je na obr. 2 a pro exponenciální rozdělení dob do poruchy je na obr. 3.



Obr. 2 Průběhy $F(t)$, $R(t)$, $f(t)$ a $\lambda(t)$ pro useknuté normální rozdělení



Obr. 3 Průběhy $F(t)$, $R(t)$, $f(t)$ a $\lambda(t)$ pro exponenciální rozdělení

2.2 Ukazatele spolehlivosti opravovaných objektů

V této stati uvedme bez odvozování a zdůvodňování pět základních empirických a teoretických ukazatelů:

1. Odhad hustoty doby do obnovy $\hat{g}_R(t)$

$$\hat{g}_R(t) = \frac{n_R(t) - n_R(t + \Delta t)}{n \cdot \Delta t}, \text{ teoretická hodnota } g_R(t) = \frac{dM(t)}{dt} \quad (7)$$

kde $n_R(t)$ je počet objektů, které nejsou v časovém okamžiku t ještě obnoveny ($n_R(0) = n$),

$n_R(t) - n_R(t + \Delta t)$ je počet objektů, které byly v časovém intervalu $(t, t + \Delta t)$ obnoveny,

n je celkový počet obnovovaných objektů (určených k obnově),

$M(t)$ je pravděpodobnost obnovy během doby t .

2. Odhad pravděpodobnosti obnovy $\hat{M}(t)$ během doby t

$$\hat{M}(t) = \frac{n - n_R(t)}{n}, \text{ teoretická hodnota } M(t) = \int_0^t g_R(x) dx \quad (8)$$

3. Odhad střední doby obnovy \hat{MTTR}

$$\hat{MTTR} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^k t_j, \text{ teoretická hodnota } MTTR = \int_0^{\infty} t \cdot g_R(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - M(t)) \cdot dt = \quad (9)$$

kde m je počet poruch (obnov) opravovaného objektu, t_j doba do obnovy (doba trvání opravy) j -té poruchy.

4. Odhad parametru proudu poruch $\hat{\Lambda}(t)$

$$\hat{\Lambda}(t) = \frac{n_F(t, t + \Delta t)}{n \cdot \Delta t}, \quad (10)$$

kde $n_F(t, t + \Delta t)$ je počet poruch pozorovaných během časového intervalu $(t, t + \Delta t)$, n je počet obnovovaných (sledovaných) objektů.

5. Odhad střední doby provozu mezi poruchami \hat{MOTBF}

$$\hat{MOTBF} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_j, \quad (11)$$

kde m je počet poruch opravovaného objektu,
 t_j je j -tá doba provozu mezi dvěma po sobě následujícími poruchami ($j - 1; j$);
 (tato doba nezahrnuje dobu do obnovy).

6. Součinitel ustálené (asymptotické) pohotovosti A je souhrnným ukazatelem spolehlivosti obnovovaných objektů a skládá se ze střední doby provozu mezi poruchami a ze střední doby do obnovy

$$A = \frac{MOTBF}{MOTBF + MTTR}, \quad (12)$$

kde $MOTBF$ je střední doba provozu mezi poruchami,
 $MTTR$ je střední doba do obnovy (obsahuje střední dobu údržby po poruše + střední dobu nezjištěného poruchového stavu a administrativního zpoždění).

Jde o nejobecnější ukazatel spolehlivosti obnovovaných objektů. Součinitel ustálené pohotovosti lze konfigurovat jinou specifikací vstupních dat. Je velmi důležité, aby ve smlouvách při nákupu strojů a zařízení byla věnována mimořádná pozornost specifikaci těchto vstupních dat pro výpočet součinitele ustálené pohotovosti.

3. Využití ukazatelů spolehlivosti v oblasti údržby

Mnoho manažerů údržby si myslí, že teorie spolehlivosti do údržby nepatří, že jde pouze o zbytečné vzorečky, že jde o neúčelné zatěžování „hlav“ praktiků, prostě, že přínos spolehlivosti k údržbě je nulový. Ukažme si dále na různých segmentech managementu údržby, že tomu tak není, že podpora z výstupů spolehlivosti je nenahraditelná a obecně zvyšuje kvalitu údržby.

3.1 Ukazatele výkonnosti údržby

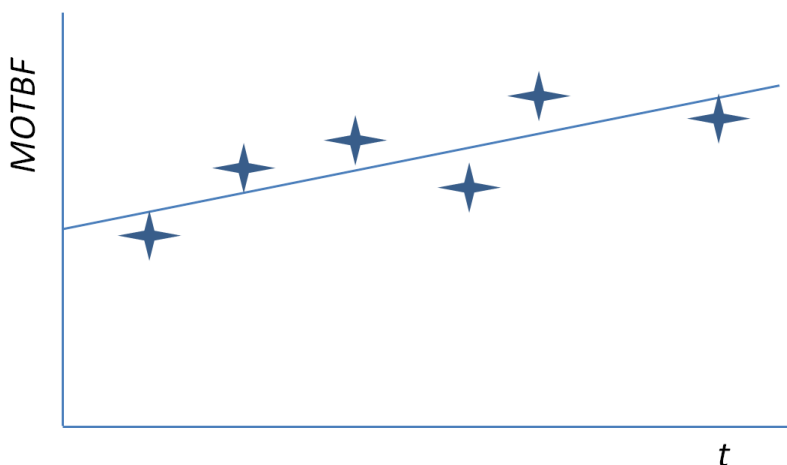
Norma ČSN EN 15341 Údržba – Klíčové indikátory výkonnosti údržby popisuje 71 indikátorů, z toho dva vycházejí přímo z teorie spolehlivosti, a to střední doba mezi poruchami a střední doba do obnovy.

a) odhad **střední doby provozu mezi poruchami** $MOTBF$ se vypočítá podle vztahu

$$MOTBF = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m OTBF_j, \quad (13)$$

kde m je počet poruch opravovaného objektu,
 $OTBF_j$ je j -tá doba provozu mezi dvěma po sobě následujícími poruchami ($j-1$; j); (tato doba nezahrnuje dobu do obnovy).

Ukazatel střední doba provozu mezi poruchami se může aplikovat na jednotlivé prvky, stroje, linky, nebo na celou dílnu. Rostoucí hodnota tohoto ukazatele vyjadřuje zvyšující se bezporuchovost a lepší kvalitu preventivní údržby a opačně – viz obr. 4. Střední doba provozu mezi poruchami nemůže ovšem růst do nekonečna.



Obr. 4 Správný (rostoucí) trend střední doby provozu mezi poruchami $MOTBF$ v závislosti na kalendářní době t

b) odhad **střední doby do obnovy** $M\hat{TTR}$

$$M\hat{TTR} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^k t_j \quad (14)$$

kde m je počet poruch (obnov) opravovaného objektu,
 t_j je doba do obnovy j -té poruchy.

Poznámka: **Obnova** je **jev** spočívající v ukončení poruchového stavu, stejně jako **porucha** je **jev** spočívající v ukončení bezporuchového stavu. Doba do obnovy se skládá z doby nezjištěného poruchového stavu, z doby administrativního zpoždění, z doby logistického zpoždění a z doby vlastní opravy.

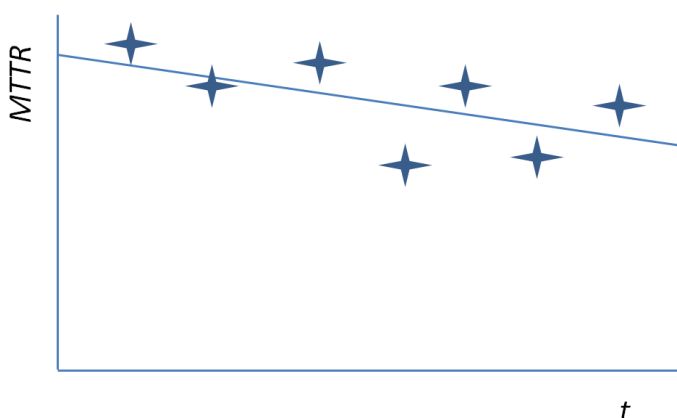
Ukazatel střední doba do obnovy se může aplikovat na jednotlivé strojní prvky, stroje, linky, nebo na celou dílnu. Klesající hodnota tohoto ukazatele vyjadřuje zvyšující se udržitelnost, zajištěnost údržby a lepší kvalitu údržby a opačně – viz obr. 5. Střední doba do obnovy strojních zařízení nemůže klesat až k nule. Výjimky mohou existovat u softwaru.

3.2 Výpočet potřeby náhradních dílů (ND)

Základním podkladem pro výpočet počtu ND je intenzita poruch λ . V tomto zjednodušeném modelu se předpokládá, že každá porucha je řešena výměnou porouchaného dílu za díl nový. Variabilita potřeby ND se řídí podle normálního rozdělení. Střední počet požadovaných ND na určité období $n_{ND}(T)$ je dán součinem intenzity poruch λ a délkou tohoto období T (požadovaná doba dostupnosti ND). Vzhledem k variabilitě spotřeby ND a požadované konfidenční úrovni nevyčerpání zásoby je třeba tuto střední hodnotu navýšit o součin směrodatné proměnné z a odmocniny střední zásoby $\sqrt{\lambda \cdot T}$, čili [5]

$$n_{ND}(T) = \lambda \cdot T + z \cdot \sqrt{\lambda \cdot T}, \quad (15a)$$

kde λ je intenzita poruch náhradního dílu,
 T je požadovaná doba dostupnosti ND,
 z je směrodatná proměnná; je to kvantil normovaného normálního rozdělení a jeho velikost hledáme pro požadovanou pravděpodobnost (konfidenční úroveň), že během doby T nedojde k vyčerpání zásoby ND, např. pro $z = 3$ je pravděpodobnost (konfidenční úroveň) nevyčerpání zásoby 0,99865.



Obr. 5 Správný (klesající) trend střední doby do obnovy MTTR v závislosti na kalendářní době t

Příklad

Máme ve stroji 10 valivých ložisek. Předpokládejme, že všechna ložiska mají stejnou intenzitu poruch $\lambda = 0,001$ poruchy za hodinu. Stroj je provozován 23 h za den.

$T = 23 \cdot 30 = 690$ h. Kolik ložisek se má skladovat, abychom mohli zaručit s 99,865% konfidenční úrovní ($z = 3$), že po dobu 30 dnů nedojde k vyčerpání skladu?

Dosadíme vstupní data do rovnice (15b) a vypočítáme počet ND

$$n_{ND}(T) = \lambda T + z \cdot \sqrt{\lambda T} = 0,001 \cdot 690 + 3 \cdot \sqrt{0,001 \cdot 690} = 3,18 \quad (15b)$$

Pro zajištění třicetidenního provozu pro 10 stejných ložisek ve stroji potřebujeme tedy $10 \cdot 3,18 = 31,8 \approx 32$ ložisek jako počáteční zásobu pro dobu 30 dnů.

3.3 Optimalizace zálohování

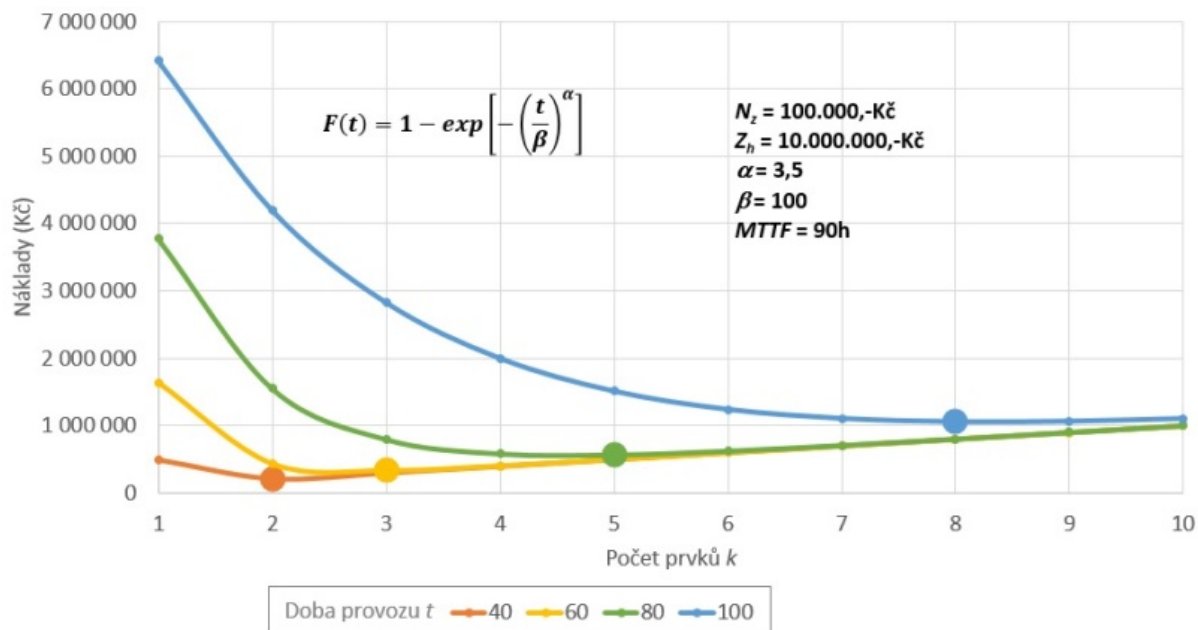
V odvětví průmyslu a elektrárenství je řada významných prvků (např. čerpadla, ochranné systémy apod.) zálohována. Záloha snižuje pravděpodobnost poruchy, resp. riziko kritické poruchy [6]. Na druhé straně rostou investiční náklady v závislosti na počtu záloh. Ukazatele spolehlivosti umožňují vytvořit jednoduchý model optimalizace nezátíženého zálohování (paralelním řazením prvků)

$$u_z(k) = k \cdot N_z + Z_h \cdot F^k(t), \quad (16)$$

kde $u_z(k)$ jsou jednotkové náklady na pořízení a riziko poruchy vztažené na stupeň zálohování k ; v teoretickém výpočtu uvažujeme k jako spojitou veličinu, ale v reálu platí, $k = 1, 2, 3, \dots$, N_z jsou náklady na pořízení jedné zálohy (pro zjednodušení uvažujeme, že základní nezátížená jednotka má stejné náklady),

Z_h jsou náklady (ztráty) vyvolané kritickou poruchou a $F(t)$ je pravděpodobnost kritické poruchy v závislosti na očekávané (plánované) době provozu (mise) t .

Na obr. 6 je vidět závislost nákladů na stupni zálohování a tam, kde jsou náklady nejmenší, tak je i optimální stupeň zálohování k_o .



Obr. 6 Princip optimalizace zálohování s využitím ukazatelů spolehlivosti (Aleš 2016)

Správně zvolený stupeň zálohování zabezpečuje nejenom hladký průběh výroby, ale i větší jistotu pro údržbáře, že zařízení bude jako celek spolehlivěji fungovat.

3.4 Výpočet rentability renovace a různých materiálových řešení

Ukazatele spolehlivosti umožňují i lépe a přesněji realizovat technicko-ekonomické výpočty, např. počítat rentabilitu (účelnost) provedení různých renovačních metod, použití různého materiálu apod. Jde o rozhodování použít k obnově nový ND, nebo starý (opotřebený) renovovat (opravit)? Vyplatí se použít na nový řezný nástroj do půdy (např. čepel, dláto, zub rypadla apod.) návar tvrdokovu, nebo ponechat nástroj pouze v původním materiálovém provedení? K odpovědím na tyto otázky nepostačí pouze srovnat absolutní náklady na jednotlivé varianty provedení, ale je třeba se ptát, jaký život jednotlivé díly dosahují? Na tuto otázku umí odpovědět nauka o spolehlivosti. Jde o to, že kritériem pro stanovení optimální varianty uplatnění renovace, nebo použitého materiálu jsou jednotkové náklady vztahované na jednotku doby provozu. Jednotkové náklady na pořízení objektu při provozu do poruchy vypočteme podle vztahu

$$u_{zm} = \frac{N_{zm}}{MTTF_{zm}} = \frac{N_{zm}}{\int_0^{\infty} R_{zm}(t) \cdot dt}, \quad (17)$$

kde u_{zm} jsou jednotkové náklady na pořízení objektu při provozu do poruchy,
 N_{zm} jsou náklady na pořízení objektu v základním materiálovém provedení,
 $MTTF_{zm}$ je střední doba provozu do poruchy objektu v základním materiálovém provedení, $R_{zm}(t)$ je pravděpodobnost bezporuchového provozu objektu v základním materiálovém provedení.

$$u_{nav} = \frac{N_{zm} + N_{nav}}{MTTF_{nav}} = \frac{N_{zm} + N_{nav}}{\int_0^{\infty} R_{nav}(t) \cdot dt}, \quad (18)$$

kde u_{nav} jsou jednotkové náklady na pořízení objektu s tvrdokovovým návarem při provozu do poruchy,
 N_{nav} jsou náklady na navaření objektu tvrdokovem,
 $MTTF_{nav}$ je střední doba provozu do poruchy objektu navařeného tvrdokovem,
 $R_{nav}(t)$ je pravděpodobnost bezporuchového provozu objektu navařeného tvrdokovem.

Při rozhodování o efektivnosti jednotlivých variant řešení porovnáme velikost průměrných jednotkových nákladů na dvě varianty řešení

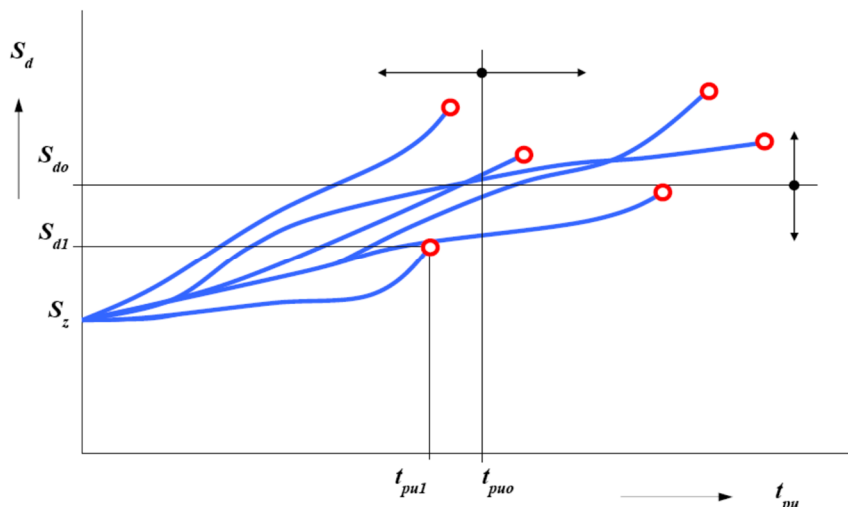
$$a) u_{zm} < u_{nav}; \text{ nebo } b) u_{zm} > u_{nav} \quad (19)$$

Výsledek řešení varianty a) znamená, že je výhodnější nenařovat, ale použít objekt pouze ze základního materiálu, výsledek řešení varianty b) znamená, že je výhodnější navařovat a použít objekt navařený tvrdokovem.

Opět na této ukázce vidíme užitečnost ukazatelů spolehlivosti a jejich uplatnění v technicko-ekonomických výpočtech.

3.5 Využití ukazatelů spolehlivosti k optimalizaci preventivní údržby

Řešení optimalizace preventivní údržby se vůbec bez znalosti ukazatelů spolehlivosti neobejde. Na obr. 7 je uvedeno základní schéma vytváření politiky (systémů) údržby [1].



Obr. 7 Základní princip politiky (systémů) údržby (údržba po poruše – údržba je prováděna po poruše – červené kroužky, periodická údržba – údržba je prováděna v předem stanoveném intervalu t_{puo} , diagnostická údržba – údržba je prováděna při dosažení předepsané hodnoty diagnostického signálu S_{do})

Základem matematického modelu je hledání optimálního intervalu t_{puo} periodické údržby a hledání optimální velikosti diagnostického signálu S_{do} . Kritériem optimalizace jsou průměrné jednotkové náklady na údržbu a riziko výskytu poruchy. Nejvhodnější je ten systém údržby pro daný objekt, který bude vykazovat **nejnižší jednotkové náklady**. K základním účelovým rovnicím patří:

a) pro **údržbu po poruše**

$$u_{up}(t_{pu}) = \frac{N_{up}}{\bar{t}(t_{pu})} = \frac{N_{up}}{\int_0^{\infty} R(t) dt}$$

b) pro **periodickou preventivní údržbu**

$$u_{pu}(t_{pu}) = \frac{N_{pu} \cdot R(t_{pu}) + N_{up} F(t_{pu})}{\bar{t}(t_{pu})} = \frac{N_{pu} + Z_{up} \cdot F(t_{pu})}{\int_{t_p=0}^{t_{pu}} R(t) dt} = \min. \Rightarrow t_{pu} = t_{puo}, \quad (20)$$

kde $u_{pu}(t_{pu})$ jsou jednotkové náklady na údržbu a riziko poruchy,

N_{pu} jsou náklady na preventivní údržbu (náklady na plánování údržby a NDM, náklady na vlastní preventivní údržbu **bez** nákladů na závislé poruchy, držení zásob NDM, ztráty výroby, environmentální dopady, bezpečnost, pohotovost údržbářů),

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),

Z_{up} jsou ztráty v důsledku údržby po poruše (riziko poruchy); ($Z_{up} = N_{up} - N_{pu}$),

$R(t_{pu})$ 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 (jednotkové náklady dosahují
 minimální hodnotu).

Střední dobu provozu do provedení preventivní periodické údržby $\bar{t}(t_{pu})$ v intervalu t_{pu}
 můžeme také vypočítat jako integrál pravděpodobnosti bezporuchového provozu $R(t)$

$$\bar{t}(t_{pu}) = \int_{t_p=0}^{t_{pu}} R(t) dt \quad (21)$$

c) pro **prediktivní diagnostickou údržbu**

$$u_{du}(S_d) = \frac{N_{pu} \cdot R(S_d) + N_{up} \cdot F(S_d)}{\bar{t}(S_d)} + u_d = \frac{N_{pu} + Z_{up} \cdot F(S_d)}{\bar{t}(S_d)} + u_d = \min. \Rightarrow S_d = S_{do} \quad (22)$$

kde: $u_{du}(S_d)$ jsou jednotkové náklady na údržbu, diagnostiku a riziko poruchy,
 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 (po bezprostředním
 překročení) 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 dobu provozu do provedení preventivní diagnostické údržby.

Nejvýhodnější politika údržby pro konkrétní objekt je taková, která vykazuje
 nejnižší jednotkové náklady na údržbu a riziko poruchy, čili

$$\left. \begin{array}{l} u_{up}(t_{up} \rightarrow \infty) \\ u_{pu}(t_{pu}) \\ u_{du}(S_d) \end{array} \right\} \text{minimum}$$

4. Přínos bezporuchovosti, udržovatelnosti a zajištěnosti údržby ke kvalitě údržby

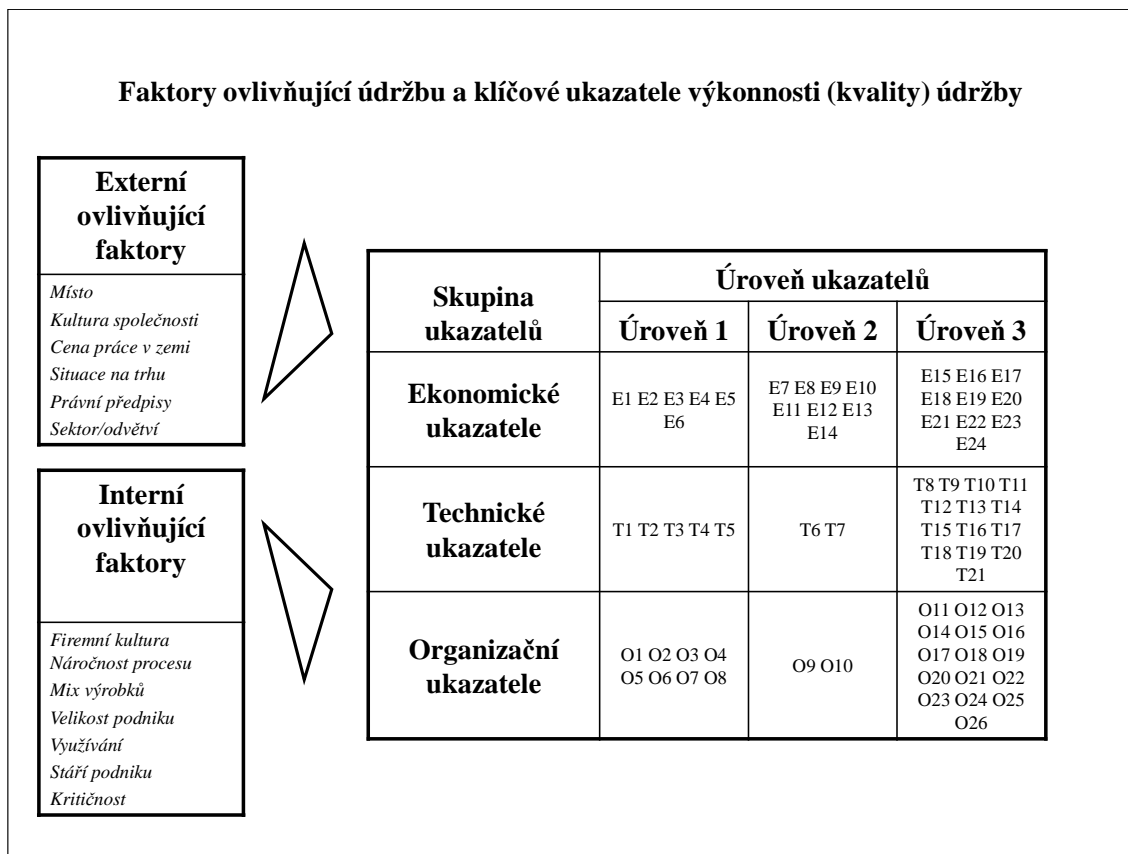
Kvalita údržby je dána **stupněm splnění požadavků souborem inherentních a
 provozních znaků** [7].

Jak již bylo uvedeno v úvodu, **soubor požadavků na procesy údržby je tvořen
 těmito dílčími procesy:** (1) *udržování hmotného majetku (HM) v provozuschopném a
 způsobilém stavu*, (2) *předcházení vzniku poruch a následujících poruchových stavů*,
 (3) *operativní odstraňování vzniklých poruch*, (4) *snižování environmentálních dopadů*

provozu výrobního zařízení, (5) zajištění bezpečnosti provozu a údržbářů, (6) snižování rizik [6] kritických poruch, (7) vynakládání optimálních nákladů na údržbu a (8) vedení managementu majetku a jeho údržby k excelenci s používáním metod a nástrojů nejlepší světové praxe.

Soubor inherentních znaků udržovaného HM je tvořen těmito charakteristikami: (1) bezporuchovost a (2) udržovatelnost a **provozní znaky procesů údržby jsou tvořeny těmito faktory:** (3) kvalifikovaný a motivovaný údržbářský personál a jeho organizační, manažerské, technické a manuální dovednosti (4) technické informace, manuály údržby, skryté znalosti a dovednosti, (5) logistika – náhradní díly, materiál (NDM) a katalogy NDM, (6) náradí, nástroje, diagnostické přístroje, (7) dílenská infrastruktura a (8) finanční zdroje.

Ještě náročnější je **stanovení (určení, identifikace) stupně splnění požadavků** na kvalitu údržby. V této oblasti lze využívat metody **kvalitativního a kvantitativního** hodnocení kvality údržby, např. uplatněním metody **benchmarkingu** s využitím **klíčových indikátorů výkonnosti (KPIs)** a **auditů** údržby. Na obr. 8 je naznačena struktura normovaných indikátorů (ukazatelů) výkonnosti údržby podle [8], které lze využívat také pro hodnocení stupně splnění požadavků na kvalitu údržby.



Obr. 8 Struktura ukazatelů (indikátorů) výkonnosti (kvality) údržby podle [8]

V tabulce 1 jsou uvedeny příklady propojení charakteristik spolehlivosti s požadavky na kvalitu údržby včetně příkladů indikátorů výkonnosti údržby jako možných ukazatelů stupně splnění požadavků na kvalitu údržby. Např. zlepší-li se inherentní charakteristiky spolehlivosti - *bezporuchovost a funkčnost*, zvýší se stupeň splnění požadavku (1), a to *udržování hmotného majetku (HM) v provozuschopném a způsobilém stavu*; stupeň splnění požadavku je možné měřit pomocí ukazatelů - *střední doba provozu do poruchy a střední doba provozu mezi poruchami*, zlepší-li se

inherentní charakteristiky spolehlivosti - *bezporuchovost a udržovatelnost (diagnostikovatelnost)*, zvýší se stupeň splnění požadavku (2) *předcházení vzniku poruch a následujících poruchových stavů*; stupeň splnění požadavku je možné měřit pomocí ukazatelů spolehlivosti - *pravděpodobnost poruchy, intenzita poruch, parametr proudu poruch* atd.

Tab. 1 Charakteristiky a nástroje spolehlivosti ovlivňující kvalitu údržby a příklad indikátorů (ukazatelů) pro měření stupně splnění požadavků na kvalitu údržby

Poř. č.	Požadavek na kvalitu údržby	Ovlivňující charakteristika nebo nástroj spolehlivosti	Indikátor (ukazatel) stupně splnění požadavku - příklady
1	<i>Udržování hmotného majetku (HM) v provozuschopném a způsobilém stavu</i>	Bezporuchovost a funkčnost Pohotovost Způsobilost Vykonávání preventivní údržby	Střední doba provozu do poruchy, Střední doba provozu mezi poruchami Součinitel pohotovosti Součinitel způsobilosti
2	<i>Předcházení vzniku poruch a následujících poruchových stavů</i>	Diagnostikovatelnost FMEA/FMECA RCM RCFA	Pravděpodobnost poruchy, Intenzita poruch, Parametr proudu poruch
3	<i>Operativní odstraňování vzniklých poruch</i>	Udržovatelnost Zajištěnost údržby	Střední doba do obnovy, Střední doba trvání opravy
4	<i>Snížování environmentálních dopadů provozu výrobního zařízení</i>	Pravděpodobnost kritické environmentální poruchy	Environmentální aspekty, Environmentální profil, Environmentální dopady
5	<i>Zajištění bezpečnosti provozu a údržbářů</i>	Bezpečnost Pravidla a předpisy BOZP ISO 18001 (OHSAS)	Počet úrazů k časovému fondu pracovníků Počet smrtelných úrazů k časovému fondu pracovníků
6	<i>Snížování rizik kritických poruch</i>	Pravděpodobnost kritické poruchy, analýza rizik	Kritičnost poruchy (riziko) = $Z_h F_{kr}$
7	<i>Vynakládání optimálních nákladů na údržbu</i>	Analýza nákladů/zisku životního cyklu (LCC) Asset management	Roční náklady na údržbu/reprodukční hodnota majetku
8	<i>Vedení managementu majetku a jeho údržby k excelenci s používáním metod a nástrojů nejlepší světové praxe</i>	Používání nástrojů zlepšování managementu majetku a jeho údržby, např. ISO 55001, 55002, 55003, EN 16646, FMECA, RCM, RCFA aj.	Náklady životního cyklu Zisk životního cyklu Celková efektivita zařízení (OEE)

5. Závěr

1. Provozní spolehlivost je významná vlastnost technických objektů (strojů a zařízení) včetně jejich prvků a vytváří **teoretický základ** pro tvorbu strategie a politiky údržby.
2. Příspěvek **definuje** bezporuchovost, udržitelnost a zajištěnost údržby a obsahuje elementární kvantitativní ukazatele spolehlivosti.
3. Uplatnění **kvantitativních ukazatelů spolehlivosti** bylo ukázáno na příkladu pěti praktických oblastí:
 - a) ukazatele výkonnosti údržby,
 - b) podklady pro plánování potřeby náhradních dílů,
 - c) řešení optimalizace zálohování kritických objektů,
 - d) oblast výpočtu rentability renovace a různých materiálových řešení,
 - e) optimalizace preventivní údržby.
4. Podniky hlásící se k výzvě „Průmysl 4.0“ a nejenom ty, by v dnešní době měly mít **oddělení provozní spolehlivosti** výrobního zařízení s cílem:
 - a) sbírat data o spolehlivosti s využitím informačního systému údržby (ISÚ),
 - b) zpracovávat potřebné a požadované kvantitativní ukazatele spolehlivosti,
 - c) spolupracovat s finančním controllingem,
 - d) optimalizovat programy preventivní údržby pro stroje a zařízení,
 - e) účinně řídit zásoby náhradních dílů (ND),
 - f) navrhovat opatření pro zvyšování provozní spolehlivosti strojů a zařízení.
5. Dále byly vymezeny **příklady indikátorů** (ukazatelů), kterými je možno **měřit stupeň splnění požadavků** na údržbu (tabulka 1).
6. První „vlastovky“ aplikace spolehlivosti se v našich podnicích již objevují.

Použitá literatura

- [1] LEGÁT, V. a kol.: Management a inženýrství údržby. Professional Publishing, Praha 2016, ISBN978-80-7431-119-2
- [2] ČSN IEC 60050-192 Mezinárodní elektrotechnický slovník – Část 192: Spolehlivost
- [3] ČSN EN 13306 Údržba – Terminologie údržby
- [4] ČSN IEC 60300-3-10 Management spolehlivosti – Část 3-10: Návod k použití – Udržitelnost
- [5] CALABRO, S. R.: Základy spolehlivosti a jejich využití v praxi. SNTL Praha 1965
- [6] ČSN ISO 31000:2010 Management rizik – Principy a směrnice
- [7] ČSN EN ISO 9000 Systémy managementu kvality - Základní principy a slovník
- [8] ČSN EN 15341 Údržba – Klíčové indikátory výkonnosti údržby

Kontaktní údaje

prof. Ing. Václav Legát, DrSc.

Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, katedra jakosti a spolehlivosti strojů,

Kamýcká 129, 165 21 Praha – Suchbátka

předseda představenstva České společnosti pro údržbu (ČSPÚ)

Tel.: +420 224 383 268, E-mail: legat@tf.czu.cz

VYUŽITÍ CHARAKTERISTIK BEZPORUCHOVOSTI K OPTIMALIZACI PREVENTIVNÍ ÚDRŽBY S PODPOROU EXCELU

Ing. Zdeněk Aleš, Ph.D.
 prof. Ing. Václav Legát, DrSc.

1. Úvod

Základem optimalizace intervalu preventivní údržby je nalezení takového okamžiku, takové hodnoty diagnostického signálu (doby používání, doby provozu, provozního parametru, strukturního parametru, nákladového ukazatele), kdy provedená obnova (za předpokladu, že v tomto okamžiku objekt „žil“) zajišťuje dosažení minimálních průměrných jednotkových nákladů na provoz a obnovu daného objektu v průběhu jeho celého užitečného života.

K obnově strojních objektů může dojít třemi základními systémy údržby:

- a) neplánovanou údržbou, kdy obnova je vždy vykonána až po poruše,
- b) tradiční preventivní údržbou založenou buď na pevném intervalu pro obnovu (bez ohledu na případnou poruchu - na stáří objektu) - periodická údržba, nebo na klouzavém intervalu pro obnovu (s ohledem na případnou poruchu - na stáří objektu) - věková údržba,
- c) moderní preventivní diagnostickou údržbou (prediktivní údržbou) založenou na sledování technického stavu (pomocí preventivních diagnostických prohlídek), přičemž obnova je vykonána po dosažení optimální hodnoty ukazatele technického stavu objektu nebo po jeho náhodné poruše (nešlo-li poruše předejít).

Při optimalizaci preventivní údržby je nezbytné znát charakteristiky bezporuchovosti (životnosti), mezi něž řadíme následující funkce:

- rozdělení hustoty pravděpodobnosti poruchy $f(t)$,
- pravděpodobnosti poruchy $F(t)$,
- pravděpodobnosti bezporuchového provozu $R(t)$,
- okamžité intenzity poruch $\lambda(t)$.

V tabulce 1 je uveden přehled vztahů pro výpočet charakteristik bezporuchovosti (včetně vzorců pro MS Excel) pro provozované objekty.

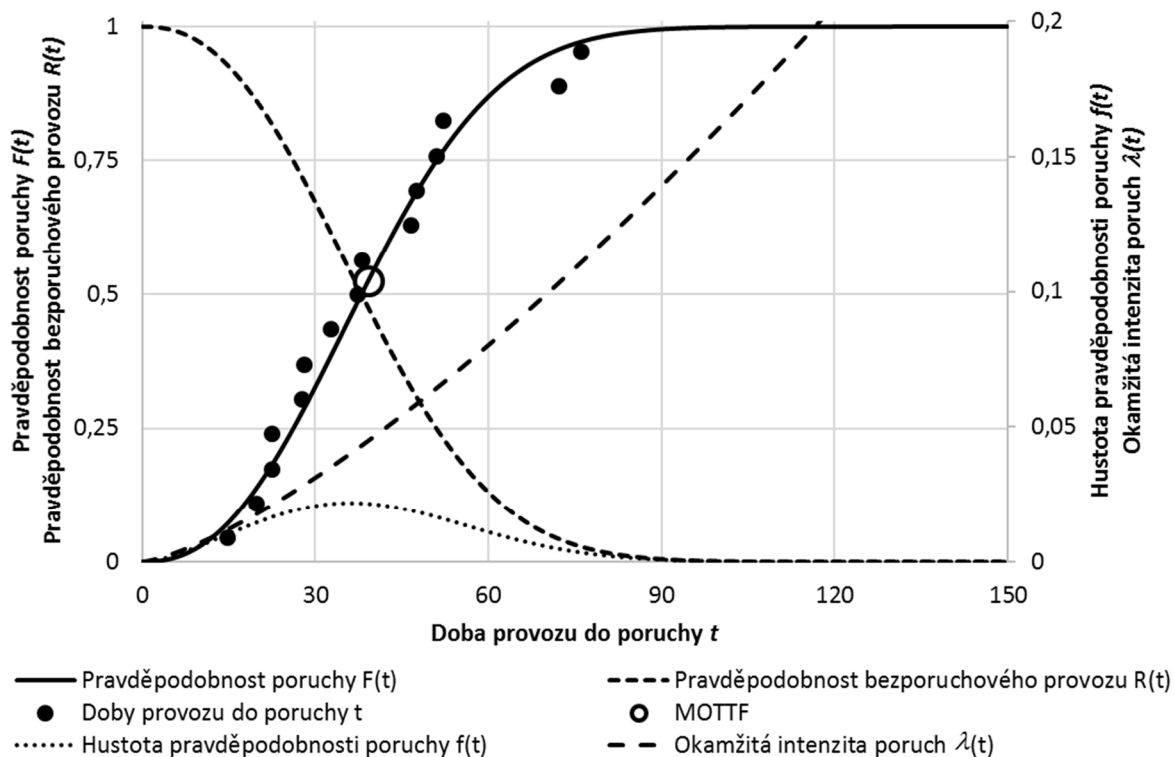
Tab. 1 Funkční předpisy charakteristik bezporuchovosti a jejich vzorce v MS Excel

Funkční předpis	MS Excel vzorec
$f(t) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} \cdot t^{\alpha-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right]$	=WEIBULL.DIST(X;Alfa;Beta;Kumulativní) (Kumulativní – 0)
$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right]$	=WEIBULL.DIST(X;Alfa;Beta;Kumulativní) (Kumulativní – 1)
$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right]$	=1 - WEIBULL.DIST(X;Alfa;Beta;Kumulativní)

	(Kumulativní – 1)
$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} = \frac{f(t)}{R(t)}$	=WEIBULL.DIST(X;Alfa;Beta;Kumulativní) / (1 - WEIBULL.DIST(X;Alfa;Beta;Kumulativní)) (Kumulativní – 0) / (Kumulativní – 1)

Kde: X – konkrétní hodnota (např. doba provozu) Weibullova rozdělení,
 Alfa – parametr tvaru Weibullova rozdělení,
 Beta – parametr měřítka Weibullova rozdělení,
 Kumulativní – logická hodnota; 0 – pro rozdělení hustoty pravděpodobnosti; 1 – pro distribuční funkci.

Vzorce lze samozřejmě do buněk v Excelu zapsat totožně, jak je uveden jejich funkční předpis (tabulka 1) s využitím funkce EXP(). Příklad průběhu charakteristik bezporuchovosti je uveden na obr. 1.



Obr. 1 Příklad průběhů funkcí $F(t)$, $f(t)$, $R(t)$, $\lambda(t)$ pro parametry Weibullova rozdělení ($\alpha = 2,36$; $\beta = 44,34$) včetně zdrojových hodnot doby provozu do poruchy t a hodnoty MOTTf

Pro úplnost bude vhodné uvést výpočet hodnoty střední doby provozu do poruchy $E(t)$, označované též jako MOTTf (Mean Operating Time to Failure):

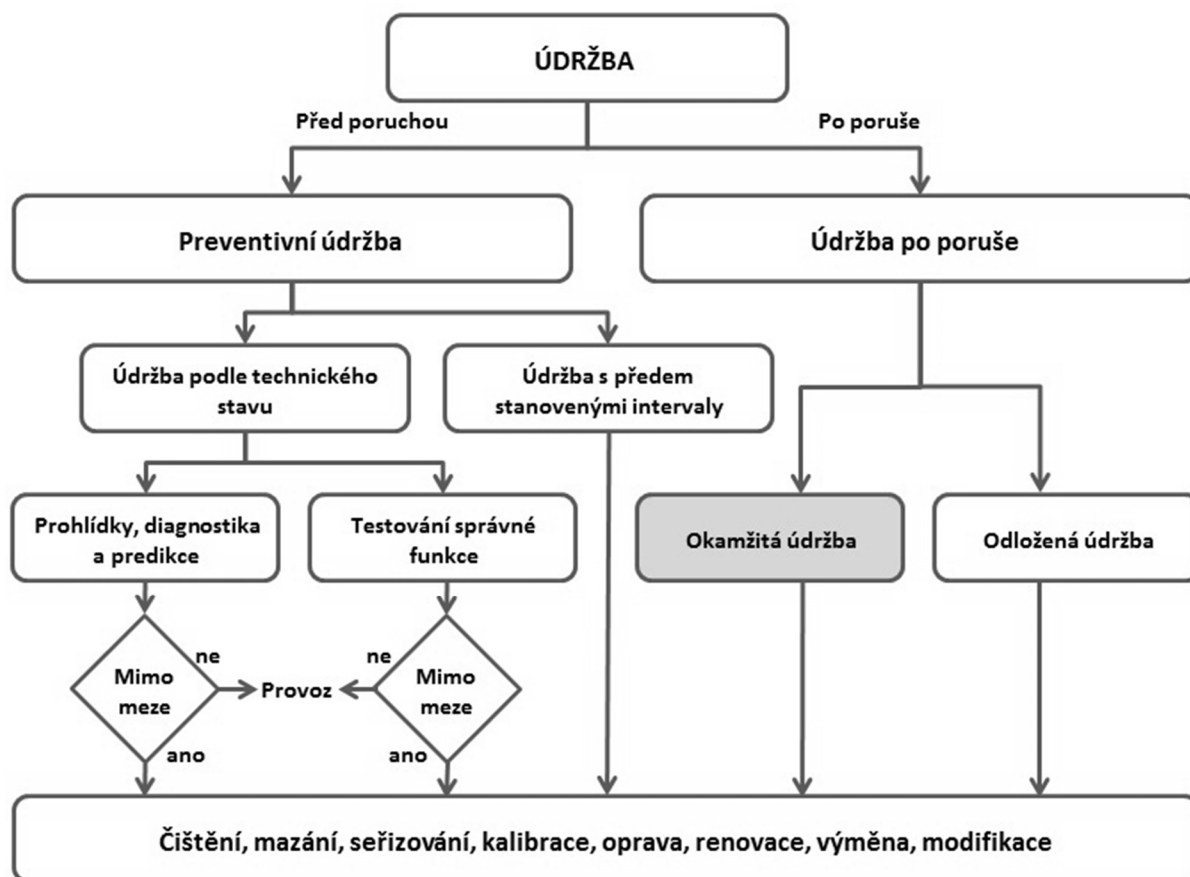
$$E(t) = MOTTf = \beta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (25)$$

Při výpočtu *MOTTF* v MS Excel je nutné použít vzorec pro funkci Γ - GAMMA. Testování shody empirického a teoretického rozdělení hustoty se nejčastěji provádí pomocí testu χ^2 .

2. Výpočetní model optimalizace preventivní údržby

Pro posouzení optimální politiky 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),
- 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_m ,
- 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 $t_j(S_{dm})$.



Obr. 2 Schéma základních prvků politiky (systémů) údržby uplatňované v praxi

Na obr. 2 je uvedeno základní schéma vytváření politiky (systémů) údržby. Základem matematického modelu je hledání optimálního intervalu t_{puo} periodické údržby a hledání optimální velikosti diagnostického signálu S_{do} pro údržbu je výpočet jednotkových nákladů na provoz a údržbu včetně vyvolaných ztrát spojených s aplikací jednotlivých politik (systémů) údržby. Nejvhodnější je ten systém údržby pro daný objekt, který bude vykazovat **nejnižší jednotkové náklady**. Podle tohoto kritéria vybíráme optimální politiku (systém) údržby pro daný objekt.

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

$$u_{up}(MOTTF) = \frac{N_{up}}{MOTTF}, \quad (1)$$

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) a $MOTTF$ je střední doba provozu do poruchy při údržbě po poruše.

Střední doba provozu do poruchy $MOTTF$ (odhad) se vypočítá podle vztahu

$$MOTTF = \beta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (2)$$

kde α je parametr tvaru Weibullova rozdělení,

- je parametr tvaru Weibullova rozdělení,
- je hodnota Gama funkce.

Střední dobu provozu do poruchy je možné také vypočítat podle vztahu

$$MOTTF = \int_{t=0}^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_{t=0}^{\infty} R(t) dt, \quad (3)$$

kde $f(t)$ je funkce rozdělení hustoty pravděpodobnosti doby provozu do poruchy, $R(t)$ je funkce pravděpodobnosti bezporuchového provozu a t je doba provozu do poruchy.

2. **Jednotkové náklady na preventivní periodickou údržbu** $u_{pu}(t_{pu})$ 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

$$u_{pu}(t_{pu}) = \frac{N_{pu} \cdot R(t_{pu}) + N_{up} F(t_{pu})}{\bar{t}(t_{pu})} = \frac{N_{pu} + Z_{up} \cdot F(t_{pu})}{\bar{t}(t_{pu})} = \min. \Rightarrow t_{pu} = t_{puo}, \quad (4)$$

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 (jednotkové náklady dosahují minimální hodnotu).

Střední dobu provozu do provedení preventivní periodické údržby $\bar{t}(t_{pu})$ v intervalu t_{pu} vypočítáme z empiricky získaných dat podle vztahu

$$\bar{t}(t_{pu}) = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{m(t_{pu})} t_i(t_{pu}) + \sum_{j=1}^{n-m(t_{pu})} t_j(t_{pu}) \right], \quad (5)$$

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

Střední dobu provozu do provedení preventivní periodické údržby $\bar{t}(t_{pu})$ v intervalu t_{pu} můžeme také vypočítat jako integrál pravděpodobnosti bezporuchového provozu $R(t)$

$$\bar{t}(t_{pu}) = \int_{t_p=0}^{t_{pu}} R(t) dt \quad (6)$$

3. **Jednotkové náklady na preventivní diagnostickou údržbu** $u_{du}(S_d)$ 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

$$u_{du}(S_d) = \frac{N_{pu} \cdot R(S_d) + N_{up} \cdot F(S_d)}{\bar{t}(S_d)} + u_d = \frac{N_{up} + Z_{up} \cdot F(S_d)}{\bar{t}(S_d)} + u_d = \min. \Rightarrow S_d = S_{do} \quad (7)$$

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 (po bezprostředním překročení) 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 dobu provozu do provedení preventivní diagnostické údržby.

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

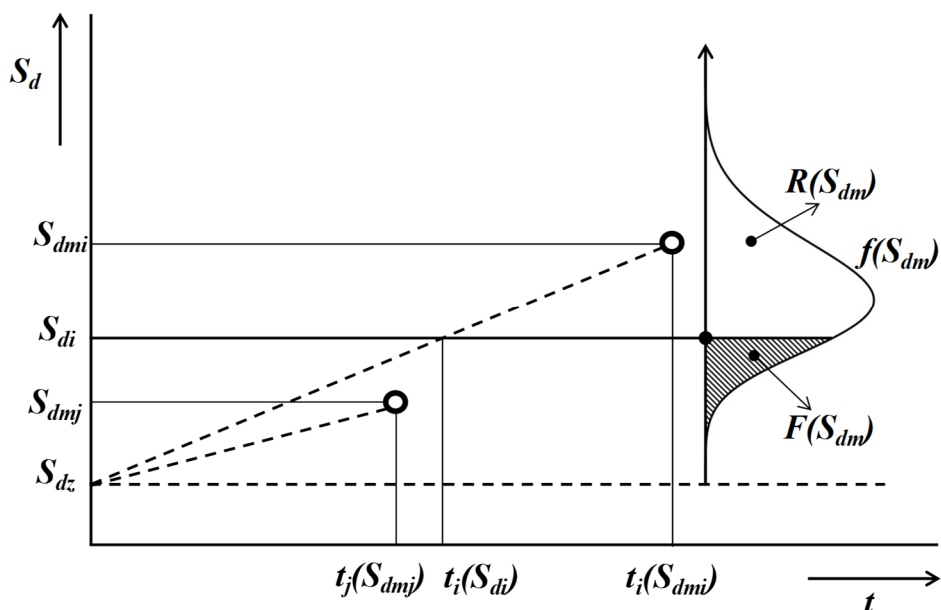
$$\bar{t}(S_d) = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{m(S_d)} t_i(S_d) + \sum_{j=1}^{n-m(S_d)} t_j(S_{dm}) \right], \quad (8)$$

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. Na obr. 3 je naznačen princip výpočtu střední doby provozu.

Pro výpočet střední doby provozu do provedení preventivní diagnostické údržby $\bar{t}(S_d)$ při stavu S_d použijeme zjednodušený model, v němž degradace technického stavu probíhá po přímce z počátečního stavu S_{dz} vždy do mezní hodnoty technického stavu i -tého objektu S_{dmi} . Přesnost této aproximace je z technického hlediska zcela postačující. Výpočet $t_i(S_d)$ se provede, v případě, že $S_{di} < S_{dmi}$, podle vztahu

$$t_i(S_d) = t_i(S_{dmi}) \frac{S_{di} - S_{dz}}{S_{dmi} - S_{dz}}, \quad (9)$$

a $t_j(S_d)$ pro níž platí, že $S_{dj} \geq S_{dmj}$, se stanoví přímým odečtem hodnoty $t_j(S_{dm})$. Význam jednotlivých symbolů (vstupních dat) ve vztahu (9) je zřejmý z obr. 3.



Obr. 3 Princip stanovení vstupních dat pro výpočet střední doby provozu do provedení preventivní diagnostické údržby

Výpočet střední doby provozu do provedení preventivní diagnostické údržby lze realizovat v MS Excel pomocí objektově orientovaného jazyka Visual Basic for Applications (VBA). Následující text je věnován syntaxi programového kódu pro výpočet střední doby provozu do provedení preventivní diagnostické údržby:

```
Public Sub Diagnostika()
Dim tVAR As Variant
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim k As Integer
Dim iLoop As Integer
Dim tSTR As Variant
Dim NumRows2 As Integer
Application.ScreenUpdating = False
ActiveSheet.EnableCalculation = False
    NumRows2 = Application.CountA(Range("A:A"))
        k = 3
Do Until IsEmpty(Cells(9, k).Value)
i = 10
j = 10
Do Until IsEmpty(Cells(i, 1).Value)
If Cells(j, 2).Value > Cells(9, k).Value Then
Cells(j, k).Value = Cells(i, 1).Value * (Cells(9, k).Value - _
Cells(8, 3).Value) / (Cells(j, 2).Value - Cells(8, 3).Value)
Else
Cells(j, k).Value = Cells(i, 1).Value
End If
i = i + 1
j = j + 1
Loop
i = 10
j = 10
tSTR = Application.WorksheetFunction.Sum(Range(Cells(j, k), _
```

```
Cells(NumRows2, k))(NumRows2 - 9 - Application. _
WorksheetFunction.CountIf(Range(Cells(j, k), _
Cells(NumRows2, k)), 0))
Cells(7, k).Value = tSTR
k = k + 1
Loop
ActiveSheet.EnableCalculation = True
Application.ScreenUpdating = True
End Sub
```

3. Příklad výpočtu optimalizace preventivní údržby s podporou Excelu

Kritériem pro výběr správné politiky (systému) údržby byly zvoleny jednotkové náklady na provoz, údržbu a další vyvolané náklady (ztráty) způsobené výskytem poruchy.

Numerické řešení je popsáno na základě vstupních dat získaných z provozu převodovek. Tato data jsou tvořena souřadnicemi (S_{dm} a $t_j(S_{dm})$) technického stavu (zrychlení $g - mm/s^2$) a doby provozu do výskytu poruchy. Dále ke vstupním datům patří náklady na údržbu po poruše N_{up} , náklady na preventivní údržbu N_{pu} , jednotkové náklady na diagnostiku u_d - viz tabulka 4.

Tab. 2 Doby provozu do poruchy $t(S_{dm})$ a naměřené hodnoty diagnostického signálu S_d těsně před okamžikem poruchy

$t(S_{dm})$ (h)	1319	1988	3019	3025	3172
S_{dm} (g)	9,1	8,8	6,3	9,4	13,5
$t(S_{dm})$ (h)	3183	3295	3330	3399	3407
S_d (g)	9,7	13,1	8,5	5,9	9,3
$t(S_{dm})$ (h)	3460	3590	3595	3725	3863
S_d (g)	11,7	8,1	8,4	7,3	11,1
$t(S_{dm})$ (h)	3864	3939	4440	5450	5776
S_d (g)	13,5	5,6	8,0	6,7	13,6

Z tabulky 2 pro doby provozu $t(S_{dm})$ a naměřené hodnoty diagnostického signálu S_d těsně před okamžikem poruchy byly pomocí excelovské aplikace vypočteny parametry Weibullova rozdělení viz tabulka 3.

Tab. 3 Vypočítané parametry Weibullova rozdělení pro doby provozu do poruchy $t(S_{dm})$ a naměřené hodnoty diagnostického signálu S_d těsně před okamžikem poruchy

Název parametru	Označení parametru	Hodnota parametru
Parametr tvaru pro dobu provozu $t(S_{dm})$	α	3,05
Parametr měřítka pro dobu provozu $t(S_{dm})$	β	3.970,20
Parametr tvaru pro diagnostický signál S_d	α	4,06
Parametr měřítka pro diagnostický signál S_d	β	10,33

Tab. 4 Vstupní nákladové ukazatele o údržbě

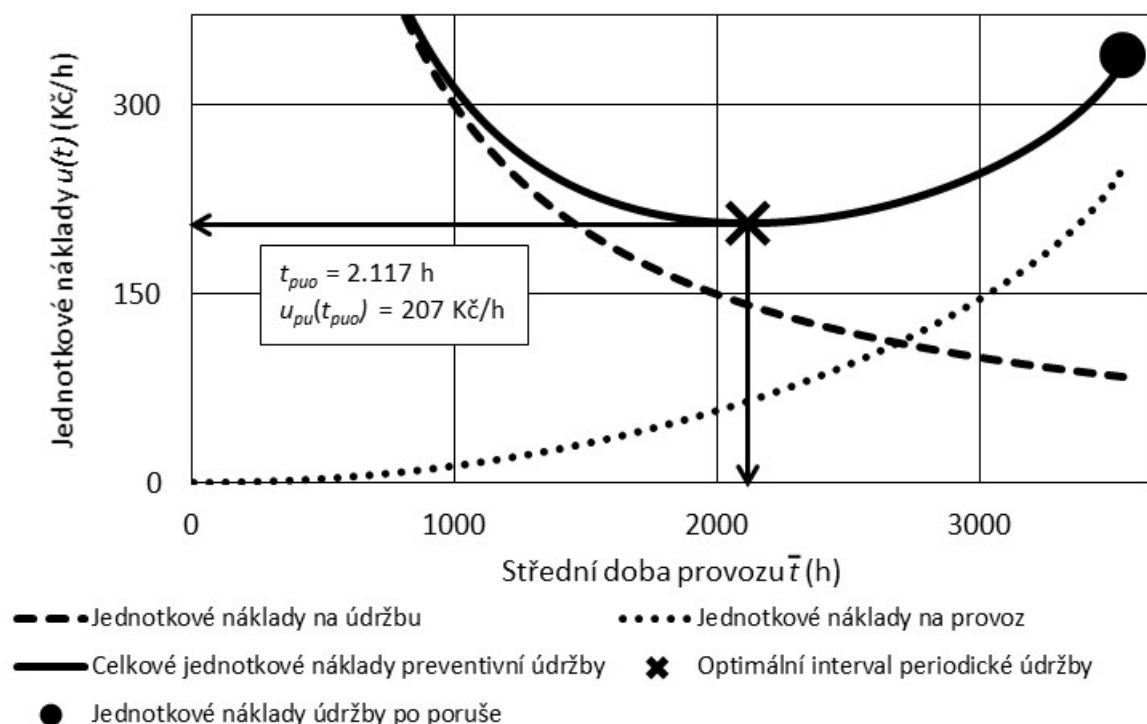
Název ukazatele	Označení ukazatele	Hodnota ukazatele
Náklady na údržbu po poruše	N_{up}	1.200.000,- Kč
Náklady na preventivní údržbu	N_{pu}	300.000,- Kč
Ztráty v důsledku údržby po poruše	Z_{up}	900.000,- Kč
Jednotkové náklady na diagnostiku	u_d	15,- Kč/h

Výpočty jsou provedeny podle vztahů (1) až (9) pomocí tabulkového procesoru EXCEL.

1. Jednotkové náklady na údržbu po poruše

$$u_{up}(MOTTF) = \frac{N_{up}}{MOTTF} = \frac{N_{up}}{\beta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} = \frac{1.200.000}{3.970,20 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{3,05}\right)} = 338,23 \text{ Kč/h} \quad (10)$$

Výpočet hodnoty funkce Γ lze provést pomocí syntaxe vzorce funkce GAMMA v Microsoft Excelu od verze 2013 a vyšší.



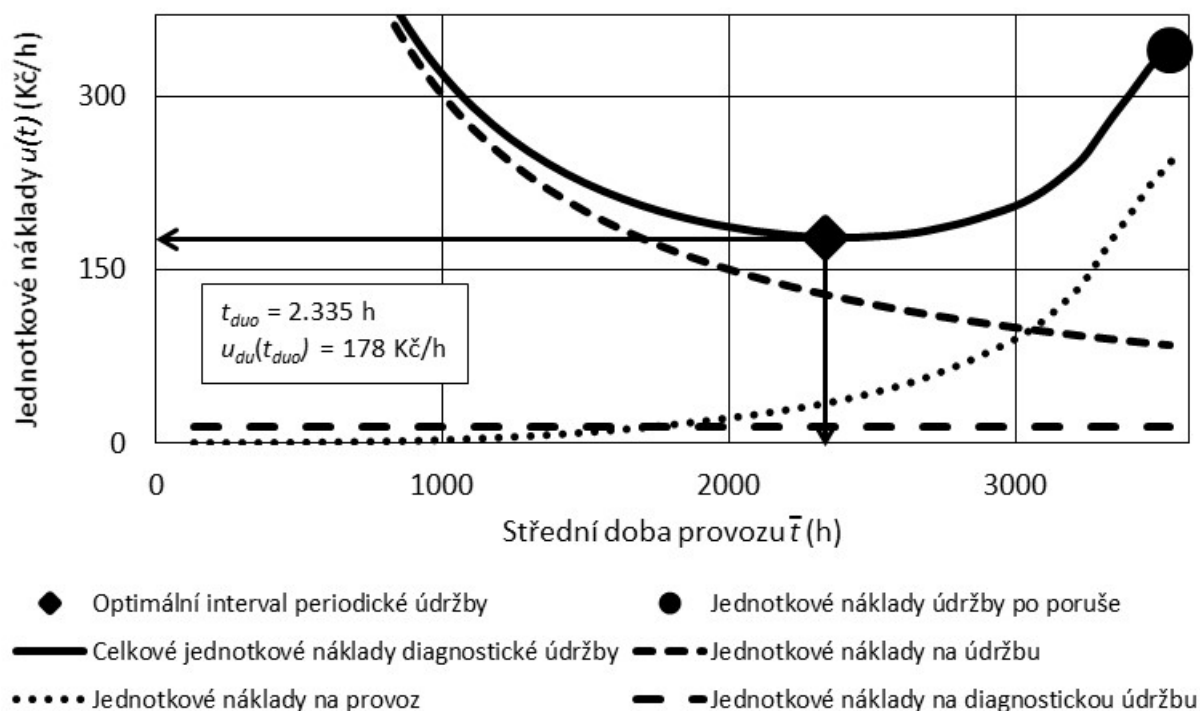
Obr. 4 Závislost jednotkových nákladů na střední době provozu pro periodickou údržbu

2. Jednotkové náklady na preventivní periodickou údržbu

$$u_{pu}(t_{pu}) = \frac{N_{pu} + Z_{up} \cdot F(t_{pu})}{\bar{t}(t_{pu})} = \frac{N_{pu} + Z_{up} \cdot (1 - \exp(-(\frac{t_{pu}}{\beta})^\alpha))}{\int_0^{t_{pu}} \exp(-(\frac{t}{\beta})^\alpha) dt} = \min. \Rightarrow t_{pu} = t_{puo}, \quad (11)$$

Pravděpodobnost poruchy $F(t_{pu})$ je vyjádřena pomocí Weibullový distribuční funkce $(1 - \exp(-(\frac{t_{puo}}{\beta})^\alpha))$ a střední doba provozu do preventivní údržby je vyjádřena integrálem $\int_0^{t_{pu}} \exp(-(\frac{t}{\beta})^\alpha) dt$ pravděpodobnosti bezporuchového provozu – viz rovnici (6).

kde α a β jsou parametry Weibullova rozdělení hustoty pravděpodobnosti mezních hodnot diagnostického signálu a dob do poruchy.



Obr. 5 Závislost jednotkových nákladů na střední době provozu pro diagnostickou údržbu

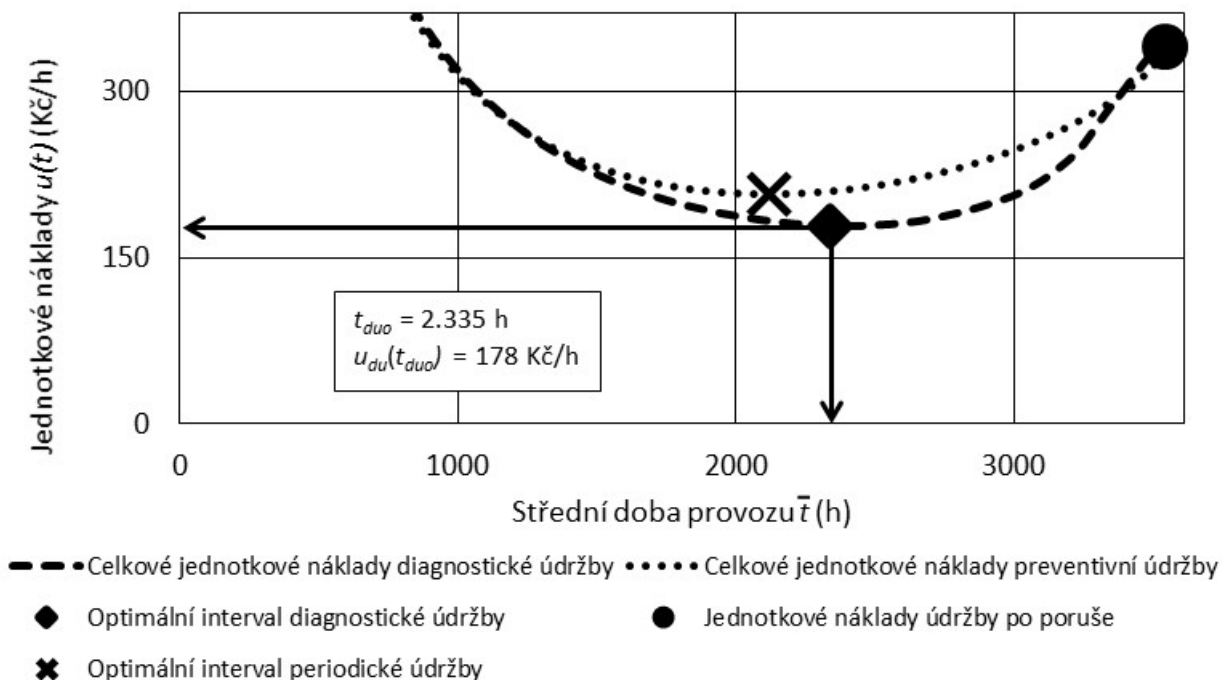
3. Jednotkové náklady na preventivní diagnostickou údržbu

Jednotkové náklady na diagnostickou údržbu se vypočítají ze vztahu (12)

$$u_{du}(S_d) = \frac{N_{up} + Z_{up} \cdot F(S_{dm})}{\bar{t}(S_d)} + u_d = \frac{N_{up} + Z_{up} \cdot (1 - \exp(-(\frac{S_{dm}}{\beta})^\alpha))}{\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{m(S_d)} t_i(S_d) + \sum_{j=1}^{n-m(S_d)} t_j(S_{dm}) \right]} + u_d = \min. \Rightarrow S_d = S_{do} \quad (12)$$

Z obr. 5 je vidět, že minimální jednotkové náklady $u_{du}(S_{do}) = 178$ Kč/h odpovídají optimální hodnotě diagnostického signálu $S_{do} = 5,76g$ a střední době provozu do diagnostické údržby $\bar{t}(S_{do}) = 2.335$ h.

V tabulce 5 je provedena rekapitulace jednotkových nákladů pro jednotlivé politiky (systémy) údržby pro tentýž objekt.



Obr. 6 Závislost jednotkových nákladů na střední době provozu pro periodickou údržbu a pro diagnostickou údržbu

Tab. 5 Rekapitulace dosažených výsledků

Ukazatel	Politika (systém) údržby		
	Údržba po poruše	Preventivní periodická údržba	Preventivní diagnostická údržba
$u(t)$ (Kč/h)	338	207	178
\bar{t} (h)	3.548	2.117	2.335
F	1	0,153	0,089
t (h)	-	2.203	-
S_{do} (g)	-	-	5,76

Pro zvýšení názornosti jsou některé veličiny znázorněny graficky. Na obr. 4 je ukázka průběhu jednotkových nákladů na preventivní periodickou údržbu a na obr. 5 je ukázka průběhu jednotkových nákladů na preventivní diagnostickou údržbu. Na obr. 6 je zobrazen průběh jednotkových nákladů na preventivní periodickou údržbu a jednotkových nákladů na preventivní diagnostickou údržbu.

4. Závěr

Lze shrnout, že výběr a volba politiky (systémů) údržby ve velmi důležitý úkol v oblasti managementu údržby při tvorbě programů údržby a navazujícího plánování údržbářských úkolů.

Autoři popsali metodiku, jakým způsobem hodnotit vhodnost použití jednotlivých základních systémů údržby s využitím ekonomického kritéria ve formě jednotkových nákladů na provoz, údržbu a vyvolané ztráty. Samozřejmě kritérií spojených s udržovaným výrobním zařízením může být více, např. pohotovost, tržby, zisk apod. Nicméně náklady budou vždy rozhodující, neboť jsou ovlivnitelné managementem, na tržby a zisk má velký vliv vnější prostředí – trh.

Simulovaný příklad ukázal, že i když šlo o jeden a tentýž fyzický objekt, finanční vstupy mohou zásadně ovlivnit výběr systému údržby.

Jde zejména o vliv nákladů na preventivní údržbu, nákladů (včetně ztrát) na údržbu po poruše a pochopitelně i nákladů na diagnostiku. Ukázali jsme (tab. 5), že za daných ekonomických okolností vychází nejvýhodněji preventivní diagnostická údržba (178 Kč/h). Pokud by např. jednotkové náklady na diagnostiku vzrostly o 30 Kč/h či o více, bude výhodnější preventivní periodická údržba (207 Kč/h).

5. 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] ALEXANDER, M. a KUSLEIKA, D.: Excel 2016 power programming with VBA. Indianapolis, IN: Wiley, 2016. ISBN 9781119067726.
- [3] ČSN EN 61649 (010653): 2009 Weibullova analýza.
- [4] ČSN IEC 50(191): 1993 MEDZINÁRODNÝ ELEKTROTECHNICKÝ SLOVNÍK. Kapitola 191: Spolehlivost a akost služieb.
- [5] FAMFULÍK, J., MÍKOVÁ, J., KRZYŽANEK, R.: Teorie údržby. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-248-1509-1.
- [6] 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.
- [7] HRUBÁ, J., SLAVÍK, V.: Matematika I. Praha. NORMA, 1998.
- [8] LEGÁT, V. a kol.: Management a inženýrství údržby. Professional Publishing, Praha 2016, ISBN 978-80-7431-119-2.
- [9] LEGÁT, V., STÁVEK, M., ALEŠ, Z.: Preventivní údržba - cesta k vyšší kvalitě a efektivitě výroby. In: Sborník konference Kvalita 2014, Ostrava 2014.
- [10] LEGÁT, V., STÁVEK, M., ALEŠ, Z.: Preventivní údržba - cesta k vyšší výrobě a tržbám. In: Sborník konference Národní fórum údržby 2014, Štrbské Pleso, SSU Bratislava 2014, ISBN 978-80-554-0880-4.

Kontakt

Ing. Zdeněk Aleš, Ph.D.

prof. Ing. Václav Legát, DrSc.

Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, katedra jakosti
a spolehlivosti strojů,

Kamýcká 129, 165 21 Praha – Suchbátka

Tel.: +420 224 383 254, +420 224 383 268, E-mail: ales@tf.czu.cz, legat@tf.czu.cz

PORUCHOVÉ STAVY – TYPICKÁ POŠKOZENÍ STROJNÍCH SOUČÁSTÍ

prof. Ing. Josef Pošta, CSc.¹

Anotace

Strojní součásti a jejich funkční povrchy jsou vystaveny kombinovanému namáhání, na kterém se podílejí především působící síly, vlivy okolního prostředí, způsob provozu a údržba. Kombinace těchto vlivů vede k postupnému či náhlému poškození. Správně určit druh poškození a jeho možné příčiny je významné nejen pro zpětné vyšetřování případů selhání strojů, ale i pro jejich správný provoz a údržbu. Příspěvek přináší přehled typických poškození strojních součástí.

Úvod

Každý mechanismus je tvořen součástmi, vyrobenými z materiálů různých vlastností. Na součásti působí vlivy okolního prostředí, vnější i vnitřní síly, jejich materiál podléhá časovým změnám. Součásti či jejich funkční plochy jsou trvale či příležitostně zatěžovány. Výsledkem jsou různě rychlé a různě intenzivní změny součástí, z hlediska jejich funkce většinou nepříznivé a nežádoucí, označované proto jako poškození.

Všechny vlivy, působící poškození strojních součástí, jsou velmi proměnlivé, závislé na mnoha faktorech a podmínkách. Poškození součástí proto může být různého druhu:

- opotřebení
- koroze
- otláčení
- deformace
- trhliny a lomy
- ostatní poškození.

¹ prof. Ing. Josef Pošta, CSc., Department for Quality and Dependability of Machines, Faculty of Engineering, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 129, 165 21 Prague 6, Czech Republic
e-mail: posta@tf.czu.cz

Opotřebení

Opotřebení je trvalá nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, vyvolaná vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává.

Opotřebení se projevuje odstraňováním nebo přemísťováním částic hmoty z povrchu součásti mechanickými účinky působících sil, doprovázenými někdy i jinými vlivy, např. chemickými nebo elektrochemickými. Opotřebení se podle ČSN 01 50 50 rozděluje na šest základních druhů:

- adhezivní
- vibrační
- abrazivní
- erozivní
- kavitační
- únavové

Uvedené druhy opotřebení představují základní případy. V technické praxi se obvykle jednotlivé druhy kombinují, jeden druh přechází v jiný, uplatňují se další vlivy, takže vzniká řada variant.

Koroze

Koroze je nežádoucí trvalá změna povrchu materiálu, způsobená elektrochemickými a chemickými vlivy okolního prostředí.

Koroze je nežádoucí fyzikálně-chemická interakce kovu a prostředí, která vede:

- ke ztrátě užitečných vlastností kovu,
- k poškození prostředí.

Podle mechanismu korozních procesů se koroze dělí na chemickou a elektrochemickou.

Chemická koroze se vyskytuje poměrně zřídka. Jsou to případy, kdy dochází k chemickým reakcím v nevodivém prostředí, například tvorba okujů při tváření oceli za tepla.

Elektrochemická koroze je nejčastější. Změny působené touto korozí si lze představovat jako procesy probíhající v galvanickém článku. Elektrochemická koroze může probíhat všude tam, kde se stýkají různé kovy a je přítomen elektrolyt; stačí vzdušná nebo kondenzační vlhkost. Korozi velmi podporuje, je-li elektrolyt dobře vodivý, např. v důsledku přítomnosti iontů SO_2 .

Otlačení

Otlačení je nežádoucí trvalá změna povrchu, způsobená vnějšími silami.

K otlačení dojde tehdy, jestliže skutečný kontaktní tlak překročí mez kluzu materiálu povrchové vrstvy.

Protože technické kovy jsou prakticky objemově nestlačitelné, má při otlačení působení kontaktního tlaku za následek tok materiálu z místa působení tlaku. Objem materiálu se nemění, materiál neubývá, ale přemísťuje se a vytváří valy okolo místa působení tlaku. To má v technické praxi zpravidla za následek změnu vůlí v daném spojení, čímž může být vyvoláno např. zvýšené opotřebenění nebo lomy v důsledku rázů.

Otlačení v uvedeném smyslu je možno považovat za místní (povrchovou) deformaci.

Deformace

Deformace je trvalá nežádoucí změna geometrického tvaru součásti, způsobená vnějšími nebo vnitřními silami.

O deformaci jako samostatném poškození lze mluvit tehdy, jde-li o změnu geometrického tvaru součásti, např. prohnutí hřídele, ovalita prstencové součásti, vyboulení desky apod. Pružné deformace se za poškození nepovažují.

K deformaci součásti dojde tehdy, překročí-li napětí v některém průřezu součásti mez kluzu materiálu. Při tom záleží též na vlastnostech materiálu. U křehkých materiálů k deformaci dochází zřídka, většinou vznikne lom, protože už poměrně malé deformace vedou k překročení meze pevnosti.

Napětí, vedoucí k deformaci může být způsobeno vnějšími nebo vnitřními silami. Vnější síly obvykle vyvolávají ohybové nebo torzní momenty. Vnitřní síly (vnitřní napětí) mohou být zbytková, v důsledku použitého výrobního postupu, nebo vnesená zvenčí, např. přehřátím při provozu nebo jako důsledek otlačení. Deformaci ovšem vyvolá také změna rovnováhy vnitřních pnutí např. v důsledku stárnutí materiálu který obsahoval vnitřní pnutí, v důsledku působení zvýšených teplot, nebo v důsledku opotřebenění při kterém je odstraněna povrchová vrstva materiálu s koncentrovaným napětím.

Trhliny a lomy

Trhlina je porušení homogenity materiálu v části průřezu součásti. Lom je porušení homogenity materiálu v celém průřezu součásti.

Příčiny vzniku trhlin a lomů jsou stejné jako u otlačení a deformací, tj. působení vnějších nebo vnitřních napětí, které v části, popř. v celém průřezu překročí mez pevnosti nebo mez únavy materiálu. Je-li materiál křehký, praskne a vznikne trhlina nebo lom.

Trhliny jsou jedním z nejčastějších poškození především u odlitků, u svařenců a u tepelně zpracovávaných součástí. Trhliny snižují pevnost součástí, působí netěsnosti a u dynamicky namáhaných součástí vedou ke vzniku únavových lomů.

Lomy lze rozdělit na:

- lomy statické (křehké nebo houževnaté),
- lomy únavové.

Statický lom vznikne tehdy, je-li překročena mez pevnosti materiálu v některém průřezu.

Únavový lom vznikne tehdy, je-li překročena mez únavy materiálu.

Ostatní poškození

Ostatní poškození jsou jiná než výše uvedená, například:

- stárnutí materiálu,
- tepelná degradace materiálu,
- kombinace výše uvedených poškození.

Stárnutí materiálu je souhrn vnitřních dějů v materiálu, vyvolaných střídavým provozním namáháním, střídáním teplot, metalurgickými pochody za nízkých teplot atd., které probíhají pozvolna v čase bez ohledu na používání či nepoužívání součásti, a vedou k pozvolným změnám pevnosti, tvaru aj.

Tepelná degradace materiálu, což je radikální změna fyzikálně-mechanických vlastností materiálu vyvolaná teplotou.

Jednotlivé zde popsané druhy poškození strojních součástí jsou typické případy, které se v technické praxi vyskytují spíše výjimečně, většinou pouze tehdy, jestliže naprosto dominuje některá z příčin, která má uvedený případ poškození za následek.

Nejčastěji dochází ke kombinaci vlivů vyvolávajících různá poškození. Tyto vlivy působí buď současně, nebo se v čase vykytují postupně. To pak vede k tomu, že v daném okamžiku poškození buď nemá výrazné znaky jednoho druhu, anebo má typické znaky odpovídající různým druhům poškození současně.

Typické příklady opotřebení

Adhezivní opotřebení

Vyskytuje se v místech kontaktu smýkajících se tuhých těles, přitlačovaných normálovou silou, bez přítomnosti cizích částic mezi povrchy.

V místech největších tlaků mohou vznikat tzv. adhezní můstky, které jsou vzápětí rozrušovány. Podle okamžitých poměrů pak nastávají různé varianty opotřebení:

- Jsou-li adhezní můstky rozrušovány právě na rozhraní původních povrchů a ostatní podmínky v místě kontaktu jsou ustálené, dochází k zabíhání povrchů, které se navzájem přizpůsobují. Vzhled takovýchto povrchů je stejnoměrný, povrchy jsou někdy až vyleštěné, obr. 1.
- Jsou-li materiály v okolí adhezních můstků rozrušovány mimo původní povrchy v obou tělesech, mohou vznikat volné částice a mechanismus adhezního opotřebení postupně přechází v opotřebení abrazivní. Vzhled takovýchto povrchů je zpočátku podobný jako v prvním uvedeném případě, postupně se ve stále větším množství objevují rýhy, obr. 2.

- Jsou-li materiály v okolí adhezních můstků rozrušovány mimo původní povrchy převážně v jednom tělese, mohou vznikat volné částice a mechanismus adhezního opotřebení postupně přechází v opotřebení abrazivní, častěji však dochází k ulpívání uvolněných částic na druhém povrchu, až dojde k zadření, obr. 4.
Není-li včas zjednána náprava, může poškození součásti dosáhnout až bizarních podob, obr. 4.



Obr. 1 Příklad adhezivně opotřebené součásti, mírný průběh opotřebení



Obr. 2 Příklad adhezivně opotřebené součásti, mírný průběh opotřebení



Obr. 3 Příklad adhezivně opotřebené součásti, zadírání



Obr. 4 Příklad velmi pokročilého adhezivního opotřebení

Vibrační opotřebení

Vyskytuje se v místech kontaktu tuhých těles přitlačovaných normálovou silou, která vykonávají oscilační pohyby. Samotný mechanismus vibračního opotřebení je totožný s opotřebením adhezivním, rozdíly ve vnějších projevech jsou dány rozdílným charakterem vzájemného pohybu.

Vibrační opotřebení nastává v případech reálných vibračních pohybů, při kterých se kontaktní povrchy oscilačně smýkají s různě velkou amplitudou pohybu. K vibračnímu opotřebením však dochází i v případě virtuálních vibrací, kdy se povrchy vzájemně nesmýkají, ale působí na sebe oscilujícím napětím. Tento případ se vyskytuje zejména u shodných a nalisovaných uložení.

Pokud jsou funkční povrchy vystavené vibracím pokryty vrstvou maziva, jsou opotřebená místa čistá a zpravidla lesklá. Stopy opotřebení jsou však zřetelné a takto opotřebená místa mnohdy vypadají stejně jako by byla otláčena, obr. 5.

Pokud má do třecího kontaktu přístup vzduch, dochází k rychlé oxidaci vznikajících otěrových částic, které tak získávají charakteristické červenohnědé zbarvení. Následně mohou být tyto částice vtlačovány do povrchů, které tak získávají stejné zbarvení, obr. 6.



Obr. 5 Příklad vibračně opotřebené součásti, bez přístupu vzduchu



Obr. 6 Příklad vibračně opotřebené součásti, s přístupem vzduchu

Abrazivní opotřebení

Vyskytuje se při smýkání tvrdých drsných povrchů, při zpracovávání tvrdého materiálu, při přítomnosti tvrdých částic mezi smýkajícími se povrchy.

Nerovnosti tvrdého povrchu, zpracovávaného materiálu či volných částic se zarývají do opotřebovaného povrchu, který škrábou, rýhují, seřezávají. Charakteristický je právě rýhovaný povrch. Rýhy mohou být jemné, mikroskopické, a povrch se pak jeví jako vyleštěný. Rýhy však mohou být i makroskopické, hluboké, hrubé, běžně viditelné. Intenzita abrazivního opotřebení je zpravidla velká, rychlost opotřebení vysoká, obr. 7.



Obr. 7 Příkladů abrazivně opotřebených součástí

Erozivní opotřebení

Vyskytuje se tam, kde na povrch tělesa působí proud částic unášených plynem nebo kapalinou, popř. proud částic samotné kapaliny nebo páry.

Samotný mechanismus erozivního opotřebení je totožný s opotřebením abrazivním. Vzhled erozivně opotřebeného povrchu je však značně odlišný. Z mikroskopického pohledu je povrch opět rýhovaný, z makroskopického pohledu je však nepravidelně zvlněný, s nerovnoměrně hlubokými stopami v opotřebeném povrchu, obr. 8.



Obr. 8 Příkladů erozivně opotřebených součástí

Únavové opotřebení

Vyskytuje se tam, kde na povrch tělesa dlouhodobě opakovaně působí kontaktní tlaky.

V místě působení tlaku vzniká v povrchové vrstvě materiálu mívivé napětí, které působí postupnou kumulaci vad struktury materiálu. Později vznikne mikrotrhlina, která se dále šíří, až se začnou z povrchu uvolňovat mikročástice materiálu, což se projeví jako důlky v povrchu. Vzhled takto poškozeného povrchu je zpočátku důlkovaný, později se důlky spojují a tvoří se celé poškozené oblasti, obr. 9.



Obr. 9 Příklady opotřebení povrchovou únavou materiálu

Kavitační opotřebení

Vyskytuje se tam, kde na povrch tělesa dlouhodobě opakovaně působí tlaky vyvolané hydraulickými rázy při kavitaci.

Samotný mechanismus kavitačního opotřebení je totožný s opotřebením únavovým. Rovněž vzhled kavitačně opotřebeného povrchu je velmi podobný, poškození je však soustředěno do míst působení rázů, tj. tam, kde zanikají kavitační dutiny. V této oblasti se objevují i velmi hluboká místní poškození, obr. 10.

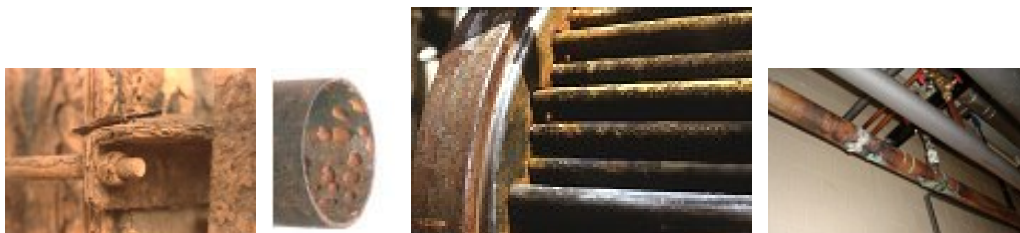


Obr. 10 Příklady kavitačního opotřebení

Typické příklady koroze

Atmosférická koroze

Je nejběžnější, vyskytuje se prakticky všude, obr. 11



Obr. 11 Příklady koroze

Typické příklady otláčení

Ukazují zpravidla na projekční, konstrukční nebo výrobní vadu, případně nesprávný provoz, obr. 12.

Obr. 12 Příklad otláčení



Typické příklady deformací

Deformace strojních součástí ukazují zpravidla na nesprávný provoz (přetížení, havarie), případně na nesprávný konstrukční návrh, obr. 13.



Obr. 13 Příklady deformovaných součástí

Typické příklady trhlin a lomů

Trhliny -

obr. 14, lomy statické - obr. 15, lomy únavové, obr. 16



Obr. 14 Trhliny na součástech



Obr. 15 Statické lomy součástí



Obr. 16 Únavové lomy součástí

Typické příklady ostatního poškození

Ostatní poškození se neprojevuje jednoznačnými charakteristickými znaky. Příčinou ostatního poškození bývá nejčastěji stárnutí materiálu, tepelná degradace materiálu a kombinace těchto příčin. Na vzhledu poškozené součásti se tyto prvotní příčiny projevují různě, velmi závisí na provozních podmínkách. Proto zpravidla nelze jednoznačně označit některý z těchto dějů za poškození. Někdy však lze usuzovat, že zde vliv těchto faktorů byl a že ovlivnil zejména rychlost, s jakou se poškození rozvinulo,

Závěr

Studiem jednotlivých mechanismů poškození strojních součástí a materiálů se zabývá například tribologie, která se zaměřuje na opotřebení, fraktologie, která se zaměřuje na lomy, aplikovaná chemie, která se zaměřuje na korozi. Provozní strojní inženýr i údržbář potřebuje znát podstatu, mechanismy i vnější projevy všech druhů poškození strojních součástí a z toho vyplývající principy jejich možného ovlivňování, aby mohl technicky i ekonomicky správně na jejich vznik a rozvoj reagovat.

Česká společnost pro jakost, z.s., Novotného lávka 5, 110 00 Praha 1
Materiály ze semináře „**Spolehlivost slouží údržbě**“ ze dne 6. 12. 2016

ISBN 978-80-02-02703-4

SPOLEHLIVOST SLOUŽÍ ÚDRŽBĚ

Sborník přednášek, kolektiv autorů, 1. vydání, rok vydání: 2016, vazba brožovaná,
37 stran