

**Česká zemědělská univerzita v Praze**  
Technická fakulta  
Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

# **Prediktivní údržba**

Bakalářská práce

Autor: **Tomáš Kulík**

Vedoucí práce: prof. Ing. Václav Legát, DrSc.

© 2014 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra jakosti a spol. strojů

Technická fakulta

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Kulík Tomáš

Inženýrství údržby

Název práce

**Prediktivní údržba**

Anglický název

**Predictive maintenance**

---

### Cíle práce

Cílem bakalářské práce je vypracování rešerše problematiky prediktivní údržby s uvedením příkladu řešení.

### Metodika

Studium literatury, zpracování rešerše problematiky prediktivní údržby se zaměřením na podstatu a metody predikování mezních stavů pro obnovu objektů. Uvedení příkladu výpočtu dispoziční doby provozu. Přínos prediktivní údržby v managementu majetku, strojů a zařízení a jejich údržby.

### Osnova práce

1. Úvod
2. Přehled současného stavu - rešerše
3. Příklad řešení prediktivní údržby
4. Přínos prediktivní údržby
5. Závěr

### Rozsah textové části

30 - 40 stran

### Klíčová slova

prediktivní údržba, diagnostika, optimalizace prediktivní údržby, dispoziční doba provozu

---

### Doporučené zdroje informací

LEGÁT, V. a kol.: Management a inženýrství údržby. Professional Publishing, Praha 2013, ISBN 978-80-7431-119-2

ČSN IEC 812:1992 METODY ANALÝZY SPOLEHLIVOSTI SYSTÉMU. Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA)

ČSN IEC 60300-3-11: 1999 Management spolehlivosti – Část 3-11: Návod k použití – Údržba zaměřená na bezporuchovost.

LEGÁT, V.: Využití informací o životnosti strojních prvků k optimalizaci jejich preventivní údržby. In: Sborník konference JAKOST'99, DTO Ostrava 1999. s. H17-H24.

CAMPBELL, J. D.: Uptime – Strategies for Excellence in Maintenance Management. Productivity Press, Portland, Oregon 1995.

---

### Vedoucí práce

Legát Václav, prof. Ing., DrSc.

### Termín zadání

listopad 2012

### Termín odevzdání

duben 2014

---

Elektronicky schváleno dne 7.12.2013

**prof. Ing. Josef Pošta, CSc.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 3.2.2014

**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan fakulty

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Prediktivní údržba vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona tj. o užití tohoto díla.

.....  
Tomáš Kulík

V Praze dne 6. dubna 2014.

## **Poděkování**

Děkuji prof. Ing. Václavovi Legátovi, DrSc., vedoucímu mé bakalářské práce, za odborné vedení, zájem, trpělivost, veškeré připomínky a čas, který mi věnoval při psaní bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval své rodině a všem, kteří mne podporovali při studiu.

## Anotace

**Abstrakt:** Tato bakalářská práce se zabývá řešením problému preventivní údržby. V první části práce je vysvětlen rozdíl mezi jednotlivými typy údržby a základními pojmy v údržbě a diagnostiky obecně. Následně se text více zaměřuje na výhody prediktivní údržby. Na jednoduchém příkladu se snaží potvrdit, že správně vykonávaná prediktivní údržba zvyšuje pohotovost strojů a zařízení a také tržby organizace.

**Klíčová slova:** prediktivní údržba, diagnostika, optimalizace prediktivní údržby, dispoziční doba provozu.

## Predictive maintenance

**Summary:** This bachelor thesis deals with preventive maintenance problem. The first part explains the main differences between types of maintenance and basic terms used in maintenance and diagnostic. Following part is focused on benefits of predictive maintenance. There is given a simple example that confirms the advantage of correct predictive maintenance increasing readiness of machines and equipment and also corporation sales.

**Key words:** predictive maintenance, diagnostics, predictive maintenance optimization, operation time layout.

## Obsah

1	Úvod .....	1
1.1	Cíl práce .....	1
2	Přehled současného stavu .....	2
2.1	Údržba a její typy .....	2
2.1.1	Údržba po poruše .....	3
2.1.2	Preventivní údržba .....	4
2.1.3	Preventivní periodická údržba s předem stanovenými intervaly .....	5
2.1.4	Diagnostická prediktivní údržba .....	6
2.2	Technická diagnostika .....	7
2.2.1	Vibrodiagnostika .....	10
2.2.2	Tribotechnická diagnostika .....	11
2.2.3	Termodiagnostika .....	11
2.2.4	Vizuální kontrola .....	12
3	Příklad řešení prediktivní údržby .....	13
3.1	Metodika optimalizace preventivní diagnostické údržby .....	14
3.2	Vliv pohotovosti na výkonost výrobního zařízení .....	18
4	Přínos prediktivní údržby .....	21
4.1	Diagnostická prediktivní údržba .....	21
4.1.1	Výchozí údaje .....	21
4.1.2	Řešení .....	22
4.2	Periodická údržba .....	25
4.2.1	Výchozí údaje .....	25
4.2.2	Řešení .....	26
5	Závěr .....	29
6	Seznam literatury .....	30
7	Seznam obrázků .....	31

8	Seznam tabulek.....	32
9	Seznam zkratk.....	33
10	Přílohy .....	36



## 1 Úvod

S rostoucí kvalitou a náročností výrobních zařízení roste i potřeba na jejich kvalifikovanou a správně prováděnou údržbu. Na volbu druhu údržby má vliv mnoho činitelů. Není snadné zvolit správný typ údržby a také správně zvolenou údržbu vykonávat. Efektivnost údržby přímo souvisí s kvalitou výroby a pohotovostí výrobního zařízení, s přímým vlivem na tržby a výrobní náklady. Stále platí, že *„ušetřená koruna v údržbě znamená o korunu větší zisk, ale správně použitá koruna v údržbě může znamenat mnohonásobně více.“*

Tato práce stručně charakterizuje druhy údržby, diagnostickou prediktivní údržbu a k ní potřebnou technickou diagnostiku. Na krátkém simulovaném příkladu uvede možnost optimalizace diagnostické prediktivní údržby i periodické údržby a jejich dopad na pohotovost strojů a zařízení včetně ekonomických přínosů.

### 1.1 Cíl práce

Cílem práce je ukázat, že prediktivní diagnostická údržba snižuje výskyt poruch a rozsah neplánovaných prostojů výrobních zařízení, ukázat způsob optimalizace prediktivní diagnostické údržby, její vliv na pohotovost, a tím dokázat, že prediktivní diagnostická údržba je cesta k vyšší výrobě a tržbě.

## 2 Přehled současného stavu

### 2.1 Údržba a její typy

Údržba představuje proces řízení definovaný jako kombinace všech technických, administrativních a manažerských opatření během životního cyklu objektu, zaměřených na jeho udržení ve stavu nebo jeho navrácení do stavu, v němž může vykonávat požadovanou funkci (ČSN EN 13306) [1].

Jinak řečeno údržba je souhrn všech činností vykonávaných za účelem:

- udržení stroje v bezporuchovém stavu,
- navrácení stroje z poruchového do bezporuchového stavu.

Efektivnost údržby je velmi podstatně ovlivněna volbou vhodného systému údržby. Při jeho volbě či návrhu je nutné brát v potaz mnoho kritérií a ani poté se nedá říct, že na každé kritérium existuje „nejlepší“ odpověď. Vždy však existují jisté základní principy, které jsou apriori dány volbou systému údržby [2].

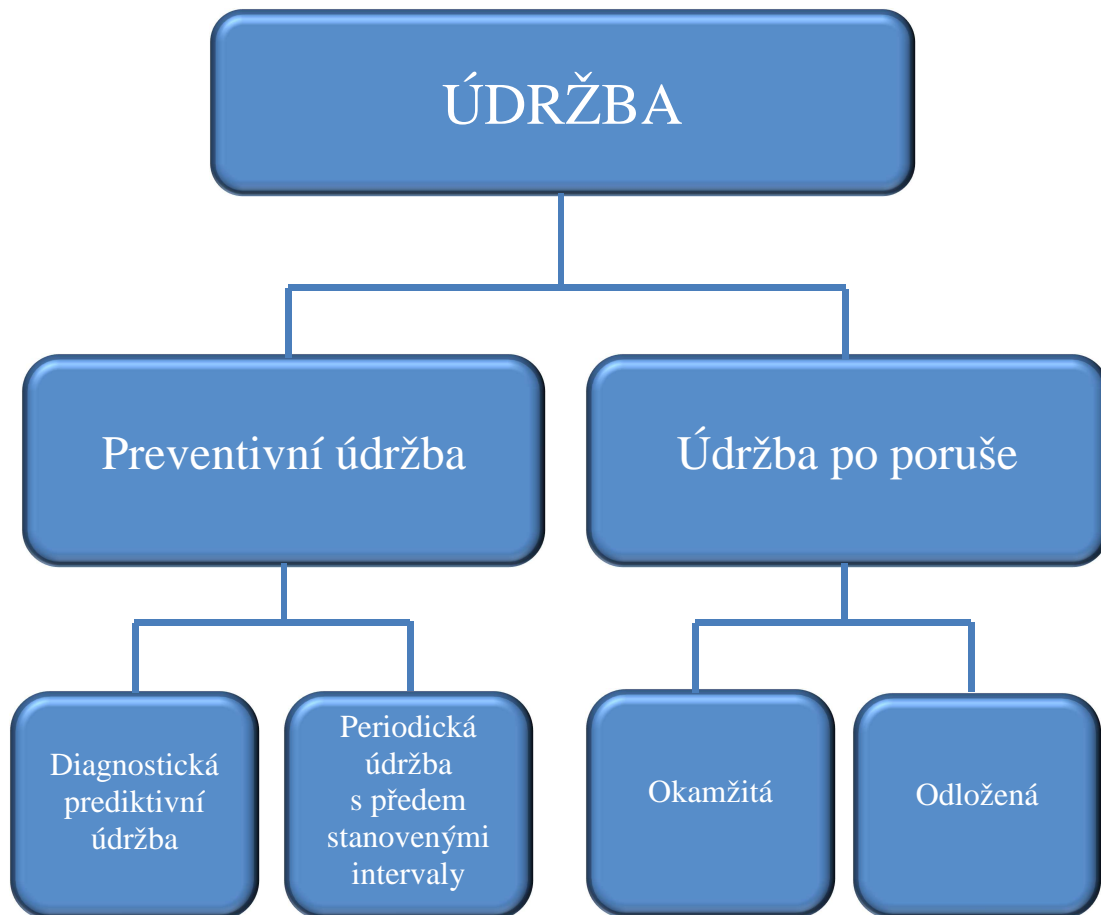
Z hlediska údržby prvků je možné údržbové systémy rozdělit na:

**Individuální** – prvky jsou udržovány tehdy, kdy je to nevhodnější z hlediska spolehlivosti prvku. Tím se dosáhne maximálního využití i efektivity. Pokud je takových prvků v jednom stroji více, zvyšuje se doba prostoje v údržbě neúměrně, jelikož individuální údržba neumožňuje kumulaci prací. To se jeví jako nevýhoda.

**Skupinový** – skupinová údržba umožňuje účelně seskupit plánované práce, které probíhají současně na více prvcích. Klesá pracnost přípravy k provádění údržby a také se snižuje doba prostoje v údržbě.

**Komplexní** – údržba je prováděna na všech prvcích současně. Minimalizuje prostoj v údržbě [2].

Z hlediska typů údržby je rozdělení znázorněno na *obr. 1*.



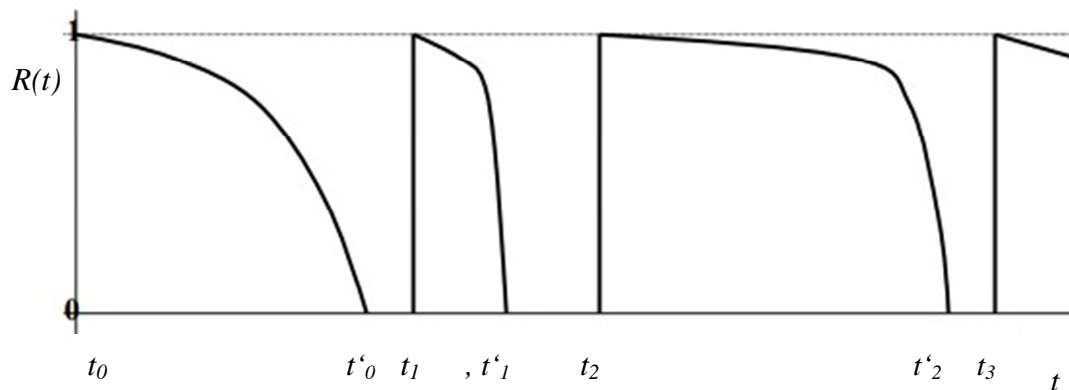
*Obr. 1 Přehled typů údržby*

### 2.1.1 Údržba po poruše

Je to historicky nejstarší typ údržby, také se jí říká korektivní údržba. Údržba je prováděna až v okamžiku poruchy prvku, neprovádí se tedy preventivně [1].

Základní výhodou tohoto typu údržby je maximální využití doby fyzického života komponentu nebo zařízení, náklady na sledování stavu zařízení jsou nulové nebo minimální.

Nevýhodou je, že porucha přichází neočekávaně. Doby do poruchy prvku jsou náhodnou veličinou. Porucha představuje nevýhody v podobě neplánovaných delších odstávek a s tím spojené přidělování zdrojů, které vyvolává nadbytečné náklady a potřebu vyšších zásob náhradních dílů. Porucha prvku proto má vždy vliv na pohotovost zařízení, kvalitu výroby, bezpečnost a životní prostředí nebo na vyvolání vzniku poškození ostatních prvků. Prvek by měl být snadno vyměnitelný, aby se snížila doba prostoje v údržbě [1, 2, 5, 6].



Obr. 2 Údržba po poruše [2]

Kde:

- $R(t)$  je pravděpodobnost bezporuchového provozu
- $t'_{0}, t'_{1}, t'_{2}$  - doba vzniku poruchy, vzniká poruchový stav,
- $t_{1}, t_{2}, t_{3}$  - doba ukončení opravy, vzniká bezporuchový stav,
- $t'_{0} - t_{1}$  - doba údržby (obnovy) prvku.

Musíme vzít v úvahu, že i údržba po poruše může být plánovaná v případě údržby po poruše odložené. Tento způsob údržby je použitelný jen pokud objekt nevyžaduje okamžitý zásah pro nezávažné následky poruchového stavu. V praxi se to často vyskytuje jako částečný poruchový stav, při kterém dochází ke ztrátě jen částí funkcí, respektive umožňuje objektu plnění funkce při sníženém výkonu, nevyžaduje okamžitou odstávku, a proto zásah údržby může být posunut na čas, kdy není požadována činnost objektu [1, 2, 4, 6].

### 2.1.2 Preventivní údržba

Preventivní údržba je činnost, která se oproti údržbě po poruše provádí většinou před výskytem poruchy. Principem preventivní údržby je včasný zásah v oblasti známých běžně se vyskytujících selhání na technickém zařízení, které umožní zachytit příznaky počínající velké poruchy a příčiny těchto příznaků systematicky odstraňovat, případně vytvářet taková technicko organizační opatření, která by četnost výskytu příznaků i poruch zmenšovala. Preventivní údržba se dále dělí na takzvanou údržbu **periodickou**, neboli údržbu s předem stanovenými intervaly a na údržbu **diagnostickou**, jinak řečeno prediktivní údržbu [1, 2].

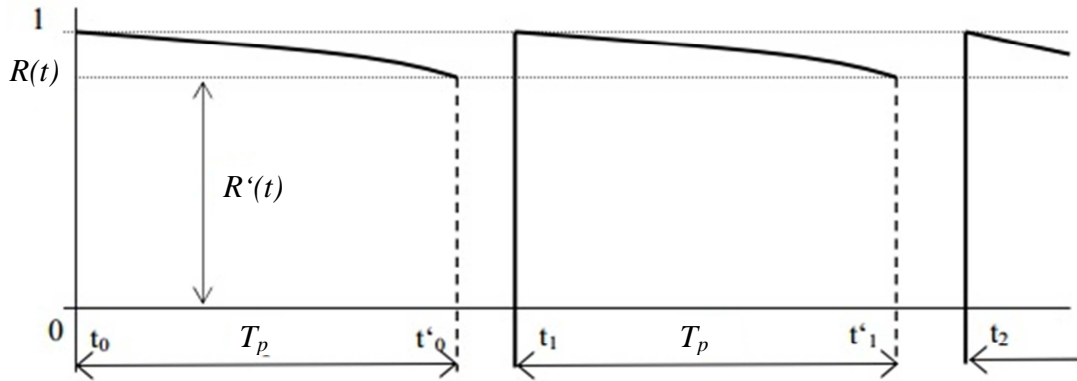
### 2.1.3 Preventivní periodická údržba s předem stanovenými intervaly

Obvykle zahrnuje kontroly, prohlídky nebo předepsané činnosti ve stanoveném kalendářním intervalu (*obr. 3*), případně po stanovené době provozu (stanoveném počtu jednotek používání). Proto se používá u součástí nebo systémů kritických z hlediska bezpečnosti nebo ohrožení životního prostředí, kde prakticky není možné použít zálohování. Určení intervalu ( $T_p$ ) preventivních činností bez korektních informací, založených na statickém sledování, není lehké. Frekvence opakování činností je často určena odhadem a ne vždy upravená vzhledem ke skutečnému stavu objektu. Někdy se stane, že i po provedených preventivních činnostech vzniknou poruchy a mnohdy se ukáže, že preventivní činnosti jsou zbytečné. Údržba a obnova by měla probíhat zásadně podle předepsaných technologických postupů, prvek je zpravidla po jisté době provozu vyřazen a nahrazen novým, nebo je provedena velmi důkladná kontrola s využitím nedestruktivních metod [1, 2, 6].

Tato údržba představuje vysoký stupeň plánované práce a zpravidla vede ke snížení nákladů na údržbu po poruše. Umožňuje prodloužit dobu života zařízení do poruchy. Nápravné akce lze dobře plánovat, a tím usnadnit organizaci práce [2, 5].

Problémem je, že výkon pravidelných údržbářských zásahů a odstávek na zařízeních, jejichž stav to nevyžaduje, může způsobovat zbytečné náklady a navíc způsobovat poruchy při demontáži a zpětné montáži zařízení [1].

Celkově lze shrnout, že vykonávání periodických údržeb je vhodné tehdy, pokud nelze vykonávat levnou a přesnou diagnostiku a jsou-li nevhodné údržby po poruše [1].



Obr. 3 Preventivní údržba s předem stanovenými intervaly [2]

Kde:

$R(t)$  je pravděpodobnost bezporuchového provozu

$t_0, t_1$  - interval preventivní údržby  $T_p$ ,

$t'_0, t'_1$  - doba preventivní údržby (obnovy) prvku, soustavy.

#### 2.1.4 Diagnostická prediktivní údržba

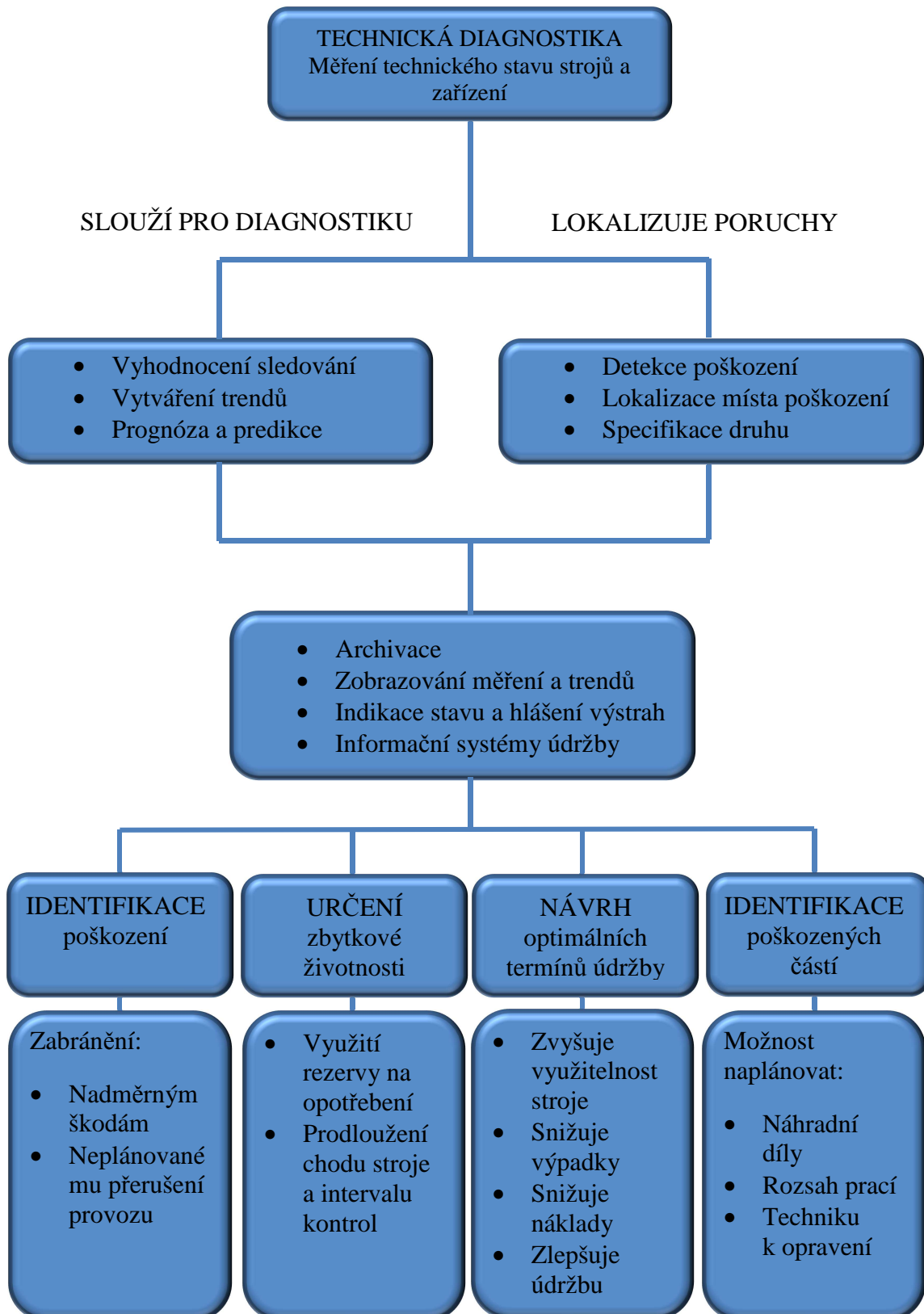
Využívá schopnost správně vyhodnotit získané informace a na základě tohoto předvídat budoucí vývoj stavu zařízení a určit kroky potřebné k tomu, aby se nepříznivému stavu předcházelo. Je založena na využití výsledků diagnostických prohlídek nebo průběžného monitorování technického stavu. Protože nelze tuto údržbu dělat bez diagnostiky, je v názvu přívlástek diagnostická. Dobře známé jsou tradiční metody sledování stavu zařízení založené na hluku, přehřátí, netěsnosti a zhoršení stavu povrchu. Takovéto metodě napomáhají technická zdokonalování a dostupnost přístrojů, které umožňují sledovat fyzikální vlastnosti zařízení a vyvinuté postupy vyhodnocování získaných informací. Významným pomocníkem pro získání potřebných informací je technická diagnostika [1, 2, 5].

Jako následek optimalizačního řešení při seskupování oprav různě poškozených prvků se mění případ od případu i okamžik a rozsah diagnostické údržby. Toto vyplývá z podstaty systému, ve kterém se jednotlivé prvky sledují průběžně. Při diagnostické údržbě může jít o individuální výměnu součásti, obnovu několika součástí, dále o běžnou nebo generální opravu strojní skupiny, nebo i o generální opravu celého stroje v případě souhry náhodných faktorů. U výkonných strojů a zařízení s těsnými sériovými funkčními vazbami při provozu mají důležitou úlohu prostoje a náklady, které podporují seskupování obnov prvků do rámce společných rozsáhlých zásahů. Z toho vyplývá, že vzniká předstih mezi dobou požadavku na materiál a okamžikem spotřeby, což vede ke snížení nároků na rychlost dodávek [1, 4].

Malá aplikace tohoto typu údržby je způsobena také nezbytnou počáteční investicí na pořízení diagnostických snímačů, měřicího zařízení a softwaru pro vyhodnocování. Případně v dodatečných provozních nákladech na údržbu samotného diagnostického systému [1].

## 2.2 Technická diagnostika

S rostoucí složitostí a cenou strojů patří metody technické diagnostiky, bez kterých by prediktivní údržba nešla vykonávat ani zajišťovat, k nejdůležitějším prostředkům zajištění údržby, které zvyšují význam spolehlivého určení příčiny a místa poruchy, detekci postupně narůstajícího poškození, prognózování vývoje technického stavu, a tím ovlivňují obsah údržby v celé své komplexnosti. Vlastní obsah, význam a přínos technické diagnostiky lze nejlépe vyjádřit *obr. 4*. Z daného obrázku jednoznačně vyplývá, že technická diagnostika je základem pro strategické plánování a řízení údržby. V praxi to znamená, že technická diagnostika je hlavním nástrojem kontrolně inspekční a revizní činnosti (zjišťování technického stavu a opotřebení), rozhoduje o nutnosti a rozsahu prováděných oprav (odstraňování následku opotřebení), patří k nástrojům a prostředkům autonomní údržby, kde ohodnocuje dodržování zásad správného provozu [1, 3].



Obr. 4 Přínos a úlohy technické diagnostiky [3]



Technická diagnostika je tedy předpokladem k zajištění bezpečného provozu, tzn. je také prostředkem ke snižování rizika v obecném smyslu [3].

### Obecné rozdělení:

Obecně se diagnostické metody nechají rozdělit na **subjektivní metody**, které jsou založené na individuálních schopnostech lidí (jejich smyslů) a **objektivní metody**, založené na exaktním měření zvolené fyzikální veličiny, jejíž hodnota je ukazatelem technického stavu diagnostikovaného objektu [3].

K subjektivní diagnostice se využívá:

- Sluch, kterým je možno sledovat kmitání ve slyšitelném rozsahu. Jako pomůcka se používá technický stetoskop.
- Zrak, kterým je možno sledovat vizuální projevy objektu, například unikání provozních hmot, barvu, drsnost, přítomnost cizích těles, lom součástí apod. Jako pomůcka se používá lupa, mikroskop, dalekohled.
- Hmat, kterým můžeme sledovat chvění, vůle v uložení, teplotu a drsnost povrchu.
- Čich, kterým můžeme sledovat přehřívání izolací a třecích obložení [1, 3].

K objektivní diagnostice se využívá měření a analýza:

- Provozních parametrů strojů, jako je výkon, otáčky, spotřeba paliva, příkon, tlaky a jiné.
- Kmitání strojů a jejich částí, jako je amplituda, rychlost, zrychlení kmitů a jiné.
- Produktů opotřebení v olejových náplních, jako je množství a druh otěrových částic a nečistot, změnu chemické reakce, změnu viskozity a jiné.
- Tepelných polí diagnostikovaného objektu.
- Fyzikálních veličin, jako je napětí, proud, průtok, tlak a jiné a jejich okamžitý průběh [1, 3].

## Nejvíce používané diagnostické metody:

Přínos technické diagnostiky je v tom, že je nezbytná pro plánování a řízení údržby. Správný výběr a kombinace diagnostických metod a postupů i vhodně nastavený interval měření je nezbytný pro rychlé a přesné odhalení vznikajícího problému a charakterizování skutečného technického stavu zařízení.

Používané diagnostické metody:

- Vibrodiagnostika,
- Termodiagnostika,
- Tribotechnická diagnostika,
- Vizuální kontrola [1, 3].

### 2.2.1 Vibrodiagnostika

Nejvíce používanou metodou monitorování technického stavu rotačních strojů je tzv. vibrační diagnostika (někdy též vibrodiagnostika). Je to bezdemontážní diagnostika vykonávaná při práci zařízení, založená na hodnocení mechanického kmitání, změřeného na pohyblivých i nepohyblivých částech stroje. Využití správných postupů a metod vibrodiagnostiky vede k předcházení nečekaných poruch a s tím souvisejících problémů. Využívá se na běžné provozní monitorování strojů i pro diagnostické kontroly. Provádí se v režimu on-line i off-line.

Pomocí vibrodiagnostiky může být snímána a vyhodnocována celá řada charakterizujících signálů, nejčastěji se snímají tyto:

- Celkové vibrace,
- Absolutní vibrace,
- Relativní vibrace,
- Amplitudy signálu na poruchových frekvencích,
- Trendy hodnot vibrací [1, 3].

### 2.2.2 Tribotechnická diagnostika

Jedná se o bezdemontážní diagnostickou metodu, která se zabývá mazivy, mazacími zařízeními a pracovními postupy mazání. Tato metoda využívá mazivo jako nositele informací o změnách v mazaných místech. Jde o spojení praktických a teoretických řešení v oblasti tření, mazání a opotřebení. Jejím posláním je zjistit a vyhodnotit výskyt cizorodých látek v mazivu a jeho fyzikální i chemické změny, a to kvantitativně i kvalitativně [1, 3].

Analýza oleje je základem tribotechnické diagnostiky, která se dělí na dvě základní části:

- **Tribotechnickou diagnostiku oleje**, při které se sledují změny fyzikálněchemických vlastností oleje.
  - Viskozita, - Viskozitní index,
  - Bod vzplanutí, - Bod tekutosti,
  - Karbonizační zbytek, - Číslo kyselosti,
  - Obsah vody, - Obsah nečistot,
  - Číslo celkové alkality, - Číslo celkové kyselosti,
  - Stanovení pH, - Přítomnost glykolu,
  - Deemulgační schopnosti, - Pěnivost,
  - Vzhled, - Barva,
  - Stanovení obsahu přísad, - Obsah křemíku,
  - Infračervená spektrometrie [1].
- **Tribotechnickou diagnostiku stroje**, při které se sleduje opotřebení a jeho intenzita [1].

### 2.2.3 Termodiagnostika

Termodiagnostika využívá poznatku termografie, což je pasivní, bezdotyková měřicí metoda. Obvykle se používá tzv. termovize, tj. měření termokamerou, která zobrazuje rozložení povrchové teploty snímaného objektu a poté vypočítává povrchovou teplotu a vytváří viditelný obraz rozložení povrchové teploty objektu. Výpočet probíhá s ohledem na stupeň emisivity (schopnost materiálu přijímat a vyzařovat infračervené záření) povrchu měřeného objektu, kompenzaci odražené teploty a někdy i dalších parametrů jako je vzdálenost od měřeného objektu, relativní vlhkost vzduchu a teplota vzduchu. Jde o bezdemontážní, bezkontaktní měření, prováděné během práce sledovaného objektu [1].

#### 2.2.4 Vizuální kontrola

Vizuální kontrola je jednoduchá a účinná metoda sloužící ke zjišťování zjevných vad povrchu a kontrolovaných částí. Jsou to kontroly nevyžadující zpravidla rozsáhlejší demontáž kontrolovaného zařízení. Kontroly se provádějí v klidovém stavu zařízení [1, 3].

Podle přístupnosti kontrolovaných lze vizuální kontrolu rozdělit na:

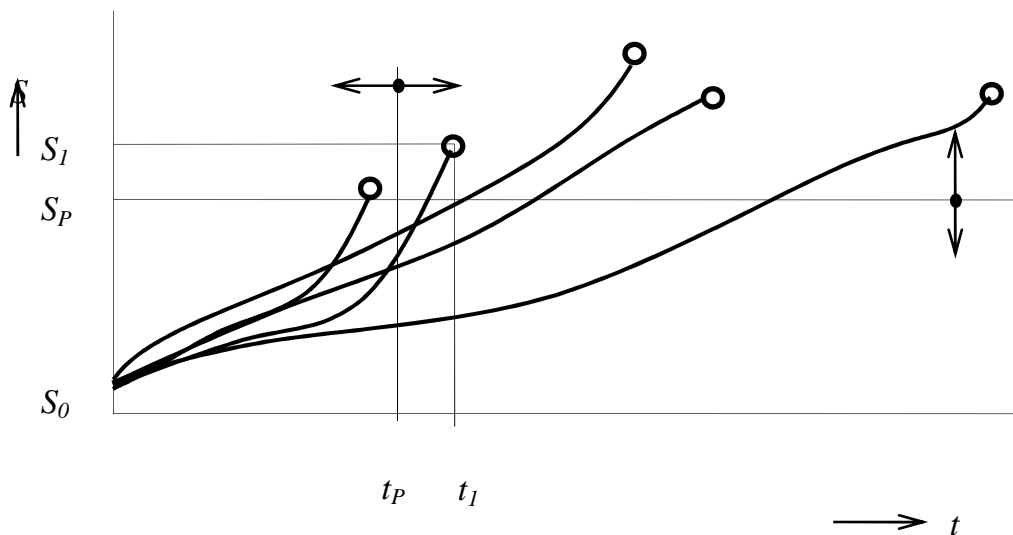
- Přímou vizuální kontrolu, kterou lze aplikovat na všechny přístupné povrchy materiálů a výrobků. Provádí se pouhým okem nebo lupou s dostatečným zvětšením za dobrého osvětlení.
- Nepřímou vizuální kontrolu, prováděnou různými způsoby, které dovolují vizuální kontrolu nepřístupných povrchů pomocí speciálních zařízení, zejména průmyslových endoskopů resp. boroskopů [1].

### 3 Příklad řešení prediktivní údržby

Zadejme si několik předpokladů:

- Existuje reálná možnost experimentálně sledovat soubor dvoustavových strojních prvků, zpravidla neopravovaných, až do jejich poruchy, a tím získat i příslušné hodnoty jejich fyzického života  $t$  [5].  
Dvoustavový prvek může být například ozubené kolo, valivé ložisko aj.
- U uvažovaných prvků je možno průběžně sledovat a zjišťovat změny jejich technického stavu  $S$  diagnostickými signály, různými diagnostickými metodami, přístroji a registračními zařízeními viz *obr. 5* [5].

Mezní stavy (poruchy) jsou na obrázku vyobrazeny kroužky, jejich souřadnice jsou určeny příslušným diagnostickým signálem a fyzickým životem, např.  $S_I$  a  $t_I$  [5].



*Obr. 5 Závislost diagnostického signálu  $S$  na době provozu  $t$ , fyzický život a princip tvorby preventivní údržby [5]*

Z obrázku vyplývá, že fyzický život i diagnostický signál jsou náhodné veličiny s hustotou pravděpodobnosti doby do poruchy  $f_1(t)$ ,  $f_2(S)$ , resp. distribuční funkcí  $F_1(t)$ ,  $F_2(S)$ , resp. pravděpodobností bezporuchového provozu  $R_1(t)$ ,  $R_2(S)$  a intenzitou poruch  $\lambda_1(t)$ ,  $\lambda_2(S)$  [5].

Preventivní údržba může být vykonána jak v okamžiku vzniku poruchy tak po pevně stanovené době provozu  $t_p$ , respektive při hodnotě diagnostického signálu  $S_p$ , podle toho, který jev nastane dříve;  $t_p$  značí interval pro obnovu a  $S_p$  diagnostický signál pro obnovu pro strategii věkové neboli diagnostické obnovy. Hodnoty optimalizovaných veličin  $t_p$  respektive  $S_p$  závisejí na ekonomických a provozních podmínkách používání daného strojního prvku a mohou se tedy měnit [5].

### 3.1 Metodika optimalizace preventivní diagnostické údržby

Základem **optimalizace preventivní údržby** je nalezení takového okamžiku, nebo hodnoty **diagnostického signálu**, kdy provedená obnova (za předpokladu, že v tomto okamžiku prvek „žil“) zajišťuje dosažení **minimálních průměrných jednotkových nákladů na provoz a obnovu** daného objektu v průběhu jeho celého užitečného života [10].

Vstupní údaje pro výpočet optimálního intervalu preventivní údržby (obnovy, seřízení, opravy, výměny, renovace apod.) jsou:

- a) náklady na preventivní údržbu  $N_o$ ,
- b) ztráty způsobené havarijní poruchou (rozdíl nákladů na údržbu po poruše  $N_h$  a na preventivní údržbu  $N_o$  téhož strojního prvku)  $Z_h = N_h - N_o$ ,
- c) pravděpodobnost výskytu havarijní poruchy v závislosti na intervalu preventivní údržby  $F(t_p)$  resp. na diagnostickém signálu  $F(S_p)$ ,
- d) funkční závislost středního intervalu preventivní údržby na prostém intervalu preventivní údržby  $\bar{t}(t_p)$  resp. na diagnostickém signálu  $\bar{t}(S_p)$ ,
- e) funkční závislost středních kumulativních nákladů na provoz objektu vyvolaných narůstajícím opotřebením sledovaných funkčních ploch součástí a skupin v závislosti na intervalu preventivní údržby  $NP_e(t_p)$  resp. na diagnostickém signálu  $NP_e(S_p)$ ,
- f) funkční závislost středních kumulativních nákladů na provoz objektu vyvolaných jeho diagnostikou (monitorováním technického stavu) v závislosti na intervalu preventivní údržby  $NP_d(t_p)$  resp. na diagnostickém signálu  $NP_d(S_p)$  [5, 8, 9].

Na základě protichůdných nákladových trendů v jejich jednotkovém vyjádření lze stanovit hledanou optimální hodnotu intervalu preventivní údržby  $t_{pO}$ , případně optimální hodnotu diagnostického signálu pro údržbu  $S_{pO}$  s využitím vztahů pro průměrné jednotkové náklady  $u$  [5]

$$u(t_p) = \frac{N_o + Z_h \cdot F(t_p) + N_{pe}(t_p) + N_{pd}(t_p)}{\bar{t}(t_p)} \quad (1a)$$

příp.

$$u(S_p) = \frac{N_o + Z_h \cdot F(S_p) + N_{pe}(S_p) + N_{pd}(S_p)}{\bar{t}(S_p)} \quad (1b)$$

Funkční závislost středního intervalu (střední doby provozu do) preventivní údržby na prostém intervalu preventivní údržby  $\bar{t}(t_p)$  případně na diagnostickém signálu  $\bar{t}(S_p)$  můžeme stanovit z experimentálně zjištěných údajů ze vztahu

$$\bar{t}(t_p) = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^{m(t_p)} t_i(t_p) + \sum_{j=1}^{n-m(t_p)} t_j(t_p) \right] \quad (2a)$$

příp.

$$\bar{t}(S_p) = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^{m(S_p)} t_i(S_p) + \sum_{j=1}^{n-m(S_p)} t_j(S_p) \right] \quad (2b)$$

kde:

$t_i(t_p)$  resp.  $t_i(S_p)$  je doba provozu  $i$ -tého strojního prvku, žijícího při stavu  $t_p$  resp.  $S_p$ ,

$t_j(t_p)$  resp.  $t_j(S_p)$  je doba provozu (fyzický život)  $j$ -tého strojního prvku, který při stavu  $t_p$  resp.  $S_p$  již nežije,

$m(t_p)$  resp.  $m(S_p)$  je počet prvků žijících při stavu  $t_p$  resp.  $S_p$ ,

$n$  je počet všech sledovaných strojních prvků daného typu [5].

Pro dvoustavové prvky je zpravidla čítel v obou rovnicích (1a) a (1b) zredukován na první dva sčítance a pro vícestavové prvky bývá druhý sčítanec v čitateli zpravidla nulový. Hledaným hodnotám optimálních intervalů preventivních údržeb přísluší vždy minimální hodnota průměrných nákladů na provoz a údržbu sledovaných prvků. Tuto hodnotu vyšetříme pomocí první derivace podle  $t_p$  resp.  $S_p$  a jejím položením rovno nule [5].

Při konkrétním výpočtu optimálních hodnot diagnostických signálů (normativů pro obnovu – údržbu) hledáme konkrétní vyjádření výše uvedených obecných funkčních závislostí (1) a (2). Pro funkci pravděpodobnosti poruchy v závislosti na diagnostickém signálu  $S$  použijeme Weibullovo rozdělení

$$F(S) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{S-S_z}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (3)$$

$$\text{pro } S < S_z ; F(S)=0$$

kde  $S_z$  je hodnota diagnostického signálu při prvním výskytu poruchy (třetí parametr Weibullova rozdělení),  $\alpha$  a  $\beta$  jsou parametry Weibullova rozdělení [5].

Průběh střední doby provozu  $\bar{t}(S)$  v závislosti na diagnostickém signálu  $S$  se vyznačuje degresivním přírůstkem, přičemž maximální hodnota střední doby provozu je rovna střednímu fyzickému životu  $\bar{t}_f$  strojního prvku při  $S=S_{max}$  a  $S \rightarrow \infty$  pro teoretické vyjádření závislosti. Těmto požadavkům odpovídá např. tato funkce

$$\bar{t}(S) = \bar{t}_f - \bar{t}_f \exp\left[-B(S - S_{zp})\right] \quad (4a)$$

kde  $B$  je parametr funkce střední doby provozu zjištěný metodami korelační a regresní analýzy a  $S_{zp}$  je průměrná hodnota diagnostického signálu na počátku provozu ( $t=0$ ) [5].

Závislost střední hodnoty diagnostického signálu na době provozu určíme pomocí inverzní funkce k funkci (4a) [5],

$$S = S_{zp} + \frac{\ln\left(\frac{\bar{t}_f - \bar{t}}{\bar{t}_f}\right)}{-B} \quad (4b)$$



Hledanou závislost pravděpodobnosti poruchy  $F(\bar{t})$  na střední době provozu  $\bar{t}$  dostaneme porovnáním rovnic (3) a (4b). Z rovnice (4a) vypočítáme hodnotu diagnostického signálu  $S$  a dosadíme do vztahu (3) [5]

$$F(\bar{t}) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{B(S_z - S_{zp}) + \ln\left(\frac{\bar{t}_f - \bar{t}}{\bar{t}_f}\right)}{-\alpha B}\right]^\beta\right\} \quad (5)$$

Souhrnné náklady na diagnostiku jednoduše vyjádříme jako součin jednotkových nákladů na diagnostiku  $u_{pd}$  a střední doby provozu  $\bar{t}$  [5]

$$N_{pd}(\bar{t}) = u_{pd} \bar{t} \quad (6)$$

Jednotkové náklady na provoz a obnovu  $u$  získáme malými úpravami dosazením do rovnic (5) a (6) do vztahu (1b) [5],

pro  $N_{pe}(S_p)=0$

$$u(\bar{t}) = \frac{N_o + Z_h - Z_h \exp\left\{-\left[\frac{B(S_z - S_{zp}) + \ln\left(\frac{\bar{t}_f - \bar{t}}{\bar{t}_f}\right)}{-\alpha B}\right]^\beta\right\} + u_{pd}\bar{t}}{\bar{t}} \quad (7)$$

a okamžité jednotkové náklady  $v_p$  určíme derivací čitatele funkce (7) podle  $\bar{t}$  [5]

$$v_p(\bar{t}) = -Z_h \left[ \frac{-(B(S_z - S_{zp}) + \ln\left(\frac{\bar{t}_f - \bar{t}}{\bar{t}_f}\right))}{\alpha B} \right]^\beta \cdot \frac{\beta}{(\bar{t}_f - \bar{t}) \left[ B(S_z - S_{zp}) + \ln\left(\frac{\bar{t}_f - \bar{t}}{\bar{t}_f}\right) \right]} \cdot \exp\left\{-\left[\frac{-(B(S_z - S_{zp}) + \ln\left(\frac{\bar{t}_f - \bar{t}}{\bar{t}_f}\right))}{\alpha B}\right]^\beta\right\} + u_{pd} \quad (8)$$

Je možné dokázat, že optimální hodnota (normativ) střední doby provozu leží v průsečíku funkcí (7) a (8) [5]

$$u(\bar{t}_0) = vp(\bar{t}_0) \quad (9)$$

Hledaný normativ diagnostického signálu  $S_o$  stanovíme z rovnice (4) po úpravách tímto způsobem [5]

$$S_o = S_{zp} + \frac{\ln\left(\frac{\bar{t}_f - \bar{t}_o}{\bar{t}_f}\right)}{-B} \quad (10)$$

Známe-li funkční závislost pravděpodobnosti poruchy  $F(t_p)$  respektive pravděpodobnosti bezporuchového provozu  $R(t_p)$  na prostém intervalu preventivní údržby  $t_p$  v analytickém vyjádření, lze střední dobu provozu do preventivní údržby vyjádřit vztahem [9]

$$\bar{t}(t_p) = \int_0^{t_p} R(t) dt \quad (11)$$

### 3.2 Vliv pohotovosti na výkonnost výrobního zařízení

**Pohotovost** je z hlediska spolehlivosti definována jako schopnost objektu být ve stavu schopném plnit požadovanou funkci v daných podmínkách, v daném časovém okamžiku nebo v daném časovém intervalu, za předpokladu, že jsou zajištěny požadované vnější prostředky [7].

Číselně se pohotovost vyjadřuje součinitelem ustálené pohotovosti  $A$ , který lze vyjádřit vztahem

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

kde  $MTTF$  je střední doba provozu do poruchy a  $MTTR$  je střední doba do obnovy (střední doba trvání údržby, resp. opravy) [7].

Střední dobu do poruchy preventivně periodicky obnoveného objektu  $MTTF_{pred}(t_{po})$  vypočítáme pro Weibullovo rozdělení podle vztahu [7]

$$MTTF_{pred}(t_{po}) = \frac{\int_0^{t_{po}} R(t) dt}{1 - R(t_{po})} \quad (13)$$

Tato střední doba provozu do poruchy  $MTTF_{pred}(t_{po})$  je větší než střední doba provozu do poruchy  $MTTF(t_p = \infty)$  objektu udržovaného po poruše [7].

Dále vypočítáme součinitel pohotovosti  $A(t_p = \infty)$  při obnově objektu po poruše a při konstantní hodnotě střední doby do obnovy  $MTTR$  podle rovnice

$$A(t_p = \infty) = \frac{MTTF(t_p = \infty)}{MTTF(t_p = \infty) + MTTR} \quad (14)$$

a součinitel pohotovosti  $A_{pred}(t_{po})$  při obnově objektu prediktivní údržbou při optimální hodnotě intervalu  $t_{po}$  a při konstantní hodnotě střední doby do obnovy  $MTTR$  podle rovnice [7]

$$A_{prev}(t_{po}) = \frac{MTTF_{pred}(t_{po})}{MTTF_{pred}(t_{po}) + MTTR} \quad (15)$$

**Výkonnost** výrobního zařízení můžeme velmi zjednodušeně vyjádřit jeho schopností vyrábět určitý objem produkce reprezentovaný hodnotou tržeb  $T_r$  za určité období. Maximum tržby  $T_{rmax}$  (při ostatních konstantních faktorech) lze dosáhnout při hodnotě ustálené pohotovosti  $A=1$ . V reálném provozu je hodnota součinitele ustálené pohotovosti vždy menší než jedna a tudíž i reálné tržby  $T_r(A)$  jsou menší než tržby maximální. Známe-li reálné tržby  $T_{ri}(A_{tp=\infty})$  při údržbě po poruše, potom tržby  $T_{ri}(A_{pred}(t_{po}))$  při uplatnění prediktivní údržby (*i-tá* varianta řešení) vypočítáme ze vztahu [7].

$$T_{ri}(A(t_{po})) = T_{ri}(A_1(t_p = \infty)) \frac{A_{pred_i}(t_{po})}{A_1(t_p = \infty)} \quad (16)$$

Ze vztahu (16) vypočítáme i poměr  $p_i$  mezi tržbou při preventivní údržbě  $T_{ri}(A(t_{po}))$  a tržbou při údržbě po poruše  $T_{r1}(A_1(t_p = \infty))$  pro i-tou variantu řešení [9]

$$p_i = \frac{T_{ri}(A_{prev}(t_{po}))}{T_{r1}(A_1(t_p = \infty))} = \frac{A_{prev_i}(t_{po})}{A_1(t_p = \infty)} \quad (17)$$

Výše uvedený teoretický model optimalizace diagnostické údržby přiblížíme na dále uvedeném příkladu při řešení rovnic digitálně, a to pomocí MS Excel.

## 4 Přínos prediktivní údržby

### 4.1 Diagnostická prediktivní údržba

#### 4.1.1 Výchozí údaje

Provozní záznamy simulovaného sledování spolehlivosti, diagnostikování technického stavu a sledování životnosti 80 vybraných strojních prvků vyjadřují vstupní data v *tab. 1* [5].

*Tab. 1 Vstupní data [5]*

$N_O$ (Kč)	1 0000
$Z_h$ (Kč)	3 000
$S_z$	4
MTTR (h)	200
$T_{r1}(A_1(t_p = \infty))$ (Kč)	1 000 000

Absolutní četnosti  $f_{if}$  fyzického života jednotlivých skupin strojních prvků jsou uvedeny v *tab. 2* [5].

*Tab. 2 Absolutní četnosti  $f_{if}$  fyzického života jednotlivých strojních prvků [5]*

Střední intervalů $t_{fi}$ [1000 h]	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5
Absolutní četnosti $f_{fi}$	2	11	19	27	12	6	3

Absolutní četnosti  $f_{jsf}$  diagnostických signálů příslušejících poruchovým stavům jednotlivých skupin strojních prvků jsou uvedeny v *tab. 3*. [5]

*Tab. 3 Absolutní četnosti  $f_{jsf}$  diagnostických signálů příslušejících poruchovým (fyzickým mezním) stavům jednotlivých skupin strojních prvků [5]*

Střední intervalů $S_{fj}$	4,2	4,6	5,0	5,4	5,8	6,2	6,6
Absolutní četnosti $f_{Sfj}$	3	8	27	23	11	6	2

Podrobná tabulka se všemi hodnotami naměřenými diagnostickými signály  $S$  u 80 strojních prvků v pravidelných intervalech 3, 4, 5, 6 a 7 [1000 h] je uvedena v příloze *tab. 4* [5].

#### 4.1.2 Řešení

Z údajů uvedených v *tab. 2* byly pomocí programu MS Excel vypočítány tyto charakteristiky

- střední fyzický život strojních prvků  $\bar{t}_f$ ,
- směrodatná odchylka fyzických životů  $S_{tf}$ ,
- parametry Weibullova rozdělení  $\alpha, \beta, t_\gamma$  [5].

Uvedeno v *tab. 5*.

*Tab. 5 Charakteristiky fyzického života strojních prvků [5]*

$\bar{t}_f$	$S_{tf}$	$\alpha$	$\beta$	$t_\gamma$
10,32	1,33857	2,68185	3,7366	7,00

Z údajů uvedených v *tab. 3* byly vypočítány pomocí programu MS Excel tyto charakteristiky:

- střední hodnota diagnostického signálu příslušející fyzickému meznímu stavu  $S_{fstř}$ ,
- směrodatná odchylka diagnostických signálů příslušejících fyzickým mezním stavům  $S_{sf}$ ,
- parametry Weibullova rozdělení  $\alpha, \beta, S_z$  [5].

Uvedeno v *tab. 6*.

*Tab. 6 Charakteristiky diagnostických signálů příslušejících fyzickým mezním stavům [5]*

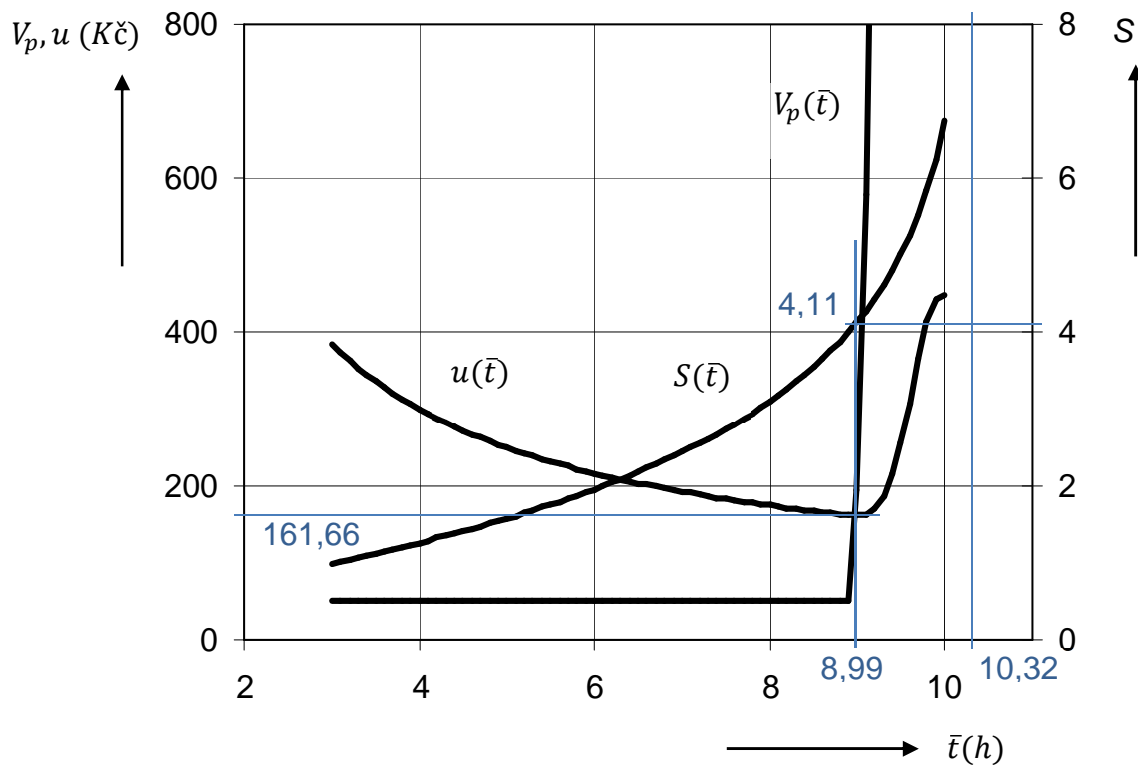
$S_{fstř}$	$S_{sf}$	$\alpha$	$\beta$	$S_z$
5,285	0,5178	2,6583	1,4428	4,00

Z údajů uvedených v *tab. 3* a rovnice (4) (po dosazení  $\bar{t}_f = 10,32$ ) byla vypočítána pomocí programu MS Excel hodnota parametru  $B=0,5466$  a  $S_{zp}=0,3653$ . Nyní již můžeme dosadit zjištěné hodnoty jednotlivých parametrů do rovnice (4b), (7) a (8) a vypočítat příslušné funkční závislosti viz *tab. 7* [5].

*Tab. 7 Závislost diagnostického signálu, průměrných a okamžitých jednotkových nákladů na střední době provozu – numerické stanovení normativu střední doby provozu pro obnovu (zvýrazněné políčko) [5]*

$\bar{t}$	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	<b>8,99</b>	9,50
$S(t)$	0,99	1,26	1,58	1,96	2,44	3,10	<b>4,11</b>	5,01
$u(t)$	383,33	300,00	250,00	216,67	192,86	175,00	<b>161,66</b>	255,73
$v_p(t)$	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	<b>161,66</b>	4689,89

Tyto závislosti jsou rovněž názorně zobrazeny na *obr. 6*. Je zřejmé, že funkce okamžitých jednotkových nákladů  $v_p$  protíná funkci průměrných jednotkových nákladů  $u$  v jejich minimální hodnotě a současně průsečík těchto funkcí určuje úsečku normativu střední doby provozu pro obnovu  $\bar{t}_o = 8,99$ . Z tohoto obrázku je možné i odečíst hodnotu normativu diagnostického signálu pro obnovu (údržbu)  $S_o = 4,11$  a lze ji i vypočítat (po dosazení  $\bar{t}_o$ ) ze vztahu (10) [5].



Obr. 6 Závislost diagnostického signálu, průměrných a okamžitých jednotkových nákladů na střední době provozu – grafické stanovení normativu střední doby provozu a diagnostického signálu pro obnovu [5].

Z údajů uvedených v tab. 1 a v tab.5 byly vypočítány pomocí programu MS Excel numerickou integrací tyto hodnoty:

- doba provozu do poruchy objektu udržovaného po poruše  $MTTR(t_p = \infty)$ ,
- součinitel pohotovosti při obnově objektu po poruše  $A(t_p = \infty)$ ,
- součinitel pohotovosti při obnově objektu prediktivní údržbou při optimální hodnotě intervalu  $A_{pred}(t_{po})$ ,
- poměr mezi tržbou při preventivní údržbě a tržbou při údržbě po poruše  $p_i$ ,
- tržby při uplatnění prediktivní údržby  $T_{ri}(A_{pred}(t_{po}))$ .

Uvedeno v tab. 8.



Tab. 8 Výsledné hodnoty optimálního intervalu prediktivní údržby, reálných tržeb a jejich poměru

$MMTF(t_p = \infty)$	3321
$A_1(t_p = \infty)$	0,943
$A_{pred_i}(t_{po})$	0,978
$p_i$	1,037116
$T_{ri}(A_{pred}(t_{po}))$	1037116

## 4.2 Periodická údržba

### 4.2.1 Výchozí údaje

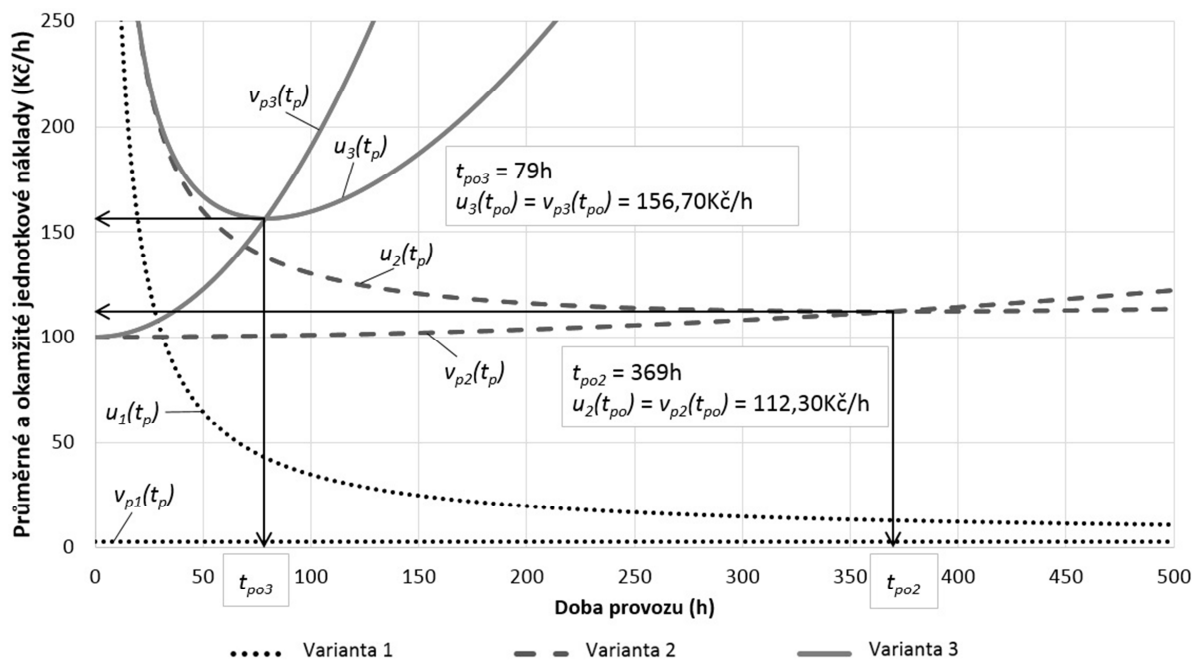
Nasimulovaná vstupní data pro preventivní periodickou údržbu jsou uvedena v tab. 9.

Tab. 9 Vstupní data pro stanovení závislosti součinitele pohotovosti a tržeb [9]

Varianta	1	2	3
$N_o$ (Kč)	3 000	3 000	3 000
$Z_h$ (Kč)	3 000	30 000	3 000 000
$u_{prev}$ (Kč/h)	0	100	100
$\alpha$	1,0	3,0	3,0
$\beta$	1 000	1 000	1 000
MTTR (h)	200	200	200
$T_{r1}(A_1(t_p = \infty))$ (Kč)	1 000 000		

#### 4.2.2 Řešení

K výpočtům hledaných hodnot veličin byl opět využit program Microsoft Excel. Podle rovnice (7) byly vypočteny hodnoty průměrných jednotkových nákladů na provoz a obnovu  $u(t_p)$  - viz *tab. 10* a *obr. 7* a optimální intervaly preventivní periodické údržby  $t_{po}$  viz *tab. 11*. Dále byly vypočteny pohotovosti  $A_1(t_p = \infty)$  z rovnice (14) a  $A_{prev}(t_{po})$  z rovnice (15). V neposlední řadě byly vypočteny hodnoty reálných tržeb  $T_{ri}(A_{prev}(t_{po}))$  z rovnice (16) viz *tab. 11* [9].



Obr. 7 Závislost průměrných a okamžitých jednotkových nákladů na intervalu preventivní periodické údržby [9]

Tab. 10 Hodnoty průměrných jednotkových nákladů na provoz a obnovu v závislosti na intervalu preventivní periodické údržby [9]

Varianta	1							
$t_p$ (h)	5	20	50	100	200	300	1 000	10 000
$u(t_p)$ (Kč/h)	604,501	154,505	64,512	34,525	19,550	14,575	7,746	6,000
$v_p(t_p)$ (Kč/h)	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Varianta	2							
$t_p$ (h)	5	20	50	100	200	300	<b><math>t_{po}=369</math></b>	900
$u(t_p)$ (Kč/h)	700,001	250,012	160,077	130,307	116,228	112,749	<b>112,266</b>	136,955
$v_p(t_p)$ (Kč/h)	100,002	100,036	100,225	100,900	103,600	108,100	<b>112,254</b>	9 100
Varianta	3							
$t_p$ (h)	5	20	50	<b><math>t_{po}=79</math></b>	200	300	1 000	10 000
$u(t_p)$ (Kč/h)	700,075	251,200	167,502	<b>156,700</b>	234,790	378,251	2 452	3 463
$v_p(t_p)$ (Kč/h)	100,225	103,600	122,500	<b>156,169</b>	460,000	910,000	9 100	900 100

Tab. 11 Výsledné hodnoty optimálního intervalu preventivní periodické údržby, pohotovost a reálných tržeb a jejich poměru [9]

Varianta	1	2	3
$t_{po}$ (h)	$\infty$	369	79
$F(t_{po})$	1	0,0490	0,0005
$R(t_{po})$	0	0,9510	0,9995
$A_1(t_p = \infty)$	0,8333		
$A_{prev_i}(t_{po})$	0,8333332	0,9986840	0,9999994
$P_i$	1,000000	1,198421	1,199999
$T_{ri}(A_{prev}(t_{po}))$	1 000 000 Kč	1 198 421 Kč	1 199 999 Kč

## 5 Závěr

Cílem práce byl rozbor problematiky prediktivní údržby. Pro objasnění byly nejprve popsány základní druhy údržby a technické diagnostiky. Následně byl zpracován vzorový příklad výpočtu optimalizace diagnostické prediktivní údržby i periodické údržby a jejich dopad na pohotovost strojů a zařízení včetně ekonomických přínosů.

Z příkladu je patrná nutnost správně zvolit interval oprav. Správně zvolená lhůta intervalu oprav přináší nejnižší náklady na provoz a obnovu zařízení. Zkrácení lhůty způsobuje zvýšení těchto nákladů. Naopak při překročení tohoto intervalu se jednotkové náklady na provoz a obnovu zařízení mohou skokově zvýšit, jak je patrné z uvedených grafů a tabulek. V uvedených příkladech se simulovanými vstupními daty bylo zjištěno, že periodická údržba dosáhla nejlepších výsledků jak v pohotovosti zařízení, tak i v hodnotě tržeb. Diagnostická prediktivní údržba vykázala v řešeném příkladu méně příznivých výsledků. To jen dokazuje nutnost vhodně zvolené diagnostiky a jejího správného vyhodnocení. Přesto lze konstatovat přínos prediktivní údržby pro pohotovost a tržby. Oproti tomu výsledky údržby po poruše se prokázaly jako nejhorší. V souladu s těmito výsledky lze potvrdit význam a přínos prediktivní údržby.

Celkově lze tedy říct, že diagnostická prediktivní údržba přispívá ke zvyšování bezporuchovosti a pohotovosti.

## 6 Seznam literatury

- [1] LEGÁT, V. a kol. *Management a inženýrství údržby*. Praha: Professional Publishing, 2013. 570 p. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [2] FAMFULÍK, J. *Teorie údržby*. Ostrava: VŠB-technická univerzita Ostrava, 2006. 136 p. ISBN 80-248-1029-8.
- [3] HELEBRANT, F., ZIEGLER, J. *Technická diagnostika a spolehlivost II. Vibrodiagnostika*. Ostrava: VŠB-technická univerzita Ostrava, 2004. 178 p. ISBN 80-248-0650-9.
- [4] SUCHAN, V. Analytické operace ve firmě trochu jinak. *IT systems*, 2013, vol. 15, no. 7-8, p. 2-4.
- [5] LEGÁT, V. Optimalizace preventivní údržby podle nákladů a životnosti. *Automa*, 2012, vol. 2, p. 12–15.
- [6] KRUPA, M. Technická prognostika v kontextu prediktivní údržby. *Automa*, 2012, vol. 2, p. 16–19.
- [7] ČSN IEC 60050-191 Mezinárodní elektrotechnický slovník – Část 191: Spolehlivost
- [8] LEGÁT, V., ŽALUDOVÁ, A., ČERVENKA, V., JURČA, V.: *Contribution to optimization of preventive replacement*. Reliability Engineering and System Safety 51,1996 elsevier Science Limited. p. 259-266. ISSN 0951-8320.
- [9] *Preventivní údržba - cesta k vyšší výrobě a tržbám*, Národní fórum údržby; Legát, V., Stávek, M., Zdeněk, A., Eds.; Praha, 2014.
- [10] *Out of control: why controls systems go wrong and how to prevent failure*. 2nd ed. Sudbury: HSE Books, 2003. ISBN 07-176-2192-8.

## 7 Seznam obrázků

- Obr. 1                      Přehled typů údržby*
- Obr. 2                      Údržba po poruše [2]*
- Obr. 3                      Preventivní údržba s předem stanovenými intervaly [2]*
- Obr. 4                      Přínos a úlohy technické diagnostiky [3]*
- Obr. 5                      Závislost diagnostického signálu  $S$  na době provozu  $t$ , fyzický život a princip tvorby preventivní údržby[5]*
- Obr. 6                      Závislost diagnostického signálu, průměrných a okamžitých jednotkových nákladů na střední době provozu – grafické stanovení normativu střední doby provozu a diagnostického signálu pro obnovu [5]*
- Obr. 7                      Závislost průměrných a okamžitých jednotkových nákladů na intervalu preventivní periodické údržby [9]*

## 8 Seznam tabulek

<i>Tab. 1</i>	<i>Vstupní data [5]</i>
<i>Tab. 2</i>	<i>Absolutní četnosti <math>f_{fi}</math> fyzického života jednotlivých strojních prvků [5]</i>
<i>Tab. 3</i>	<i>Absolutní četnosti <math>f_{jsf}</math> diagnostických signálů příslušejících poruchovým (fyzickým mezním) stavům jednotlivých skupin strojních prvků [5]</i>
<i>Tab. 4</i>	<i>Naměřené hodnoty diagnostických signálů <math>S</math> v časech <math>t=3, 4, 5, 6, a 7</math> [1000 h] [5]</i>
<i>Tab. 5</i>	<i>Charakteristiky fyzického života strojních prvků [5]</i>
<i>Tab. 6</i>	<i>Charakteristiky diagnostických signálů příslušejících fyzickým mezním stavům [5]</i>
<i>Tab. 7</i>	<i>Závislost diagnostického signálu, průměrných a okamžitých jednotkových nákladů na střední době provozu – numerické stanovení normativu střední doby provozu pro obnovu (zvýrazněné políčko) [5]</i>
<i>Tab. 8</i>	<i>Výsledné hodnoty optimálního intervalu prediktivní údržby, reálných tržeb a jejich poměru</i>
<i>Tab. 9</i>	<i>Vstupní data pro stanovení závislosti součinitele pohotovosti a tržeb [9]</i>
<i>Tab. 10</i>	<i>Hodnoty průměrných jednotkových nákladů na provoz a obnovu v závislosti na intervalu preventivní periodické údržby [9]</i>
<i>Tab. 11</i>	<i>Výsledné hodnoty optimálního intervalu preventivní periodické údržby, pohotovost a reálných tržeb a jejich poměru [9]</i>



## 9 Seznam zkratk

$A$	součinitel pohotovosti
$A(t_p = \infty)$	součinitel pohotovosti při obnově objektu po poruše
$A_{pred}(t_{po})$	součinitel pohotovosti při obnově objektu prediktivní údržbou při optimální hodnotě intervalu
$\alpha$	parametr Weibullova rozdělení
$B$	parametr funkce střední doby provozu zjištěný metodami korelační a regresní analýzy
$\beta$	parametr Weibullova rozdělení
$F(S_p)$	pravděpodobnost výskytu poruchy v závislosti na diagnostickém signálu
$F(t_p)$	pravděpodobnost výskytu poruchy v závislosti na intervalu preventivní údržby
$F(t_p)$	závislost pravděpodobnosti poruchy na intervalu preventivní údržby
$f_{itf}$	absolutní četnosti fyzického života jednotlivých skupin strojních prvků
$m(S_p)$	počet prvků žijících při stavu $S_p$
$m(t_p)$	počet prvků žijících při stavu $t_p$
$MTTF$	střední doba provozu do poruchy
$MTTF_{pred}(t_{po})$	střední dobu do poruchy preventivně periodicky obnoveného objektu
$MTTR$	střední doba do obnovy
$MTTR(t_p = \infty)$	doba provozu do poruchy objektu udržovaného po poruše
$n$	počet všech sledovaných strojních prvků daného typu
$N_h$	náklady na údržbu po poruše
$N_o$	náklady na preventivní údržbu

$N_{Pd}(S_p)$	funkční závislost středních kumulativních nákladů na provoz objektu vyvolaných jeho diagnostikou v závislosti na diagnostickém signálu
$N_{Pd}(t_p)$	funkční závislost středních kumulativních nákladů na provoz objektu vyvolaných jeho diagnostikou v závislosti na intervalu preventivní údržby
$N_{Pd}(\bar{t})$	náklady na diagnostiku
$N_{Pe}(S_p)$	funkční závislost středních kumulativních nákladů na provoz objektu vyvolaných narůstajícím opotřebením sledovaných funkčních ploch součástí a skupin v závislosti na diagnostickém signálu
$N_{Pe}(t_p)$	funkční závislost středních kumulativních nákladů na provoz objektu vyvolaných narůstajícím opotřebením sledovaných funkčních ploch součástí a skupin v závislosti na intervalu preventivní údržby
$p_i$	poměr mezi tržbou při preventivní údržbě a tržbou při údržbě po poruše
$R(t_p)$	pravděpodobnosti bezporuchového provozu na intervalu preventivní údržby
S	diagnostický signál
$S_{fs}$	střední hodnota diagnostického signálu příslušející fyzickému meznímu stavu
$S_o$	normativ diagnostického signálu
$S_p$	diagnostický signál pro obnovu
$S_{po}$	optimální hodnotu diagnostického signálu pro údržbu
$s_{sf}$	směrodatná odchylka diagnostických signálů příslušejících fyzickým mezním stavům
$s_{tf}$	směrodatná odchylka fyzického života
$S_z$	hodnota diagnostického signálu při prvním výskytu poruchy
$S_{zp}$	průměrná hodnota diagnostického signálu na počátku provozu ( $t=0$ )

$t$	fyzický život prvku
$\bar{t}_f$	střední fyzický život strojního prvku
$t_i(S_p)$	doba provozu i-tého strojního prvku, žijícího při stavu $S_p$
$t_i(t_p)$	doba provozu i-tého strojního prvku, žijícího při stavu $t_p$
$t_j(S_p)$	doba provozu j-tého strojního prvku, který při stavu $S_p$ již nežije
$t_j(t_p)$	doba provozu j-tého strojního prvku, který při stavu $t_p$ již nežije
$t_p$	interval preventivní údržby
$t_{po}$	optimální hodnota intervalu preventivní údržby
$\bar{t}(S)$	průběh střední doby provozu v závislosti na diagnostickém signálu $S$
$\bar{t}(S_p)$	funkční závislost středního intervalu preventivní údržby na diagnostickém signálu
$\bar{t}(t_p)$	funkční závislost středního intervalu preventivní údržby na prostém intervalu preventivní údržby
$T_r$	hodnota tržeb
$T_{r1}(A_{tp=\infty})$	tržby při údržbě po poruše
$T_{ri}(A_{pred}(t_{po}))$	tržby při uplatnění prediktivní údržby
$u$	jednotkové náklady na provoz a obnovu
$u_{pd}$	jednotkové náklady na diagnostiku
$v_p$	okamžité jednotkové náklady
$Z_h$	ztráty způsobené havarijní poruchou
$F(\bar{t})$	závislost pravděpodobnosti poruchy na střední době provozu

## 10 Přílohy

Tab. 4 Naměřené hodnoty diagnostických signálů  $S$  v časech  $t=3, 4, 5, 6, a 7$  [1000 h] [5]

	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7
1	0,911	1,000	1,146	1,330	1,350
2	0,940	1,051	1,169	1,293	1,377
3	0,906	1,069	1,191	1,311	1,609
4	0,906	1,009	1,146	1,274	1,339
5	0,906	1,017	1,100	1,200	1,416
6	0,911	1,069	1,134	1,237	1,531
7	0,991	1,154	1,317	1,479	1,686
8	0,991	1,163	1,249	1,386	1,917
9	0,974	1,103	1,317	1,386	1,956
10	0,963	1,146	1,271	1,460	2,033
11	0,963	1,146	1,237	1,441	1,763
12	0,980	1,103	1,271	1,479	1,917
13	1,003	1,154	1,283	1,441	1,724
14	0,980	1,103	1,294	1,460	1,956
15	0,974	1,111	1,214	1,404	1,917
16	0,969	1,129	1,306	1,553	1,917
17	0,963	1,146	1,294	1,479	1,840
18	1,037	1,249	1,374	1,646	2,226
19	1,014	1,180	1,340	1,646	2,187

	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7
41	1,117	1,274	1,454	1,757	2,727
42	1,100	1,309	1,454	1,850	2,804
43	1,106	1,317	1,523	1,757	2,457
44	1,077	1,257	1,511	1,794	2,496
45	1,100	1,291	1,534	1,869	2,650
46	1,089	1,266	1,523	1,757	2,766
47	1,071	1,334	1,500	1,831	2,650
48	1,083	1,266	1,443	1,794	2,573
49	1,106	1,317	1,500	1,831	2,457
50	1,106	1,266	1,511	1,813	2,573
51	1,089	1,300	1,466	1,757	2,650
52	1,111	1,283	1,466	1,794	2,650
53	1,140	1,420	1,603	2,110	3,190
54	1,146	1,394	1,660	2,017	2,997
55	1,180	1,411	1,649	2,017	2,881
56	1,140	1,343	1,580	1,943	2,843
57	1,129	1,343	1,637	1,999	3,113
58	1,146	1,360	1,591	1,961	3,113
59	1,180	1,411	1,591	1,943	2,881

20	1,031	1,206	1,351	1,646	2,071
21	1,020	1,180	1,420	1,701	2,071
22	1,020	1,223	1,431	1,720	2,380
23	1,031	1,231	1,351	1,701	2,341
24	1,066	1,240	1,340	1,701	2,303
25	1,014	1,231	1,409	1,609	2,264
26	1,014	1,206	1,363	1,664	2,226
27	1,020	1,240	1,431	1,646	2,341
28	1,020	1,189	1,374	1,609	2,303
29	1,014	1,197	1,431	1,590	2,149
30	1,031	1,171	1,351	1,609	2,071
31	1,066	1,171	1,329	1,683	2,341
32	1,066	1,214	1,363	1,683	2,264
33	1,060	1,189	1,397	1,627	2,187
34	1,037	1,214	1,374	1,739	2,264
35	1,117	1,266	1,511	1,869	2,766
36	1,071	1,266	1,477	1,831	2,650
37	1,089	1,300	1,477	1,757	2,727
38	1,094	1,274	1,466	1,813	2,534
39	1,083	1,283	1,500	1,887	2,496
40	1,123	1,257	1,477	1,906	2,611

60	1,157	1,343	1,660	2,091	3,036
61	1,129	1,394	1,569	2,054	3,074
62	1,180	1,377	1,557	1,961	3,151
63	1,174	1,343	1,660	1,999	2,920
64	1,163	1,351	1,580	1,999	3,036
65	1,169	1,403	1,660	2,091	3,036
66	1,197	1,506	1,706	2,184	3,229
67	1,186	1,471	1,683	2,259	3,267
68	1,231	1,446	1,671	2,147	3,229
69	1,220	1,463	1,683	2,296	3,499
70	1,237	1,480	1,751	2,296	3,267
71	1,186	1,471	1,740	2,166	3,537
72	1,209	1,497	1,717	2,129	3,383
73	1,214	1,437	1,694	2,129	3,537
74	1,220	1,437	1,671	2,296	3,383
75	1,220	1,471	1,671	2,296	3,306
76	1,266	1,514	1,786	2,481	3,884
77	1,260	1,540	1,786	2,370	3,769
78	1,254	1,549	1,809	2,333	3,923
79	1,283	1,566	1,889	2,407	3,653
80	1,243	1,549	1,797	2,314	3,614