

**ČESKÁ SPOLEČNOST PRO JAKOST**

**Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1**

**43. SETKÁNÍ  
ODBORNÉ SKUPINY PRO SPOLEHLIVOST**

pořádané výborem Odborné skupiny pro spolehlivost  
k problematice

**Ekonomické aspekty  
spolehlivosti systémů**



**Materiály ze 43. setkání  
odborné skupiny pro spolehlivost**

Brno, červen 2011

**ISBN 978-80-02-02325-8**

## **OBSAH:**

### **OPTIMALIZACE PREVENTIVNÍ ÚDRŽBY ZALOŽENÉ NA NÁKLADECH A ŽIVOTNOSTI** **1**

*Prof. Ing. Václav LEGÁT, DrSc., Technická fakulta, Česká zemědělská  
univerzita v Praze*

### **ZÁRUČNÍ NÁKLADY A JEJICH VAZBA NA SPOLEHLIVOST** **8**

*Ing. Michal VINTR, Ph.D., Fakulta strojní, Vysoké učení technické v Brně*

### **EKONOMICKÉ ASPEKTY SPOLEHLIVOSTI VÝROBNÍHO ZAŘÍZENÍ** **26**

*Ing. Hana ČERMÁKOVÁ, CSc., Ing. Julie VOLFOVÁ, Fakulta mechatroniky,  
informatiky a mezioborových studií, Technická univerzita v Liberci*

### **OPTIMALIZACE ÚDRŽBY SYSTÉMU „k-out-of-n“ ZALOŽENÁ NA NÁKLADECH** **38**

*Doc. Ing. David VALIŠ, Ph.D., Fakulta vojenských technologií,  
Univerzita obrany*

# OPTIMALIZACE PREVENTIVNÍ ÚDRŽBY ZALOŽENÉ NA NÁKLADECH A ŽIVOTNOSTI

## OPTIMISATION OF PREDICTIVE MAINTENANCE BASED ON COSTS AND DURABILITY

prof. Ing. Václav LEGÁT, DrSc

Česká zemědělská univerzita v Praze  
Technická fakulta  
Kamýcká 129, 165 21 Praha 6 – Suchbátka  
e-mail: legat@tf.czu.cz

### Abstract:

Author is identifying a weakness just in the field of assessment and evaluation of diagnostic measurement regarding optimisation of diagnostic signals for maintenance (replacement). These quantities (signals) are the base for dispositional (residual) operating time (for predictive maintenance) determining which is the way to operating dependability growth. Goal of author is to find an objective stochastic method of the diagnostic signal determining for maintenance (replacement) illustrated on an example.

### 1. Úvod

Technická diagnostika je významným nástrojem managementu údržby a slouží nejenom k lokalizaci a zjištění příčiny poruchy, ale i ke stanovení okamžitého technického stavu stroje či zařízení a jejich prvků. Dnes je to již velmi rozvinutý obor, který disponuje celou řadou diagnostických metod, mnoha diagnostickými přístroji a vyhodnocovacími algoritmy. Autoři ovšem spatřují určitou slabinu právě v oblasti vyhodnocování diagnostických měření v souvislosti se stanovením optimálních hodnot diagnostických signálů pro údržbu (obnovu), které jsou základem pro stanovení dispozičních dob provozu (pro prediktivní údržbu). **Cílem** autora je nalézt objektivní metodu pro stanovení hodnoty diagnostického signálu pro obnovu s ilustrací na příkladu.

Jako podklad pro optimalizaci preventivní údržby je třeba sledovat a vyhodnocovat dobu provozu strojního prvku do jeho fyzického mezního stavu, tj. do stavu, kdy strojní prvek ztrácí zcela schopnost plnit svoji funkci (např. v důsledku zadření, lomu, trhliny, koroze, přepálení, opotřebení apod.). Tato doba provozu může být také označována jako fyzický život strojního prvku.

Konkrétní objekty, např. stroje, výrobní linky apod., jsou tvořeny zpravidla velkým počtem strojních prvků s různými funkčními a spolehlivostními vlastnostmi, s rozdílnou složitostí, cenou apod. Z hlediska obnovy je můžeme rozdělit do dvou velkých skupin [1]:

a) **neopravované prvky**, obnovované výměnou za nové;

b) **opravované prvky**, obnovované různými renovačními metodami.

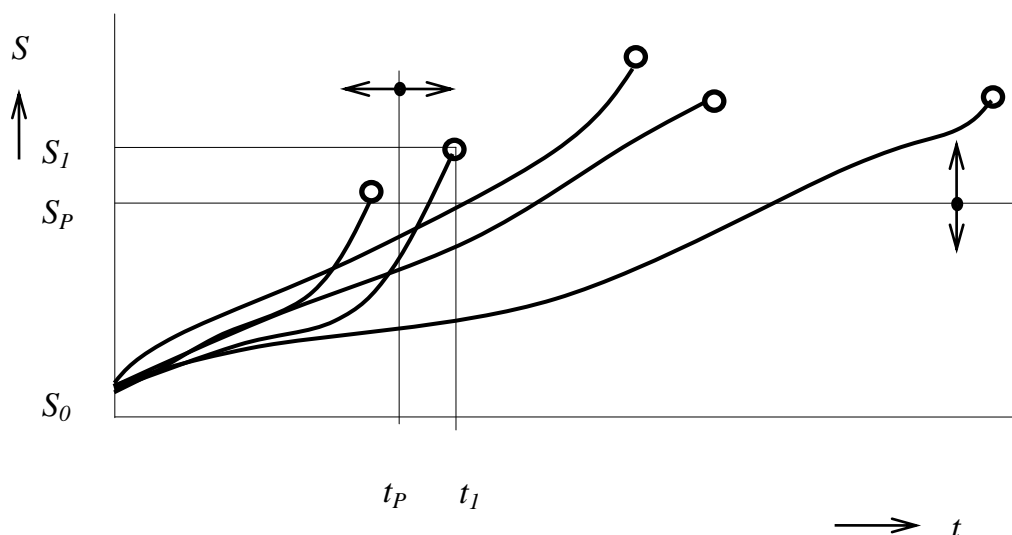
Obdobně je možno rozdělit strojní prvky (strojní skupiny) z hlediska vnitřních změn jejich technického stavu do jiných dvou skupin:

a) **dvoustavové prvky**, u nichž probíhající vnitřní změny technického stavu v důsledku jejich provozu nemají pozorovatelný, měřitelný nebo významný průběžný vnější projev ve změnách technicko-ekonomických parametrů stroje jako celku (např. tlakově mazaná kluzná ložiska motoru); jediným důvodem obnovy těchto dvoustavových prvků je riziko poruchy, která je vyvolána působením vnějších i vnitřních příčin; stavy prvků - označené (1, 0) - znamenají úplně provozuschopný a úplně neprovozuschopný stav,

b) **vícetavové prvky**, u nichž probíhající změny technického stavu mají, kromě náhodné složky, průběžný, významný a měřitelný vnější projev ve změnách technicko-ekonomických parametrů stroje jako celku (např. pístní skupina motoru, kompresoru, axiální hydrostatický převodník apod.); důvodem k obnově je průběžné zhoršování provozně-ekonomických parametrů, přičemž riziko poruchy je velmi nízké až zanedbatelné.

## 2. Charakteristika experimentu

Předpokládejme, že existuje reálná možnost experimentálně sledovat soubor dvoustavových strojních, zpravidla neopravovaných prvků (např. kluzná a valivá ložiska, ozubená kola, žárovky, různé elektrotechnické a elektronické prvky aj.) až do jejich poruchy (do mezního fyzického stavu), a tím získat i příslušné hodnoty jejich fyzického života  $t$ . Předpokládejme dále, že u uvedených prvků lze průběžně sledovat a zjišťovat změny jejich technického stavu  $S$  různými diagnostickými signály (dobou používání, dobou provozu, diagnostickými a strukturními parametry), pomocí různých diagnostických metod, přístrojů a registračních zařízení - viz obr. 1. Kroužky na tomto obrázku představují fyzické mezní stavy (poruchy), přičemž jejich souřadnice jsou dány příslušným diagnostickým signálem a fyzickým životem, např.  $S_1$  a  $t_1$



Obr. 1 Závislost diagnostického signálu  $S$  na době provozu  $t$ , fyzický život a princip tvorby preventivní údržby

Je logické, že jak fyzický život, tak 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  $\lambda_1(t)$ ,  $\lambda_2(S)$ .

Preventivní údržba (obnova) bude vykonána buď v okamžiku vzniku poruchy nebo po pevně stanovené době provozu  $t_p$ , resp. 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 resp. diagnostické obnovy. Hodnoty optimalizovaných veličin  $t_p$  resp.  $S_p$  závisejí na ekonomických a provozních podmínkách používání daného strojního prvku a mohou se tedy měnit - viz schéma.

## 3. Metodika optimalizace preventivní diagnostické údržby

Základem **optimalizace 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 prvek „žil“) zajišťuje dosažení **minimálních průměrných jednotkových nákladů na provoz a obnovu** daného objektu v průběhu jeho celého užitečného života.

Vstupní údaje pro výpočet optimálního intervalu preventivní údržby (obnovy, seřízení, opravy, výměny, renovace apod.) [2]:

- náklady na preventivní údržbu  $N_o$ ,
- ztráty způsobené havarijní poruchou (rozdíl nákladů na údržbu po poruše  $N_h$  a na preventivní údržbu  $N_o$  téhož strojního prvku)  $Z_h = N_h - N_o$ ,
- 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  $N_{Pe}(t_p)$  resp. na diagnostickém signálu  $N_{Pe}(S_p)$ ,
- f) funkční závislost středních kumulativních nákladů na provoz objektu vyvolaných jeho diagnostikou (monitorováním technického stavu) v závislosti na intervalu preventivní údržby  $N_{Pd}(t_p)$  resp. na diagnostickém signálu  $N_{Pd}(S_p)$ .

Na základě protichůdných nákladových trendů v jejich jednotkovém vyjádření lze stanovit hledanou optimální hodnotu intervalu preventivní údržby  $t_{p0}$  resp. optimální hodnotu diagnostického signálu pro údržbu  $S_{p0}$  ze vztahů pro průměrné jednotkové náklady

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

resp.

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

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

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

resp.

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

kde  $t_i(t_p)$  resp.  $t_j(S_p)$  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.  $S_p$  a  $n$  je počet všech sledovaných strojních prvků daného typu.

Pro dvoustavové prvky se zpravidla čitatel v obou rovnicích (1a) a (1b) redukuje 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.

Při konkretizaci 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

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

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.

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  $S=S_{max}$  (empirické vyjádření) a  $S \rightarrow \infty$  pro teoretické vyjádření závislosti. Těmto požadavkům odpovídá např. tato funkce

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

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 ( $t=0$ ).

Závislost střední hodnoty diagnostického signálu na době provozu získáme pomocí inverzní funkce k funkci (4a), čili

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

Hledanou závislost pravděpodobnosti poruchy  $F(\bar{t})$  na střední době provozu  $\bar{t}$  získáme porovnáním rovnic (3) a (4b) – z rovnice (4a) vypočítáme hodnotu diagnostického signálu  $S$  a dosadíme do vztahu (3), čili

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

Náklady na diagnostiku nejjednodušeji vyjádříme jako součin jednotkových nákladů na diagnostiku  $u_{Pd}$  a střední doby provozu  $\bar{t}$

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

Jednotkové náklady na provoz a obnovu  $u$  získáme po malých úpravách dosazením rovnic (5) a (6) do vztahu (1b), pro  $N_{pe}(S_p)=0$ , čili

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

a okamžité jednotkové náklady  $v_P$  stanovíme derivací čitatele funkce (7) podle  $\bar{t}$ , čili

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

Lze dokázat, že optimální hodnota (normativ) střední doby provozu leží v průsečíku funkcí (7) a (8), čili

$$u(\bar{t}_o) = v_P(\bar{t}_o) \quad (9)$$

Hledaný normativ diagnostického signálu  $S_o$  stanovíme z rovnice (4) po úpravách takto

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

Uvedený obecný model optimalizace diagnostické údržby přiblížíme na níže uvedeném příkladu.

#### 4. Příklad

Ze simulovaných provozních záznamů sledování spolehlivosti, diagnostikování technického stavu a sledování životnosti 80 vybraných strojních prvků byla specifikována tato vstupní data:  $S_z=4$ ,  $N_o=1000$  Kč,  $Z_r=3000$  Kč. Absolutní četnosti  $f_{if}$  fyzického života jednotlivých skupin strojních prvků jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Absolutní četnosti  $f_{if}$  fyzického života jednotlivých strojních prvků

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 tabulce 2.

Tab. 2 Absolutní četnosti  $f_{jsf}$  diagnostických signálů příslušejících poruchovým (fyzickým mezním) stavům jednotlivých skupin strojních prvků

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

Naměřené hodnoty diagnostických signálů  $S$  u 80 strojních prvků v pravidelných intervalech 3, 4, 5, 6 a 7 [1000 h] jsou uvedeny v tab. 3.

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

	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7		t=3	t=4	t=5	t=6	t=7
1	0,911	1,000	1,146	1,330	1,350	41	1,117	1,274	1,454	1,757	2,727
2	0,940	1,051	1,169	1,293	1,377	42	1,100	1,309	1,454	1,850	2,804
3	0,906	1,069	1,191	1,311	1,609	43	1,106	1,317	1,523	1,757	2,457
4	0,906	1,009	1,146	1,274	1,339	44	1,077	1,257	1,511	1,794	2,496
5	0,906	1,017	1,100	1,200	1,416	45	1,100	1,291	1,534	1,869	2,650
6	0,911	1,069	1,134	1,237	1,531	46	1,089	1,266	1,523	1,757	2,766
7	0,991	1,154	1,317	1,479	1,686	47	1,071	1,334	1,500	1,831	2,650
8	0,991	1,163	1,249	1,386	1,917	48	1,083	1,266	1,443	1,794	2,573
9	0,974	1,103	1,317	1,386	1,956	49	1,106	1,317	1,500	1,831	2,457
10	0,963	1,146	1,271	1,460	2,033	50	1,106	1,266	1,511	1,813	2,573
11	0,963	1,146	1,237	1,441	1,763	51	1,089	1,300	1,466	1,757	2,650
12	0,980	1,103	1,271	1,479	1,917	52	1,111	1,283	1,466	1,794	2,650
13	1,003	1,154	1,283	1,441	1,724	53	1,140	1,420	1,603	2,110	3,190
14	0,980	1,103	1,294	1,460	1,956	54	1,146	1,394	1,660	2,017	2,997
15	0,974	1,111	1,214	1,404	1,917	55	1,180	1,411	1,649	2,017	2,881
16	0,969	1,129	1,306	1,553	1,917	56	1,140	1,343	1,580	1,943	2,843
17	0,963	1,146	1,294	1,479	1,840	57	1,129	1,343	1,637	1,999	3,113
18	1,037	1,249	1,374	1,646	2,226	58	1,146	1,360	1,591	1,961	3,113
19	1,014	1,180	1,340	1,646	2,187	59	1,180	1,411	1,591	1,943	2,881
20	1,031	1,206	1,351	1,646	2,071	60	1,157	1,343	1,660	2,091	3,036
21	1,020	1,180	1,420	1,701	2,071	61	1,129	1,394	1,569	2,054	3,074
22	1,020	1,223	1,431	1,720	2,380	62	1,180	1,377	1,557	1,961	3,151
23	1,031	1,231	1,351	1,701	2,341	63	1,174	1,343	1,660	1,999	2,920
24	1,066	1,240	1,340	1,701	2,303	64	1,163	1,351	1,580	1,999	3,036
25	1,014	1,231	1,409	1,609	2,264	65	1,169	1,403	1,660	2,091	3,036
26	1,014	1,206	1,363	1,664	2,226	66	1,197	1,506	1,706	2,184	3,229
27	1,020	1,240	1,431	1,646	2,341	67	1,186	1,471	1,683	2,259	3,267
28	1,020	1,189	1,374	1,609	2,303	68	1,231	1,446	1,671	2,147	3,229

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

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

### Řešení:

Z údajů uvedených v tab. 1 byly pomocí programu STATGRAPHICS vypočítány tyto charakteristiky: střední fyzický život strojních prvků  $\bar{t}_f$ , směrodatná odchylka fyzických životů  $s_{tf}$ , parametry Weibullova rozdělení  $\alpha, \beta, t_\gamma$  - viz tabulku 4.

Tab. 4 Charakteristiky fyzického života strojních prvků

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

Z údajů uvedených v tab. 2 byly vypočítány pomocí programu STATGRAPHICS tyto charakteristiky: střední hodnota diagnostického signálu příslušející fyzickému meznímu stavu  $S_{fs}$ , směrodatná odchylka diagnostických signálů příslušejících fyzickým mezním stavům  $s_{Sf}$ , parametry Weibullova rozdělení  $\alpha, \beta, S_z$  - viz tabulku 5.

Tab. 5 Charakteristiky diagnostických signálů příslušejících fyzickým mezním stavům

$S_{fs}$	$s_{Sf}$	$\alpha$	$\beta$	$S_z$
5,285	0,5178	1,4428	2,6583	4,00

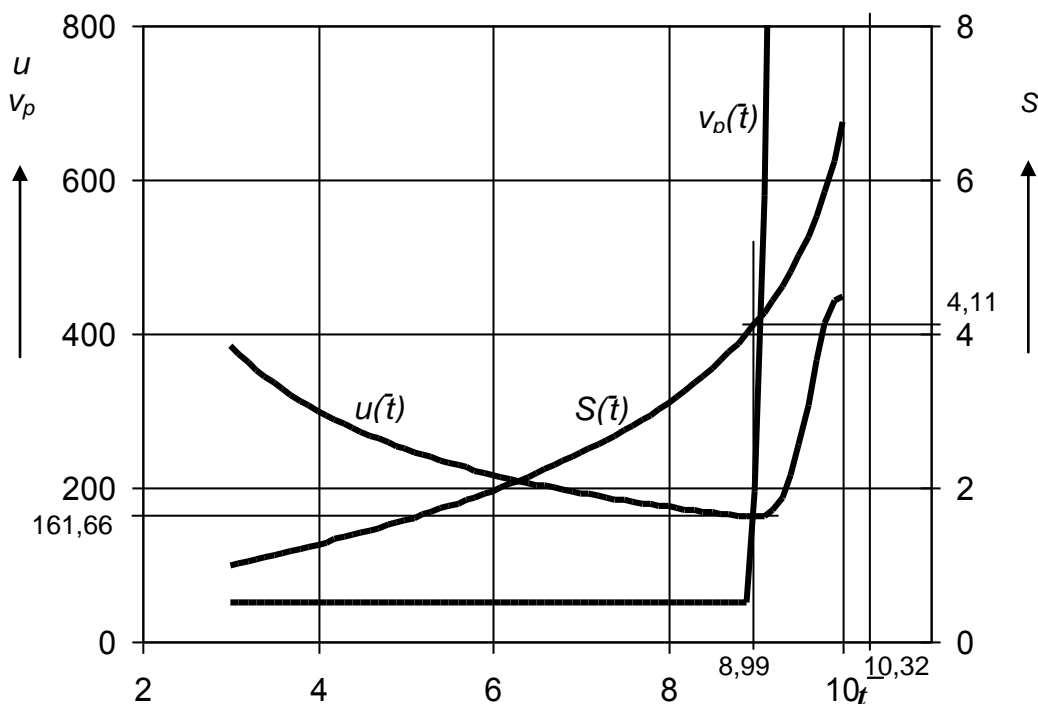
Z údajů uvedených v tabulce 3 a rovnice (4) (po dosazení  $\bar{t}_f=10,32$ ) byla vypočítána pomocí programu EXCEL hodnota parametru  $B=0,5466$  a  $S_{zp}=0,3653$ . Nyní již můžeme dosadit zjištěné hodnoty jednotlivých parametrů do rovnice (4b), (7) a (8) a vypočítat příslušné funkční závislosti - viz tabulka 6.

Tab. 6 Závislost diagnostického signálu, průměrných a okamžitých jednotkových nákladů na střední době provozu – numerické stanovení normativu střední doby provozu pro obnovu (tučné políčko)

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

Uvedené závislosti jsou rovněž velmi názorně zobrazeny na obr. 2, odkud 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).





Obr. 2 Závislost diagnostického signálu, průměrných a okamžitých jednotkových nákladů na střední době provozu – grafické stanovení normativu střední doby provozu a diagnostického signálu pro obnovu.

## 5. Závěr

Je zřejmé, že konkrétní **proces optimalizace diagnostické údržby** – stanovení **normativů** diagnostických signálů pro obnovu vyžaduje v provozních podmínkách experimentálně určit ukazatele životnosti, závislost doby provozu na diagnostickém signálu a náklady na obnovu, diagnostiku a ztráty z havarijní poruchy. K získání hodnot fyzického života je nutné nechat experiment (zkoušku životnosti) proběhnout až do dosažení fyzického mezního stavu jednotlivých sledovaných prvků (obr. 1), což současně umožňuje i získání havarijní ztráty a funkce střední doby provozu.

Náklady na obnovu lze stanovit jednoduchým způsobem z evidence nebo kalkulace příslušných nákladových položek. Praktické stanovení normativů je tedy podmíněno nejenom realizací příslušné zkoušky životnosti, ale i systematickým sledováním daných **nákladových položek** a jejich archivací, což v současné době umožňuje snadno dostupná výpočetní technika.

V případě, že většina těchto údajů chybí a naznačené stochastické řešení nepřipadá v úvahu, musíme vyhodnocovat diagnostické signály velmi zjednodušeně a individuálně pro každý strojní prvek. Toto vyhodnocení lze založit především na **analýze rychlosti změn** (zhoršování) jednotlivých diagnostických resp. provozních parametrů, přičemž dosažení zdůvodněného technického mezního stavu (v tomto případě vždy má předcházet fyzickému meznímu stavu) může být vizuálně, případně akusticky signalizováno operátorovi sledovaného zařízení.

## Literatura:

- [1] LEGÁT, V.: Stanovení normativu pro obnovu dvoustavových strojních prvků s jednorázovým použitím. In: Zemědělská technika, ročník 36, č. 1, ÚVTIZ Praha 1990, s. 1-13.
- [2] LEGÁT, V., ŽALUDOVÁ, A., ČERVENKA, V., JURČA, V. (1996) Contribution to optimization of preventive replacement. In: *Reliability Engineering and System Safety* 51, Elsevier Science Limited, s. 259 - 266. ISSN 0951-8320

# ZÁRUČNÍ NÁKLADY A JEJICH VAZBA NA SPOLEHLIVOST GUARANTEE COST AND THEIR RELATION TO DEPENDABILITY

Ing. Michal VINTR, Ph.D.

e-mail: mvintr@seznam.cz

## Abstract:

The paper deals with warranties, warranty costs and their relations to the reliability. In the first part of the paper the problems of warranties, the warranty costs and their position in the product life cycle costs are characterized. The next part presents the models used for prediction of warranty costs and describes the procedure of warranty cost prediction. The last part describes the specific aspects related to the providing of warranties and prediction of warranty costs when two-dimensional warranty is used.

## 1. Úvod

Cílem tohoto příspěvku je prezentovat specifické aspekty jedné ze složek nákladů životního cyklu produktu – záručních nákladů.

V první části příspěvku je stručně charakterizována problematika záruk za jakost a jejich poskytování, jsou definovány záruční náklady, jejich vazba na spolehlivost a pozice v rámci nákladů životního cyklu produktu. V další části jsou prezentovány modely používané pro predikci záručních nákladů a je popsán praktický postup predikce záručních nákladů. Poslední část příspěvku popisuje specifické aspekty spojené s poskytováním záruk za jakost a predikcí záručních nákladů při použití dvourozměrných záruk za jakost.

Na úvod autor považuje za přínosné definovat základní pojmy, které se v příspěvku budou často vyskytovat:

*Jakost, kvalita (quality)* je dle [8] stupeň splnění požadavků souborem inherentních znaků.

*Spolehlivost (dependability)* je dle [11] definována jako souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují: bezporuchovost, udržovatelnost a zajištěnost údržby.

*Produkt (product)* mohou být dle [8] služby (např. přeprava), software (např. počítačový program), hardware (např. mechanická část motoru) a zpracované materiály (např. mazivo).

*Dodavatel (supplier)* je dle [8] organizace nebo osoba, která poskytuje produkt. Dodavatelem může být výrobce, distributor, maloobchodník, prodejce, poskytovatel služby nebo informací. Dodavatel je považován za stranu zodpovědnou za zajištění plnění záručních podmínek.

*Zákazník (customer)* je dle [8] organizace nebo osoba, která přijímá produkt. Zákazníkem může být spotřebitel, klient, konečný uživatel, maloobchodník, příjemce, odběratel.

*Záruka (warranty)* je slib nebo ujištění dodavatele vůči zákazníkovi, že produkt je nebo bude takový, jak je prezentován. Záruka je považována za smluvní dohodu mezi zákazníkem a dodavatelem, která vstupuje v platnost ihned po koupi nebo dodání produktu.

*Záruční doba (warranty period)* je doba, po kterou platí záruka. Z hlediska legislativy se jedná o dobu (lhůtu) na uplatnění práva z odpovědnosti za vady výrobků a služeb.

*Reklamací (complaint, claim)* se dle [16] rozumí uplatnění práva z odpovědnosti za vady výrobků a služeb. Reklamací je v záruční době uplatněný požadavek na sjednání nápravy, v případě prodeje produktu v rozporu s platnými předpisy a v rozporu se smlouvou. Reklamací mohou být oprávněné a neoprávněné.

V současné době je ve většině vyspělých zemí, včetně České republiky, téměř samozřejmostí, že jsou na dodávané produkty poskytovány záruky za jejich jakost. Nejvýznamnější roli přitom mají záruky za jakost při dodávkách produktů koncovým zákazníkům – spotřebitelům.

V rámci České republiky a celé Evropské unie je význam záruk za jakost dán zejména dvěma následujícími faktory. V první řadě, v rámci ochrany spotřebitelů, na kterou je v ČR i EU kladen značný důraz, platí zákonná povinnost v určitých případech poskytovat dvouletou záruku na prodávané produkty. V druhé řadě se poskytování záruk za jakost stalo významným a běžně používaným nástrojem konkurenčního boje mezi dodavateli, kteří se snaží získat zákazníky poskytováním záruk nad rámec stanovený legislativou.

Značný význam v oblasti záruk za jakost, který je však často podceňován, představuje skutečnost, že poskytování záruk za jakost má pro dodavatele nezanedbatelné ekonomické dopady. Poskytování záruk je totiž vždy provázeno dodatečnými náklady, nazývanými záruční náklady, které jsou obvykle chápány jako náklady vynaložené dodavatelem při vyřizování reklamací v záruční době.

## **2. Záruky za jakost**

### **2.1 Historie záruk za jakost**

Konkrétní období vzniku záruk za jakost není přesně známo. Historické důkazy o jejich existenci nacházíme již v době 2000 př. n. l., není však pochyb, že záruky doprovázely lidstvo od dob, kdy lidé začali provádět výměny zboží a služeb, kdy začali obchodovat [1]. První dokumentovaná zmínka o obchodu a zákaznické stížnosti (reklamaci) byla nalezena na hliněných deskách na bývalém území Babylonu a pochází z doby 2000 let př. n. l. První doložený případ využití záruk za jakost byl nalezen v babylonském zákoníku zabývajícím se výrobky a službami, který pochází asi z 20. století př. n. l. Tento zákoník stanovoval náhrady typu „oko za oko“ [1].

Významná změna v oblasti používání záruk nastala v 16. století n. l. v době průmyslové revoluce, kdy se začaly prodávat výrobky a poskytovat služby s označením „bez záruky“. V té době začaly některé společnosti využívat záruky jako součást konkurenčního boje. Nicméně většina lidí považovala záruky týkající se produktů přinejlepším za chatrné sliby, protože výrobci a poskytovatelé služeb často nedodržovali své záruční závazky [1]. V této době začal být uplatňován princip „caveat emptor“ (zákazník se musí chránit sám).

Ve dvacátém století v souvislosti nejen se zvyšující se složitostí produktů, ale hlavně jejich snadnou dostupností pro spotřebitele došlo k rozvoji v poskytování záruk. Avšak podmínky záruk si nadále stanovovali prodejci a případné spory řešily soudy, jejichž rozhodnutí byla v souladu se záručními podmínkami prodejce bez ohledu na spravedlivost těchto podmínek. V důsledku toho a v důsledku nezbytnosti ochrany zákazníků byla ve Spojených státech amerických problematika záruk začleněna do obchodního zákoníku a v roce 1975 byl vydán tzv. Magnuson-Mossův záruční zákon [12]. Ten ustanovil právní rámec pro ochranu zákazníků a učinil dodavatele právně zodpovědné za nízkou kvalitu. Spojené státy americké byly následovány dalšími zeměmi a v dnešní době si už ve většině vyspělých zemí náhrady nestanovují sami prodejci, ale záruky a jejich poskytování jsou upraveny platnou legislativou.

### **2.2 Současný stav v oblasti záruk za jakost**

V současné době je záruka za jakost chápána jako slib nebo ujištění dodavatele vůči zákazníkovi, že produkt je nebo bude takový, jak je prezentován. Záruka je přitom považována za smluvní dohodu mezi zákazníkem a dodavatelem, která vstupuje v platnost ihned po koupi nebo dodání produktu. Jejím smyslem je ustavit odpovědnosti mezi dodavatelem a zákazníkem v případě neschopnosti produktu plnit požadované funkce nebo v případě nesprávného provedení produktu. Konkrétně záruka vymezuje garantovanou kvalitu a rozsah kompenzací, které budou zákazníkovi poskytnuty v případě nedodržení stanovené kvality. Na druhé straně záruka také zpravidla vymezuje podmínky provozu a údržby, za kterých poskytnutá záruka platí a které musí zákazník respektovat.

Záruka za jakost je především ochranou pro obě smluvní strany, zákazníka a dodavatele. Z hlediska zákazníka záruka stanovuje prostředky k náhradě, pokud produkt, který je správně používán, není schopen plnit požadované funkce nebo není správně proveden. Dodavatel se naopak může přesným vymezením záručních podmínek chránit proti neoprávněným reklamacím ze strany zákazníka. Pro zákazníka má záruka nezanedbatelný informativní charakter o kvalitě produktu a může být při koupi technicky i cenově srovnatelných produktů rozhodujícím faktorem. Z uvedeného důvodu jsou záruky ze strany dodavatelů často využívány jako propagační nástroj v konkurenčním boji s ostatními dodavateli.

Z hlediska zákazníka je největší výhodou obdržené záruky snížení rizika. Záruka zajišťuje zákazníkovi jistou minimální dobu používání (záruční dobu) bez přehnaných nákladů na opravy a výměny. Z hlediska dodavatele je největší výhodou poskytnuté záruky ochrana před spory

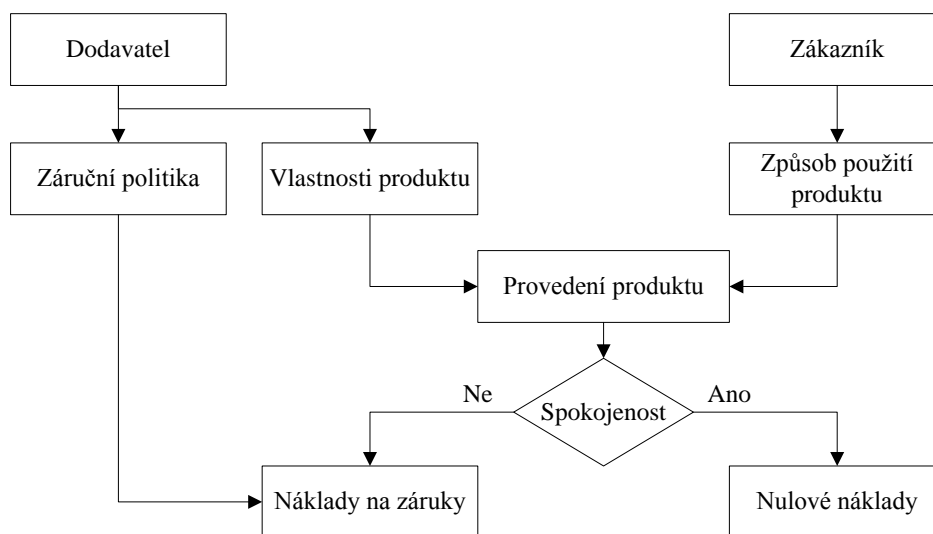
ohledně vymezení odpovědností. Dodavatel také může prostřednictvím reklamací získat zpětnou vazbu o kvalitě produkce. Naopak značnou nevýhodou je nutnost vynaložit náklady na vyřízení případných reklamací před skončením záruky (tzv. záruční náklady).

V současnosti není poskytnutí záruky pouze otázkou rozhodnutí dodavatele nebo vzájemné dohody mezi dodavatelem a zákazníkem, ale ve většině vyspělých zemí je poskytování záruk za jakost upraveno platnou legislativou. V rámci Evropské unie se jedná zejména o směrnici Evropského parlamentu a Rady č. 1999/44/ES, o některých aspektech prodeje spotřebního zboží a záruk na toto zboží [13], která platí od června 1999. Směrnice mimo jiné nařizuje, aby nové prodávané spotřební produkty byly kryty minimálně dvouletou zárukou za jakost.

V České republice je poskytování záruk za jakost upraveno hned několika platnými zákony. Mezi stěžejní patří zákon č. 513/1991 Sb., obchodní zákoník [15], zákon č. 40/1964 Sb., občanský zákoník [14] a zákon č. 634/1992 Sb., o ochraně spotřebitele [16]. Nejvýznamnějším požadavkem stanoveným naší legislativou v oblasti záruk za jakost je bezesporu povinnost poskytovat v souladu se směrnicí 1999/44/ES tzv. „dvouletou zárukou“. Tato povinnost platí od 1. ledna 2003 v určitých zákonem stanovených případech, konkrétně při prodeji zboží v obchodě dle § 616-627 občanského zákoníku.

V oblasti záruk za jakost se mohou vyskytovat nejrůznější činitele. Z hlediska odborné literatury [4] jsou nejvýznamnější následující činitele: dodavatel, zákazník, produkt a jeho provedení a záruční politika. Ná vaznost uvedených činitelů je znázorněna na Obr. 1.

Mezi nejpodstatnější činitele patří záruční politika, což je plán péče o záležitosti týkající se záruk, který stanovuje podmínky záruky, zejména dobu krytí zárukou a způsob vzájemného vyrovnání. Záruční politika bývá charakterizována typem záruky a jejími parametry. Volba a nastavení záruční politiky mají značný vliv na případné záruční náklady.



Obr. 1: Hlavní činitele ovlivňující záruky a jejich návaznosti [4].

V odborné literatuře a v praxi se lze setkat s nejrůznějšími typy záruk za jakost, které jsou v současnosti na základní úrovni rozdělovány následovně [1], [2]:

a) Podle způsobu náhrad zákazníkovi:

- *Plná záruka* – opravy nebo výměny plně hradí dodavatel;
- *Redukovaná záruka* – na opravě nebo výměně se finančně podílí i zákazník;
- *Kombinovaná záruka* – libovolná kombinace plné a redukované záruky.

b) Podle způsobu počítání průběhu záruční doby:

- *Obnovovaná záruka* – po každé opravě nebo výměně produktu začíná záruční doba běžet znovu od počátku;
- *Neobnovovaná záruka* – délka záruční doby je pevně dána a nemění se, případná oprava či výměna produktu její délku neovlivňuje.

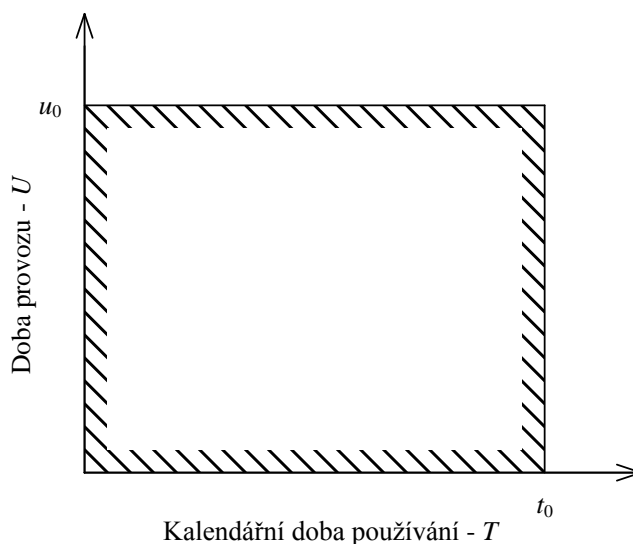
c) Podle způsobu určení konce záruční doby:

- *Jednorozměrná záruka* – okamžik ukončení záruční doby je určen jediným způsobem, nejčastěji kalendářní dobou používání (např. počet měsíců, roků) nebo dobou provozu (např. počet ujetých km, počet pracovních cyklů, míra opotřebení);
- *Vícerozměrná záruka* – okamžik ukončení záruční doby je určen více způsoby a užije se ten, který nastane jako první, nejpoužívanější je stanovení přesné kalendářní doby a doby provozu.

Mimo uvedené dělení se lze setkat s hromadnými zárukami (záruka platí pro celou skupinu produktů současně a ne pro každý jednotlivě), zárukami zvyšování spolehlivosti (součástí záruky je požadavek na zvyšování úrovně spolehlivosti produktu během dodávek) a víceznakovými zárukami (na jednotlivé části produktu jsou poskytovány záruky zvlášť).

V praxi se lze nejčastěji setkat s následujícími typy záruk:

- *Jednorozměrná neobnovovaná plná záruka* – dodavatel se během záruční doby zavazuje provést bezplatnou opravu nebo výměnu vadného produktu. Délka záruční doby je pevně dána, případná oprava či výměna produktu ji neovlivňuje. Záruční doba bývá nejčastěji vymezena kalendářní dobou používání nebo dobou provozu. Historicky jde o nejstarší typ záruky, který je svou koncepcí velice jednoduchý a srozumitelný. Tento typ záruky se obvykle používá pro celou škálu spotřebních produktů, od nejlevnějších (např. kompaktní disky) až po nejdražší opravované (např. domácí spotřebiče) i neopravované (např. čipy).
- *Jednorozměrná obnovovaná plná záruka* – od předchozí se liší tím, že všechny opravené nebo vyměněné produkty jsou kryty stejnou zárukou jako nově prodáváný produkt, tj. záruka u nich začíná běžet znovu od počátku. Tento typ záruky má stejné využití jako neobnovovaná varianta, navíc se používá zejména pro levné elektrické, elektronické a mechanické produkty, které dodavatel, vzhledem k jejich charakteru, při reklamaci častěji vyměňuje, než opravuje.
- *Dvourozměrná neobnovovaná plná záruka* – dodavatel se během záruční doby zavazuje provést bezplatnou opravu nebo výměnu vadného produktu. Délka záruční doby je pevně dána, případná oprava či výměna produktu ji neovlivňuje. Produkt je kryt zárukou nejčastěji po určitou (garantovanou) kalendářní dobu používání a po určitou (garantovanou) dobu provozu (např. 3 roky a 100 000 km), přičemž záruka končí překročením jedné z těchto hodnot. Tento typ záruky je vhodný pro produkty, u kterých lze průběžně monitorovat dobu provozu, a velmi často se používá u automobilů. Oblast krytí zárukou je znázorněna na Obr. 2.



Obr. 2: Oblast krytí dvourozměrnou zárukou [1].

V podmínkách České republiky zatím většina dodavatelů poskytuje záruky v rozsahu stanoveném platnou legislativou. Z uvedených typů záruk se prakticky používají jen nejjednodušší, především jednorozměrné obnovované a neobnovované plné záruky. Jen zřídka se využívají

jednorozměrné redukované a kombinované záruky. Z vícerozměrných záruk se využívá převážně dvourozměrná neobnovovaná plná záruka, a to zejména při prodeji automobilů.

Do budoucna lze předpokládat, že v souvislosti se zvyšující se náročností zákazníků a rostoucí konkurencí na trhu budou dodavatelé poskytovat záruky nad rámec stanovený legislativou. Budou častěji využívány progresivnější typy záruk za jakost, které budou poskytovat na jedné straně větší ochranu zájmu zákazníků a na straně druhé konkurenční výhody pro dodavatele.

### 3. Záruční náklady

Nespokojenost zákazníka s vlastnostmi produktu má obvykle za následek reklamaci v záruční době. V případě reklamace musí dodavatel vynaložit jisté náklady, tzv. záruční náklady, které souvisí s vyřízením všech reklamací v záruční době. Pokud je reklamace oprávněná, jedná se o náklady na práci, náklady na nové produkty, na náhradní díly a spotřebovaný materiál, náklady spojené s dopravou reklamovaných produktů, náklady na náhrady zákazníkovi během reklamačního řízení, administrativní náklady, případně další náklady spojené s vyřízením reklamace. Pokud je reklamace neoprávněná, jedná se pouze o administrativní náklady, případně náklady na dopravu.

Výše nákladů na záruky závisí zejména na podmínkách záruky (na typu a parametrech záruky) a na úrovni spolehlivosti produktu. Obecně záruční náklady závisí na dvou veličinách: počtu reklamací (poruch) během záruční doby, a na nákladech spojených s vyřízením jednotlivých reklamací (poruch) v záruční době.

### 4. Úloha záručních nákladů v nákladech životního cyklu produktu

Náklady životního cyklu (LCC) jsou dle ČSN EN 60300-3-3 [8] definovány jako celkové (kumulativní) náklady na produkt v celém životním cyklu. Jednou z používaných možností je vyjádření LCC jako součtu nákladů spojených s pořízením produktu, nákladů spojených s vlastnictvím produktu a nákladů spojených s vypořádáním (likvidací) produktu:

$$LCC = \text{Pořizovací náklady} + \text{Vlastnické náklady} + \text{Náklady na vypořádání} \quad (1)$$

*Pořizovací náklady* jsou všeobecně viditelné a mohou být snadno vyhodnoceny před rozhodnutím o pořízení produktu. Jedná se o veškeré náklady, které se promítnou do pořizovací ceny placené zákazníkem. Tyto náklady jsou obvykle vynakládány dodavatelem. Mezi pořizovací náklady lze zahrnout zejména:

- Výrobní náklady a dodatečné náklady – výrobní náklady jsou veškeré náklady související s výzkumem, návrhem, vývojem a výrobou; dodatečné náklady jsou zejména náklady na marketing, distribuci a prodej.
- Povýrobní náklady – případné náklady na instalaci, vyškolení obsluhy apod.
- Daně a cla – poplatky odváděné státu.
- Zisk – finanční zisk dodavatele.
- Záruční náklady – zejména náklady na preventivní a nápravnou údržbu, které v počátečních fázích provozu produktu převzal dodavatel.

*Vlastnické náklady*, které často tvoří hlavní složku nákladů životního cyklu, v mnoha případech přesahují pořizovací náklady a nejsou snadno viditelné. Jedná se o veškeré náklady související s vlastnictvím produktu. Tyto náklady jsou obvykle vynakládány zákazníkem. Mezi vlastnické náklady z hlediska zákazníka patří zejména:

- Náklady na provoz produktu – náklady na veškerý materiál a energie, který je při provozu produktu spotřebováván a další náklady, které se zajištěním provozu produktu bezprostředně souvisí.
- Náklady na nápravnou údržbu – veškeré náklady, které souvisí se zjišťováním příčin vzniku poruch a odstraňováním jejich následků opravou (především náklady na náhradní díly, cena práce, případně náklady na zřízení a vybavení dílen, náklady na výcvik specialistů).
- Náklady na preventivní údržbu – veškeré náklady spojené s prováděním údržby v předem stanovených intervalech nebo podle předepsaných kritérií se zaměřením na snížení pravděpodobnosti výskytu poruchy nebo k zamezení snížení funkční schopnosti produktu.

- Náklady z důvodu nepohotovosti produktu – jestliže je produkt ve stavu nepohotovosti, tedy ve stavu neschopném pro poruchu plnit požadované funkce, může tato situace pro zákazníka představovat finanční ztrátu nebo nutnost vynaložit další mimořádné výdaje.
- Náklady z odpovědnosti za škody způsobené produktem – náklady z odpovědnosti za škody způsobené poruchou produktu a za její škodlivé následky.

V některých případech se zákazník a dodavatel mohou dohodnout, že dodavatel převezme celé nebo část nákladů na údržbu, nákladů z důvodu nepohotovosti produktu nebo nákladů z odpovědnosti za škody způsobené produktem. V uvedeném případě by tyto položky nákladů patřily do pořizovacích nákladů, protože by se zajisté promítly do pořizovací ceny. Uvedená dohoda by byla tzv. servisní smlouvou.

*Náklady na vypořádání (likvidaci)* mohou představovat významnou část celkových nákladů životního cyklu produktu. V legislativě mohou být požadovány činnosti prováděné při vypořádání (např. v případě elektrických a elektronických zařízení).

Platná norma ČSN EN 60300-3-3 [8] řadí záruční náklady v rámci LCC do kategorie vyvolaných nákladů. Tj. nákladů vyvolaných „nespolehlivostí“ produktu.

Jak již bylo uvedeno, záruční náklady závisí především na úrovni spolehlivosti, přičemž spolehlivost produktu je nejvíce ovlivňována v počátečních etapách životního cyklu, zejména v etapách volby koncepce a stanovení požadavků.

Z hlediska životního cyklu produktu dodavatel může ovlivňovat záruční náklady od etapy koncepce a stanovení požadavků až do etapy instalace. V etapě provozu a údržby dochází k plnění záručních povinností a záruční náklady lze ovlivňovat jen v omezené míře. Je vhodné zmínit také fakt, že „poslednímu“ dodanému produktu začne záruční doba běžet v okamžiku ukončení produkce.

## 5. Predikce záručních nákladů

Predikce záručních nákladů je chápána jako předpověď výše nákladů, které bude muset dodavatel vynaložit na vyřízení všech reklamací v záruční době.

Historický vývoj v oblasti predikce záručních nákladů úzce souvisí s vývojem v oblasti teorie spolehlivosti a aplikované statistiky, konkrétně stochastických procesů. První práce zabývající se problematikou predikce záručních nákladů pro nejjednodušší typy záruk byly publikovány na přelomu 60. a 70. let minulého století. V průběhu 80. a 90. let docházelo ke značnému rozvoji a byly publikovány práce pro složitější typy záruk za jakost. První práce v oblasti predikce záručních nákladů při použití dvourozměrných záruk byly publikovány na počátku 90. let minulého století.

Určitým mezníkem v oblasti predikce záručních nákladů bylo v roce 1994 vydání obsáhlé monografie s názvem *Warranty Cost Analysis* [2] následované v roce 1996 monografií *Product Warranty Handbook* [1]. Obě tyto publikace vydané nakladatelstvím Marcel Dekker jsou dodnes celosvětově nejobsáhlejšími publikacemi zabývajícími se problematikou záruk a záručních nákladů. V roce 2006 vyšla u vydavatelství Springer-Verlag uvedené dvojici autorů zatím nejnovější kniha z oblasti záruk za jakost s názvem *Warranty Management and Product Manufacture* [4], která se zabývá především systémem managementu záruk a jeho pozicí v systému managementu výrobní organizace.

Na internetu pravidelně jednou týdně vychází elektronický časopis *Warranty Week*<sup>®</sup> [17], který je vydáván v USA a má přiděleno ISSN. V časopise jsou mimo jiné pravidelně publikovány aktuální ekonomické ukazatele a vývojové trendy související se zárukami za jakost pro nejrůznější průmyslová odvětví.

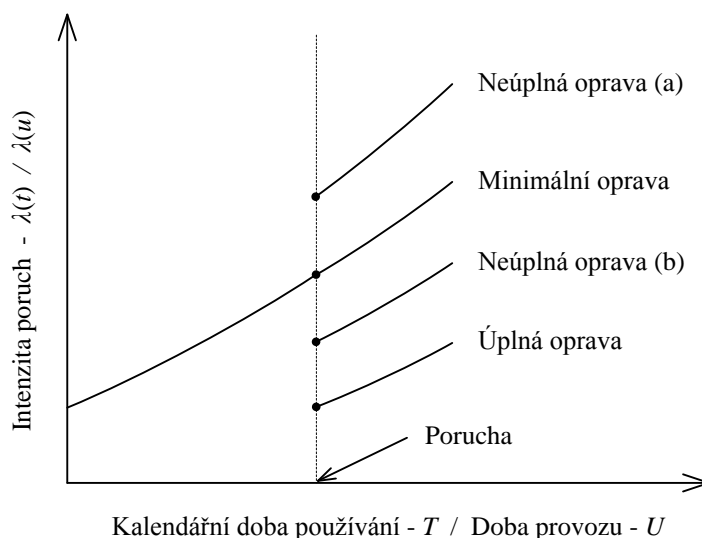
Problematika predikce záručních nákladů také úzce souvisí s problematikou oprav, proto je nezbytné zavést alespoň základní dělení typů oprav z hlediska chování produktu po opravě. V odborné literatuře je nejčastěji uváděno následující dělení [1], [2], [5]:

- *Úplná oprava* – po opravě má produkt stejné vlastnosti jako nový produkt. Tzn. produkt má stejné rozdělení náhodné proměnné (doby mezi poruchami) a jeho parametry jako nový. Tato situace nastane v případě, pokud je produkt v rámci opravy vyměněn za identický, ale zcela nový produkt, nebo v případě tzv. generální opravy.
- *Minimální oprava* – po opravě má produkt stejné vlastnosti jako před poruchou. Tzn. produkt má stejné rozdělení náhodné proměnné (doby mezi poruchami) a jeho parametry

jako před poruchou. Tato situace nastane v případě navrácení produkt do stavu, v jakém se nacházel před poruchou (např. dotažením, seřizením, očištěním, namazáním).

- *Neúplná oprava (a)* – po opravě má produkt horší vlastnosti než před poruchou. Tzn. po opravě je intenzita poruch produkt vyšší, než byla před opravou.
- *Neúplná oprava (b)* – po opravě má produkt horší vlastnosti než nový produkt, ale lepší než před poruchou. Tzn. po opravě je intenzita poruch nižší, než byla před opravou, ale vyšší než u nového produktu.

Graficky je uvedené rozdělení vhodně charakterizováno na Obr. 3.



Obr. 3: Změna intenzity poruch produktu po provedení daného typu opravy [2].

V praxi je žádoucí neúplnou opravu typu (a) nepřipouštět, případně připouštět pouze jako výjimečnou (nouzovou) variantu do doby, než bude proveden jiný typ opravy. U konkrétních neúplných oprav typu (b) je možné rozhodnout o zařazení do kategorie úplných oprav nebo lze přijmout konzervativní předpoklad minimální opravy.

V současné době se pro predikci záručních nákladů používají matematické modely, které umožňují určit záruční náklady připadající na jeden produkt. S využitím modelů lze provést bodový odhad střední hodnoty záručních nákladů  $C(t_0)$ , resp.  $C(t_0, u_0)$ .

V současnosti používané a dále uvedené modely predikce záručních nákladů vychází z následujících předpokladů:

- všechny poruchy v záruční době jsou zákazníkem reklamovány;
- všechny reklamace jsou oprávněné;
- zákazník reklamuje produkt ihned po výskytu poruchy;
- doba reklamačního řízení (doba do obnovy) je považována za nulovou.

Uvedené předpoklady sice zjednodušují reálnou situaci, ale jsou vzhledem ke značnému usnadnění řešení predikce záručních nákladů přijatelné a běžně akceptované.

Modely se pro jednotlivé typy záruk odlišují. V další části jsou pro ilustraci uvedeny modely pro predikci záručních nákladů u nejpoužívanějších typů záruk za jakost.

### 5.1 Modely pro predikci záručních nákladů u 1-D záruk

U každého typu záruky je uveden příklad určení záručních nákladů pro výpočet nejjednodušší a u moderních vysoce spolehlivých produktů častý případ, kdy se náhodná proměnná (doba mezi poruchami) řídí exponenciálním rozdělením, tj. intenzita poruch  $\lambda(t)$  je v čase konstantní. Distribuční funkce exponenciálního rozdělení je dána vztahem:

$$F(t) = 1 - \exp[-\lambda t] \quad (2)$$



kde:  $\lambda$  = intenzita poruch pro exponenciální rozdělení náhodné proměnné;  $t$  = realizace náhodné proměnné  $T$  (kalendářní doby používání).

**Jednorozměrná neobnovovaná plná záruka:**

Matematický model pro predikci středních záručních nákladů lze vyjádřit následovně:

$$\bar{C}(t_0) = \bar{C}_c N(t_0) \quad (3)$$

kde:  $t_0$  = záruční doba;  $\bar{C}_c$  = střední náklady na opravu produktu;  $N(t_0)$  = střední počet poruch produktu v záruční době.

Příčemž za předpokladu úplné opravy lze vznik poruch charakterizovat prostým procesem obnovy a střední počet poruch lze predikovat s využitím funkce obnovy [1], [2], [5]:

$$N(t_0) = M(t_0) = \sum_{n=0}^{\infty} F^{(n)}(t_0) \quad (4)$$

kde:  $M(t_0)$  = hodnota funkce obnovy přiřazená distribuční funkci  $F(t)$  v bodě  $t_0$ ;  $F^{(n)}(t_0)$  = hodnota  $n$ -násobné konvoluce distribuční funkce  $F(t)$  v bodě  $t_0$ .

Za předpokladu minimální opravy lze vznik poruch charakterizovat nehomogenním Poissonovým procesem s funkcí intenzity rovnou intenzitě poruch a střední počet poruch lze predikovat s využitím následujícího vztahu [5]:

$$N(t_0) = \int_0^{t_0} \lambda(t) dt \quad (5)$$

kde:  $\lambda(t)$  = intenzita poruch (pro náhodnou proměnnou  $T$ ).

Pro případ exponenciálního rozdělení náhodné proměnné lze střední záruční náklady při použití jednorozměrné neobnovované plné záruky predikovat následovně:

$$\bar{C}(t_0) = \bar{C}_c \lambda t_0 \quad (6)$$

**Jednorozměrná obnovovaná plná záruka:**

Matematický model pro predikci středních záručních nákladů lze vyjádřit následujícím vztahem [2], který platí za předpokladu úplné opravy:

$$\bar{C}(t_0) = \bar{C}_c \frac{F(t_0)}{1 - F(t_0)} \quad (7)$$

kde:  $F(t_0)$  = hodnota distribuční funkce náhodné proměnné  $T$  v bodě  $t_0$ .

Pro případ exponenciálního rozdělení náhodné proměnné lze střední záruční náklady při použití jednorozměrné obnovované plné záruky predikovat následovně:

$$\bar{C}(t_0) = \bar{C}_c \left[ \frac{1 - e^{-\lambda t_0}}{e^{-\lambda t_0}} \right] \quad (8)$$

Z uvedených modelů je patrné, že při predikci záručních nákladů je nezbytné řešit dva relativně samostatné problémy:

- predikci středních nákladů na opravu  $\bar{C}_c$ ;
- predikci pravděpodobnosti vzniku jednotlivých poruch, která je popsána distribuční funkcí  $F(t)$ , případně intenzitou poruch  $\lambda(t)$ .

Střední náklady na opravu lze predikovat, nejčastěji na základě zkušeností s opravami obdobných produktů a zkušeností s reklamačními řízeními obdobných produktů. Střední náklady na opravu obvykle zahrnují:

- Náklady na náhradní díly a materiály, které zahrnují veškeré náklady na náhradní díly a materiály, které budou spotřebovány při odstranění poruchy produktu.;
- Náklady na pracovní kapacitu nutnou pro identifikování poruchy, odstranění důsledků poruchy a následnou kontrolu funkčnosti produktu;

- Další náklady související s odstraněním poruchy, které zahrnují zejména náklady spojené s dopravou produktu, náklady na náhrady zákazníkovi během odstraňování poruchy (např. náklady na poskytnutí náhradního produktu po dobu odstraňování poruchy) a administrativní náklady.

Pro predikci pravděpodobnosti vzniku jednotlivých poruch (pro určení typu rozdělení náhodné proměnné a jeho parametrů) lze využít nejrůznější postupy založené na zkušenostech z provozu obdobných produktů, zkouškách produktů, databázích bezporuchovosti, metodikách predikce bezporuchovosti, expertních odhadech apod.

## 5.2 Modely pro predikci záručních nákladů u 2-D záruk

Dále budou pro ilustraci uvedeny modely pro dvourozměrnou neobnovovanou plnou záruku, jejíž oblast krytí je znázorněna na Obr. 2.

Obecný matematický model pro predikci středních záručních nákladů při použití dvourozměrné neobnovované plné záruky lze vyjádřit následovně:

$$\bar{C}(t_0, u_0) = \bar{C}_C N(t_0, u_0) \quad (9)$$

kde:  $t_0$  = garantovaná kalendářní doba používání;  $u_0$  = garantovaná doba provozu;  $N(t_0, u_0)$  = střední počet poruch produktu v záruční době (u 2-D záruky).

Ze vztahu je zřejmé, že pro predikci záručních nákladů je nezbytné řešení dvou relativně samostatných problémů:

- predikce středních nákladů na opravu  $\bar{C}_C$ ;
- predikce středního počtu poruch v záruční době  $N(t_0, u_0)$ .

Predikce středních nákladů na opravu je shodná s predikcí u jednorozměrných záruk. Pro predikci středního počtu poruch v záruční době při použití dvourozměrné neobnovované plné záruky jsou v současnosti používány dva odlišné přístupy:

- jednorozměrný;
- dvourozměrný.

### Jednorozměrný přístup k predikci počtu poruch u 2-D neobnovované plné záruky:

Hlavním znakem tohoto přístupu je, že doba provozu  $U$  je chápána jako funkce kalendářní doby používání  $T$ , přičemž je předpokládána lineární závislost těchto veličin, což lze matematicky zapsat následovně:

$$U = rT \quad (10)$$

kde:  $r$  = intenzita provozu.

Za předpokladu úplné opravy lze vznik poruch v záruční době popsat procesem obnovy a střední počet poruch lze predikovat s využitím následujícího vztahu [2]:

$$N(t_0, u_0) = \int_0^{\gamma_1} M(t_0 | r) dG(r) + \int_{\gamma_1}^{\infty} M(t_r | r) dG(r) \quad (11)$$

kde:  $M(t_0 | r)$  = hodnota podmíněné funkce obnovy v bodě  $t_0$ ;  $M(t_r | r)$  = hodnota podmíněné funkce obnovy v bodě  $t_r$ ;  $G(r)$  = distribuční funkce náhodné proměnné  $r$ , a současně:

$$\gamma_1 = \frac{u_0}{t_0} ; t_r = \frac{u_0}{r} \quad (12)$$

Za předpokladu minimální opravy lze vznik poruch v záruční době popsat nehomogenním Poissonovým procesem s funkcí intenzity  $\lambda(t | r)$  a střední počet poruch lze predikovat s využitím následujícího vztahu [2]:

$$N(t_0, u_0) = \int_0^{\gamma_1} \int_0^{t_0} \lambda(t | r) dt dG(r) + \int_{\gamma_1}^{\infty} \int_0^{t_r} \lambda(t | r) dt dG(r) \quad (13)$$

kde:  $\lambda(t | r)$  = podmíněná intenzita poruch.

Z uvedených vztahů je zřejmé, že pro predikci středního počtu poruch, respektive střední hodnoty záručních nákladů, musí být známa podmíněná intenzita poruch vztažená ke kalendářní době používání  $\lambda(t | r)$ , případně podmíněná distribuční funkce  $F(t | r)$ .

### **Dvourozměrný přístup k predikci počtu poruch u 2-D neobnovované plné záruky:**

Hlavním znakem tohoto přístupu je, že náhodná proměnná charakterizující vznik poruch je chápána jako dvourozměrná (kalendářní doba používání mezi poruchami a doba provozu mezi poruchami) a lze ji popsat např. sdruženou distribuční funkcí  $F(t, u)$ . Je tedy zřejmé, že počet poruch v záruce je funkcí dvou proměnných: kalendářní doby používání  $T$  a doby provozu  $U$ .

Vznik poruch v záruční době lze popsat dvourozměrným procesem obnovy a střední počet poruch v záruce lze predikovat s využitím dvourozměrné funkce obnovy [1]:

$$N(t, u) = M(t, u) = \sum_{n=0}^{\infty} F^{(n)}(t, u) \quad (14)$$

kde:  $t$  = realizace náhodné proměnné  $T$ ;  $u$  = realizace náhodné proměnné  $U$ ;  $M(t, u)$  = funkce obnovy přiřazená sdružené distribuční funkci  $F(t, u)$ ;  $F^{(n)}(t, u)$  =  $n$ -násobná konvoluce sdružené distribuční funkce  $F(t, u)$ .

Uvedený vztah platí za předpokladu úplné opravy. Případ minimální opravy není v dostupné literatuře řešen.

Z uvedeného vztahu je zřejmé, že pro predikci středního počtu poruch, respektive střední hodnoty záručních nákladů, musí být známa sdružená distribuční funkce  $F(t, u)$  charakterizující pravděpodobnost vzniku poruchy v dvourozměrném prostoru.

### **5.3 Praktický postup predikce záručních nákladů u složitých produktů**

Dosud uvedené modely postup predikce záručních nákladů nahlíží na produkt jako na celek, pro nějž je však obtížné získat jeho „charakteristiky“. Použití uvedených modelů je relativně jednoduché a může vést k přiměřeně přesným výsledkům, avšak k dispozici musí být věrohodné informace o pravděpodobnostech vzniku poruch produktu i nákladech spojených s odstraňováním poruch během záruky. Zejména u nových produktů v etapě vývoje a návrhu však tyto informace k dispozici zpravidla nejsou. Také použitelnost uvedených modelů u složitějších produktů skládajících se z více prvků je značně limitována.

U produktů, které jsou složeny z mnoha částí, mají neopakovatelný charakter (produkční linky, produkční komplexy, ...) nebo se často mění jejich varianty, je velice obtížné získat informace na úrovni celku. Avšak pokud na složitý produkt nahlížíme jako na „systém“, který je složen z jednotlivých subsystémů a prvků, je situace řešitelnější. O chování jednotlivých subsystémů a prvků, pokud jsou vhodně zvoleny, lze informace získat relativně snadno.

Při predikci záručních nákladů u složitých produktů (systémů) je nezbytné realizovat následující logicky navazující kroky [6], [7]:

- Dekompozice systému na subsystémy a prvky;
- Identifikace poruch prvků;
- Predikce bezporuchovosti prvků;
- Určení způsobů odstranění poruch prvků a predikce souvisejících nákladů;
- Predikce počtu poruch prvků v záruční době;
- Syntéza získaných informací – predikce záručních nákladů pro celý systém.

Jednotlivé kroky lze realizovat více způsoby. Dále jsou popsány vybrané způsoby řešení, které autor považuje za vhodné a prakticky realizovatelné.

V prvním kroku je na produkt nahlíženo jako na systém, který lze metodou dekompozice rozčlenit na jednotlivé subsystémy a prvky. Při dekompozici systému je důležité stanovit úroveň rozčlenění systému (tj. zda prvkem bude např. hnací ústrojí vozidla, převodovka nebo konkrétní ozubené kolo v převodovce). Dekompozici systému a hlavně volbu její úrovně je vhodné provést s ohledem na: typ a složitost produktu, konstrukční a funkční uspořádání produktu, podmínky poskytované záruky (na jednotlivé subsystémy nebo prvky mohou být poskytovány záruky

s různými podmínkami), charakter vzniku poruch prvků a způsoby odstranění poruch prvků. Systém je vhodné rozčlenit až do úrovně, na které jsou k dispozici dostatečné informace o jednotlivých prvcích.

V dalším kroku je nezbytné pro každý prvek identifikovat jeho potenciální poruchy. Identifikace potenciálních poruch prvků je dílčí součástí analýzy FMEA/FMECA [9], přičemž v rámci uvedené analýzy se hovoří o zjišťování způsobů poruch. Pro jeden prvek je možné identifikovat i více způsobů poruch než jeden.

Pro každý prvek a jeho možné identifikované způsoby poruch je nezbytné předpovědět (predikovat), jejich bezporuchovost. Predikcí bezporuchovosti prvku je chápána předpověď vybraného ukazatele bezporuchovosti, který je obecně charakterizován číselnou hodnotou nebo funkcí použitou pro popis rozdělení pravděpodobnosti náhodné proměnné, která charakterizuje bezporuchovost prvku.

Každému prvku získanému dekompozicí systému a jeho možným identifikovaným poruchám (způsobům poruch) je nezbytné přiřadit odpovídající způsob odstranění těchto poruch. Konkrétní způsob odstranění poruchy závisí na rozhodnutí dodavatele, které je ovlivněno zejména typem prvku, identifikovaným způsobem poruchy, konstrukčním uspořádáním a vychází z předpokládané politiky údržby a politiky záruk. Je důležité zmínit fakt, že v záruční době bývají obvykle způsoby odstranění poruch dodavatelem předem přesně definovány.

Při odstraňování poruchy prvku v záruční době je nezbytné vynaložit jisté finanční prostředky, které lze rozdělit do tří skupin, které již byly popsány dříve. Je proto nezbytné provést predikci středních hodnot zmíněných nákladů pro všechny identifikované poruchy (způsoby poruch).

Pro jednotlivé identifikované poruchy je nezbytné predikovat počet jejich výskytů v záruční době. Přičemž způsob predikce závisí na určeném způsobu odstranění dané poruchy. Vzhledem k tomu, že predikce počtu poruch v záruční době je založena na ukazatelích bezporuchovosti, je třeba počet poruch v záruční době chápat jako náhodnou proměnnou. Proto je nezbytné provést predikci středního počtu poruch (počtu výskytů poruch) v záruční době pro všechny identifikované poruchy. K tomu lze využít v předchozích částech prezentované modely.

Na základě dosud uvedených informací lze získat data potřebná pro provedení predikce hodnot vztahujících se k produktu jako celku (podrobnosti viz [6]).

Stručně charakterizovaný postup predikce záručních nákladů u složitých produktů ukazuje, že je možno na produkt nahlížet jako na systém složený ze subsystémů a prvků a že tento předpoklad usnadňuje její praktickou realizaci. U složitých produktů je potřeba jednotlivé kroky aplikovat systematicky a cílevědomě a je třeba postupovat prvek po prvku. Jednotlivé kroky jsou logicky navazující, ale u složitých produktů je jejich provedení náročné nejen časově. Je proto vhodné uvažovat o využití běžně dostupné softwarové podpory.

## 6. Specifika dvourozměrných záruk za jakost

Při použití dvourozměrné záruky za jakost je třeba řešit další problém úzce související se záručními náklady. Při použití dvourozměrné záruky za jakost nejsou záruční náklady ovlivněny jen podmínkami záruky a úrovní spolehlivosti, ale také chováním zákazníků, konkrétně intenzitou, s jakou produkt používají. Pro provedení predikce záručních nákladů a řešení souvisejících problémů je proto nezbytné stanovit okamžik, ve kterém dojde k ukončení záruční doby. Okamžik ukončení záruční doby lze stanovovat více možnými způsoby, jak je naznačeno v dalších kapitolách. Dále je předpokládáno použití dvourozměrné neobnovované plné záruky, jejíž oblast krytí je uvedena na Obr. 2. Tato záruka je nejpoužívanějším typem dvourozměrné záruky.

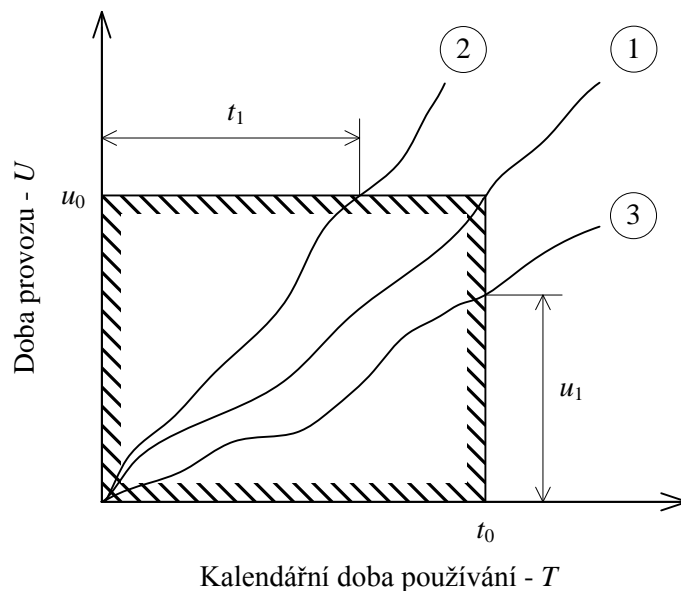
### 6.1 Průběh záruční doby a okamžik jejího ukončení

V případě uvažované dvourozměrné záruky, může záruční doba u produktu probíhat v podstatě třemi způsoby, které následně určují okamžik ukončení záruční doby:

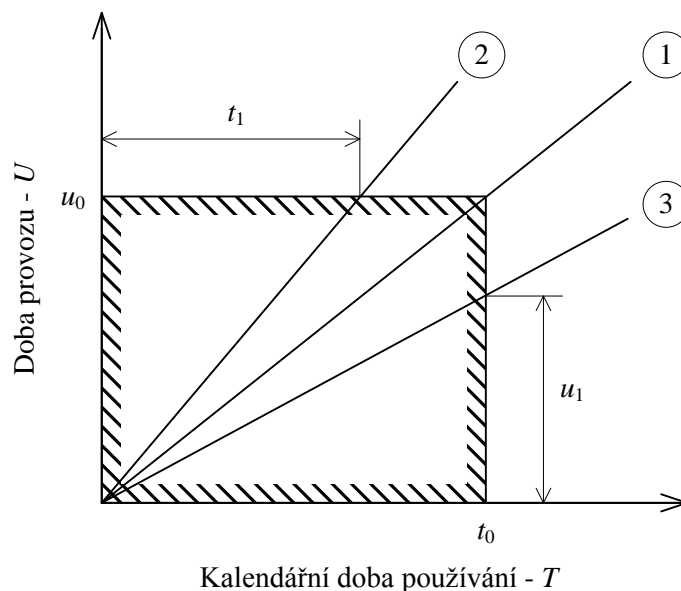
- Varianta 1 (viz Obr. 4, křivka 1) je charakterizována tím, že v okamžiku ukončení záruky bude vyčerpána jak garantovaná kalendářní doba používání ( $t_0$ ), tak garantovaná doba provozu ( $u_0$ ). Je nutné podotknout, že tato varianta je spíše „teoretická“, protože její praktické dosažení je velmi málo pravděpodobné.

- V případě varianty 2 (viz Obr. 4, křivka 2) záruka končí po překročení garantované doby provozu ( $u_0$ ), přičemž garantovaná kalendářní doba používání ( $t_0$ ) nebyla vyčerpána. Hodnota  $t_1$  je tudíž náhodnou proměnnou.
- V případě varianty 3 (viz Obr. 4, křivka 3) záruka končí po překročení garantované kalendářní doby používání ( $t_0$ ), přičemž garantovaná doba provozu ( $u_0$ ) nebyla vyčerpána. Hodnota  $u_1$  je tudíž náhodnou proměnnou.

Dále můžeme předpokládat, že průběh záruční doby je konstantní a křivky v Obr. 4 můžeme nahradit přímkami (viz Obr. 5).



Obr. 4: Oblast krytí 2-D zárukou a skutečné průběhy záruční doby [6].



Obr. 5: Oblast krytí 2-D zárukou a konstantní průběhy záruční doby [6].

Každý jednotlivý produkt je v průběhu záruční doby používán odlišným způsobem, tudíž je zřejmé, že lze jen obtížně předem přesně stanovit, ve kterém okamžiku dojde k ukončení záruční doby. Okamžik ukončení záruční doby lze stanovovat více možnými způsoby, které jsou dále popsány.

První a nejjednodušší způsob vychází z předpokladu průběhu záruční doby dle varianty 1 (viz Obr. 5, přímkou 1). Při tomto předpokladu lze provést predikci záručních nákladů při maximálně

nevýhodném využití záruční doby z hlediska dodavatele, jinak řečeno, lze provést konzervativní predikci středních záručních nákladů. Uvedený postup je na jedné straně nejjednodušší, ale na druhé straně je nepřesný.

Mnohem vhodnější je provést předpověď průběhu a okamžiku ukončení záruční doby. V některých případech lze uvedenou předpověď provést relativně snadno s využitím informací o předpokládaném použití produktu. Tyto informace mohou mít různou formu, např. je dána předpokládaná doba provozu za určitou kalendářní dobu a předpokládaný počet dní v roce, kdy bude produkt používán (např. vozidlo bude v provozu průměrně 330 dní v roce a denně ujede průměrně 400 km). Tato situace se týká především produktů určených pro konkrétního zákazníka (produktů na zakázku), kdy uvedené údaje mohou být součástí obchodních podmínek, případně specifikací produktu. V uvedeném případě lze vypočítat předpokládanou dobu provozu  $u_1$ , které bude dosaženo v kalendářní době  $t_0$  a dle vzniklé situace lze předpovědět okamžik ukončení záruční doby následovně:

$$\begin{aligned} \text{pro } u_1 < u_0: & \quad (t_0, u_1) \\ \text{pro } u_1 = u_0: & \quad (t_0, u_0) \\ \text{pro } u_1 > u_0: & \quad (t_1, u_0), \text{ kde } t_1 = t_0 \frac{u_0}{u_1} \end{aligned} \tag{15}$$

V případě tzv. produktů určených pro trh (spotřebních produktů), kde záruky nacházejí největší uplatnění, je situace poněkud složitější. Z toho důvodu je uvedená situace věnována následující samostatná kapitola.

## 6.2 Predikce okamžiku ukončení záruční doby

V případě tzv. produktů určených pro trh (spotřebních produktů), kde záruky nacházejí největší uplatnění, jednotliví zákazníci používají produkt s různou intenzitou, která se může v jednotlivých případech výrazně lišit. Nabízí se proto možnost „identifikovat“ chování zákazníků, tzn. zjistit intenzitu používání produktu jednotlivými zákazníky, konkrétně předpokládanou dobu provozu (např. počet km), kterou realizuje produkt za určitou kalendářní dobu používání (např. jeden rok).

Autor příspěvku navrhl a prakticky aplikoval postup predikce okamžiku ukončení záruční doby, který je založen na běžně využívaném dotazování zákazníků a lze jej rozdělit do následujících logicky navazujících kroků [6]:

- Dotazování zákazníků;
- Statistické zpracování získaných dat;
- Predikce okamžiku ukončení záruční doby.

V prvním kroku je nezbytné dotázat se dostatečného počtu stávajících či potenciálních zákazníků (uživatelů) příslušného typu produktu na intenzitu, s jakou produkt používají (u stávajících zákazníků) či s jakou intenzitou by produkt v případě pořízení používali (u potenciálních zákazníků).

V dalším kroku je nezbytné statisticky zpracovat data získaná dotazováním. Je vhodné získané rozdělení náhodné proměnné (intenzity používání) nahradit některým ze známých spojitých rozdělení pravděpodobnosti, se kterým se snáze pracuje.

Poté je možné vypočítat střední dobu provozu, které bude dosaženo v kalendářní době  $t_0$ :

$$u_1 = t_0 \int_0^{\infty} y f(y) dy \tag{16}$$

kde:  $t_0$  = garantovaná kalendářní doba používání;  $y$  = realizace náhodné proměnné (intenzity používání produktu  $Y = U / T$ );  $f(y)$  = funkce hustoty pravděpodobnosti náhodné proměnné.

S využitím získané hodnoty lze snadno predikovat okamžik ukončení záruční doby (s ohledem na předpokládaný průběh záruční doby, viz Obr. 5).

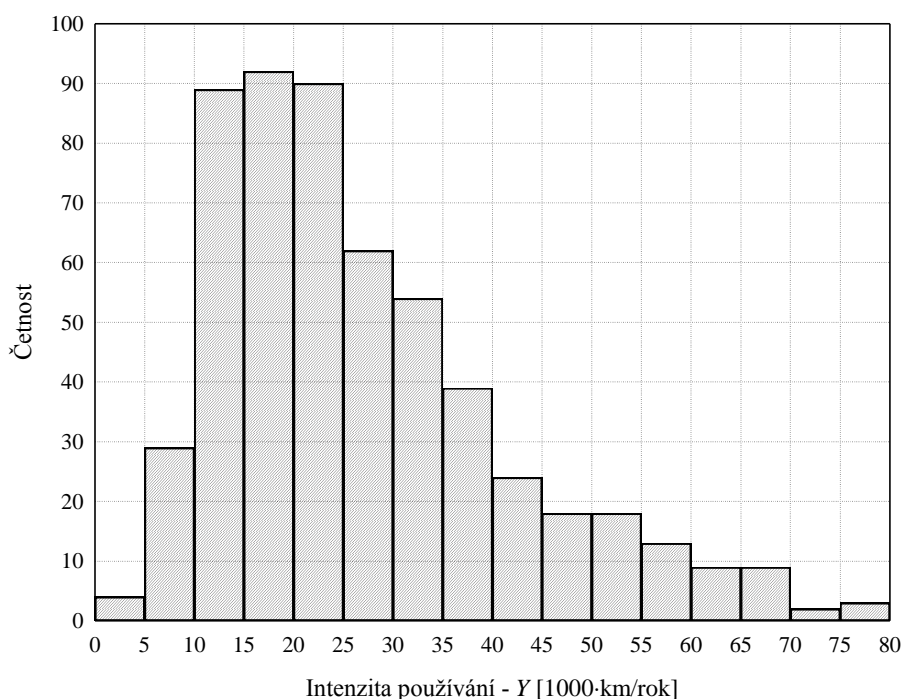
V některých případech je vhodné predikovat také střední dobu provozu, která bude realizována produktem v rámci záruky. U určitého počtu produktů totiž bude záruka ukončena překročením garantované doby provozu  $u_0$  a tudíž tyto produkty v záruce realizují dobu provozu

rovnu právě  $u_0$ . Předmětem zájmu je pouze doba provozu realizovaná v rámci záruky, a nikoliv doba realizovaná po ukončení záruky. Střední dobu provozu produktu v záruce lze určit následovně:

$$u_w = t_0 \int_0^{y_0} y f(y) dy + u_0 \int_{y_0}^{\infty} f(y) dy \quad (17)$$

kde:  $u_0$  = garantovaná doba provozu;  $y_0$  = záruční intenzita používání ( $y_0 = u_0 / t_0$ ).

Popsaný postup autor prakticky použil na příkladu osobního vozu nižší střední třídy, který je vyráběn v České republice [6]. V prvním kroku byl proveden průzkum chování zákazníků (majitelů vozů daného typu) s cílem zjistit intenzitu, s jakou vůz používají. Data byla získána dotazováním (osobním nebo zprostředkovaným) majitelů jednotlivých vozidel. Celkem byla získána data o více než 550 vozidlech. Do průzkumu byla zahrnuta pouze vozidla, od jejichž uvedení do provozu neuplynulo více než 6 let. Zjištěný histogram četností počtu najetých kilometrů za jeden rok používání (intenzity používání) je zobrazen na Obr. 6.



Obr. 6: Histogram intenzity používání [6].

Získaná a upravená data byla následně statisticky zpracována a byly provedeny dosud popsané výpočty okamžiku ukončení záruční doby a střední doby provozu produktu v záruce.

Při dalším zpracování s použitím fitování rozdělení pravděpodobnosti bylo zjištěno, že náhodnou veličinu (počet najetých kilometrů za jeden rok používání) lze vhodně popsat logaritmicke-normálním rozdělením s parametry  $\mu^* = 10,055$  a  $\sigma^{*2} = 0,318$ . Mnoho zahraničních literárních zdrojů uvádí logaritmicke-normální rozdělení jako adekvátní volbu pro popis počtu najetých kilometrů za jeden rok používání.

Dále je uvažována dvourozměrná záruka s následujícími, často používanými parametry:

- $t_0 = 3$  roky;
- $u_0 = 100\,000$  km.

Pro tyto parametry záruky lze spočítat záruční intenzitu používání:

$$y_0 = \frac{u_0}{t_0} = \frac{100\,000}{3} = 33\,333,3 \text{ km/rok} \quad (18)$$

Na základě výsledků průzkumu chování zákazníků lze (s využitím softwarové podpory) vypočítat střední hodnotu intenzity používání:

$$y = 27\,268 \text{ km/rok} \quad (19)$$

S ohledem k uvažovaným parametrům záruky lze s využitím vztahu (16) vypočítat střední dobu provozu  $u_1$ , které bude dosaženo v kalendářní době  $t_0 = 3$  roky:

$$u_1 = 81804 \text{ km} \quad (20)$$

S využitím standardních výpočtových vztahů pro logaritmicko-normální rozdělení lze určit pravděpodobnost toho, že záruční doba skončí překročením garantované doby provozu  $u_0 = 100\,000$  km:

$$P(Y > y_0) = 0,2617 \quad (21)$$

a pravděpodobnost toho, že záruční doba skončí překročením garantované kalendářní doby používání  $t_0 = 3$  roky:

$$P(0 \leq Y < y_0) = 0,7383 \quad (22)$$

Vzhledem k faktu, že  $y < y_0$ , respektive  $u_1 < u_0$ , lze dle vztahu (15) predikovat okamžik ukončení záruční doby následovně:

$$(t_0, u_1) = (3 \text{ roky}, 81804 \text{ km}) \quad (23)$$

Na základě vztahu (17) lze následně predikovat střední dobu provozu v záruce:

$$u_w = 69522 \text{ km} \quad (24)$$

### 6.3 Využití získaných informací – Příklady praktické aplikace

Informace získané při predikci okamžiku ukončení záruční doby lze využít pro řešení následujících tří základních problémů v oblasti záručních nákladů u dvourozměrných záruk za jakost:

- Predikce záručních nákladů při použití dvourozměrné záruky;
- Analýza vlivu změn parametrů dvourozměrné záruky na záruční náklady;
- Návrh parametrů dvourozměrné záruky při daných záručních nákladech.

Vzhledem k faktu, že autor příspěvku neměl k dispozici konkrétní informace o pravděpodobnosti vzniku poruch v dvourozměrném prostoru a související ekonomické parametry, další řešení vychází z předpokladu, že je k dispozici alespoň informace o jednotkových záručních nákladech. Pro potřeby ilustrace problému lze tuto informaci považovat za dostačující.

Jednotkové náklady představují střední náklady, které je nutné vynaložit na vyřízení reklamací produktu v záruční době, vztažené na jednotku doby provozu a obvykle vyjádřené v jednotkách Kč/km. Takto definované jednotkové záruční náklady lze použít u produktů, jejichž doba mezi poruchami se řídí exponenciálním rozdělením. Zmíněné jednotkové záruční náklady lze získat na základě předchozích zkušeností (např. z jiného trhu) nebo expertních odhadů. Praktické možnosti a způsoby určení jednotkových záručních nákladů lze nalézt v odborné literatuře [1], [2].

Informace o konkrétních hodnotách záručních nákladů jsou velmi citlivé a obvykle jsou dodavateli pečlivě tajeny. Z toho důvodu autor neměl k dispozici detailní informace o jednotkových záručních nákladech uvažovaného osobního vozu nižší střední třídy a byl nucen jednotkové náklady stanovit expertním odhadem [6]:

$$c = 0,12 \text{ Kč/km} \quad (25)$$

#### **Predikce záručních nákladů při použití dvourozměrné záruky:**

V případě, že jsou k dispozici informace o jednotkových záručních nákladech (vztažených na jednotku doby provozu), lze střední záruční náklady pro celý produkt predikovat následovně:

$$\bar{C} = c u_w \quad (26)$$



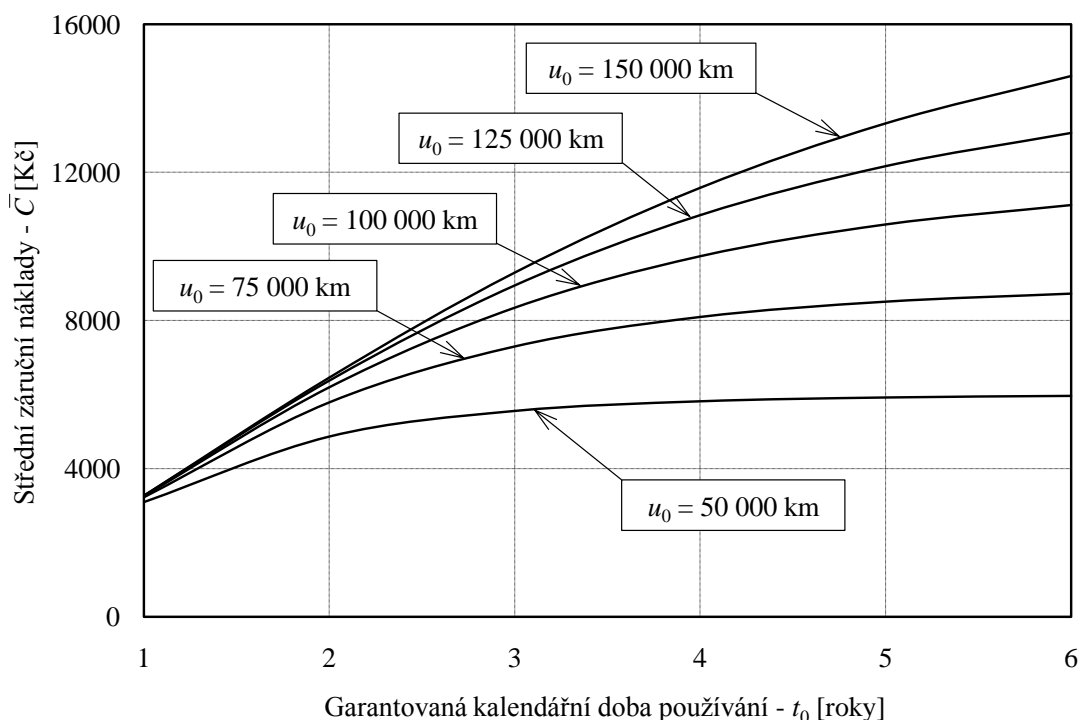
Vzhledem k uvedenému a s využitím vztahu (26) lze střední záruční náklady pro uvažovaný osobní vůz nižší střední třídy predikovat následovně:

$$\bar{C} = \bar{c}u_w = 0,12 \cdot 69522 = 8343 \text{ Kč} \quad (27)$$

Na výslednou hodnotu je nezbytné nahlížet s obezřetností, protože je založena na expertním odhadu jednotkových záručních nákladů.

### **Analyza vlivu změn parametrů dvourozměrné záruky na záruční náklady:**

Dále lze získané informace využít k analýze vlivu změn parametrů dvourozměrné záruky na záruční náklady. Nejprve je třeba predikovat střední záruční náklady celého produktu pro různé parametry záruky a tudíž pro různé okamžiky ukončení záruční doby. Poté je vhodné výsledky zaznamenat do přehledných grafů, které umožní postihnout vliv změn parametrů dvourozměrné záruky na střední záruční náklady. Výsledný graf je uveden na Obr. 7.



Obr. 7: Závislost záručních nákladů na garantované kalendářní době používání [6].

### **Návrh parametrů dvourozměrné záruky při daných záručních nákladech**

Třetí možností využití získaných informací je návrh parametrů dvourozměrné záruky při pevně stanovené výši záručních nákladů. Předpokládá se, že je stanovena maximální výše záručních nákladů pro celý produkt  $C_{max}$  a že je k dispozici informace o jednotkových záručních nákladech  $\bar{c}$  pro celý produkt. Poté lze odvodit vztah pro určení hodnot parametrů dvourozměrné záruky  $t_0$  a  $u_0$  při maximální akceptovatelné výši záručních nákladů následovně:

$$t_0 = \frac{C_{max}}{\bar{c} \left( \int_0^{y_0} yf(y)dy + y_0 \int_{y_0}^{\infty} f(y)dy \right)} \quad (28)$$

$$u_0 = y_0 \frac{C_{max}}{\bar{c} \left( \int_0^{y_0} yf(y)dy + y_0 \int_{y_0}^{\infty} f(y)dy \right)} \quad (29)$$

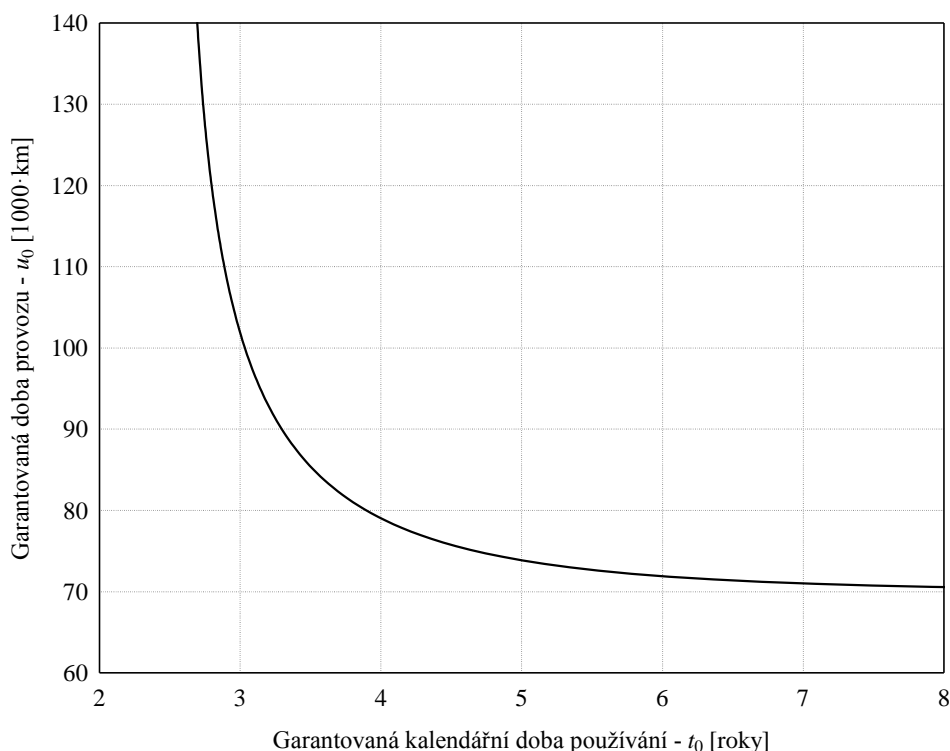
Pokud vypočteme hodnoty  $t_0$  a  $u_0$  pro vhodně zvolený počet hodnot  $y_0$ , můžeme je vynést do grafu a proložit křivkou.

Uvedený postup byl aplikován na zmíněném příkladu osobního vozu nižší střední třídy. Při stanovení maximální výše záručních nákladů pro jeden uvažovaný osobní vůz nižší střední třídy autor vycházel z předpokladů použitých při expertním odhadu jednotkových záručních nákladů.

Maximální výše záručních nákladů pro jeden uvažovaný vůz byla poté stanovena expertním odhadem:

$$C_{max} = 8400 \text{ Kč} \quad (30)$$

Výsledný graf je uveden na Obr. 8. Křivka v grafu rozděluje plochu na dvě části: pole přijatelných hodnot záručních parametrů  $t_0$ ,  $u_0$  (pod křivkou) a pole nepřijatelných hodnot záručních parametrů (nad křivkou). Body ležící na křivce určují kombinace záručních parametrů  $t_0$  a  $u_0$ , při kterých budou záruční náklady na maximální akceptovatelné výši.



Obr. 8: Závislost záručních parametrů pro stanovenou výši záručních nákladů [6].

Výsledky získané aplikací navržených postupů jsou do značné míry ovlivněny „kvalitou“ vstupních dat získaných průzkumem chování zákazníků, nicméně pro potřeby ilustrace problému je lze považovat za dostačující.

## 7. Závěr

Příspěvek prezentoval problematiku záruk za jakost, záručních nákladů, predikce záručních nákladů a dvourozměrných záruk za jakost.

Záruční náklady jsou nedílnou součástí nákladů životního cyklu a mají výrazný vliv na ekonomickou situaci dodavatele. Záruční náklady ovlivňuje dodavatel od etapy koncepce a stanovení požadavků až do etapy instalace. V etapě provozu dochází k plnění záručních povinností, z toho plynou záruční náklady, které již dodavatel nemá možnost výrazně ovlivnit. V této etapě může dodavatel „pouze“ vyhodnocovat informace z reklamačních řízení. Z těchto důvodů by se dodavatelé měli zárukami za jakost a záručními náklady zabývat již od počátku životního cyklu produktu.

Všechna racionální rozhodnutí dodavatele spojená se stanovením rozsahu poskytovaných záruk by měla být podložena odpovídající analýzou, jejímž základem je predikce záručních nákladů. Pro provedení predikce je nezbytná znalost především ukazatelů bezporuchovosti a souvisejících ekonomických parametrů. V případě použití dvourozměrných záruk za jakost je nezbytná také znalost chování zákazníků.

#### **Použité zdroje:**

- [1] BLISCHKE, W.R. – MURTHY, D.N.P. *Product Warranty Handbook*. 1<sup>st</sup> ed. New York: Marcel Dekker, 1996. ISBN 0-8247-8955-5.
- [2] BLISCHKE, W.R. – MURTHY, D.N.P. *Warranty Cost Analysis*. 1<sup>st</sup> ed. New York: Marcel Dekker, 1994. ISBN 0-8247-8911-3.
- [3] JURAN, J.M. – GODFREY, A.B. *Juran's Quality Handbook*. 5<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1999. ISBN 0-07-034003-X.
- [4] MURTHY, D.N.P. – BLISCHKE, W.R. *Warranty Management and Product Manufacture*. 1<sup>st</sup> ed. London: Springer-Verlag, 2006. ISBN 1-85233-933-0.
- [5] RIGDON, S.E. – BASU, A.P. *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. 1<sup>st</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 2000. ISBN 0-471-34941-0.
- [6] VINTR, M. *Predikce nákladů na záruky za jakost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 117 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Vasilij Teš, CSc.
- [7] VINTR, M. *Predikce nákladů na záruky za jakost: Zkrácená verze Ph.D. Thesis*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. 30 s. ISBN-978-80-214-4054-8.
- [8] ČSN EN 60300-3-3 (01 0690). *Management spolehlivosti – Část 3-3: Pokyn k použití – Analýza nákladů životního cyklu*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [9] ČSN EN 60812 (01 0675). *Techniky analýzy bezporuchovosti systémů – Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA)*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [10] ČSN EN ISO 9000:2006 (01 0300). *Systémy managementu kvality – Základy, zásady a slovník*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [11] ČSN IEC 50(191) (01 0102). *Mezinárodní elektrotechnický slovník – Kapitola 191: Spolehlivost a akost služeb*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [12] 15 U.S.C. §2301 et seq. (United States Code, Title 15: Commerce and Trade, Chapter 50: Consumer Product Warranties) (Magnuson-Moss Warranty Act).
- [13] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 1999/44/ES o některých aspektech prodeje spotřebního zboží a záruk na toto zboží.
- [14] Zákon č. 40/1964 Sb., občanský zákoník, ve znění pozdějších předpisů.
- [15] Zákon č. 513/1991 Sb., obchodní zákoník, ve znění pozdějších předpisů.
- [16] Zákon č. 634/1992 Sb., o ochraně spotřebitele, ve znění pozdějších předpisů.
- [17] *Warranty Week: the Newsletter for Warranty Management Professionals* [online]. Warranty Week, [cit. 2011-05-10]. Dostupný z: <<http://www.warrantyweek.com>>. ISSN 1550-9214.

# EKONOMICKÉ ASPEKTY SPOLEHLIVOSTI VÝROBNÍHO ZAŘÍZENÍ

## ECONOMIC ASPECTS OF PRODUCTION EQUIPMENT MAINTENANCE

Ing. Hana Čermáková, CSc.  
Ing. Julie Volfová

Technická univerzita v Liberci  
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií  
Studentská 2, 461 17 Liberec  
e-mail: [hana.cermakova@tul.cz](mailto:hana.cermakova@tul.cz)  
[julie.volfova@tul.cz](mailto:julie.volfova@tul.cz)

### Abstract:

With the increasing complexity of technology corresponds the advancement of its maintenance approaches. The up to date system of maintenance shall include predictive modules and proactive formulation of efficient strategy for all maintenance interventions on all the key devices of a production equipment. The issue has beside its technical and technological level also an economic dimension. This paper introduces an economic quantification of selected items within the costs of maintenance, that are representing further inputs into maintenance optimizing system RCM.

### 1. Úvod

S rostoucí složitostí veškerých strojů a zařízení okolo nás se odpovídajícím způsobem mění rovněž přístup k péči o ně – k jejich údržbě. Systémy údržby na úrovni doby by měly obsahovat jistou úroveň predikce a proaktivity s dostatečným zálohováním klíčových zařízení. Tato problematika má však kromě technické a technologické také svoji ekonomickou stránku. Výpadky zařízení, ať už plánované nebo neplánované, mohou způsobit ekonomickou ztrátu ze snížení množství nebo kvality produkce. Na druhé straně zajištění výrobní soustavy nadbytečným zálohováním a neefektivní údržbou představuje mrhání finančními prostředky.

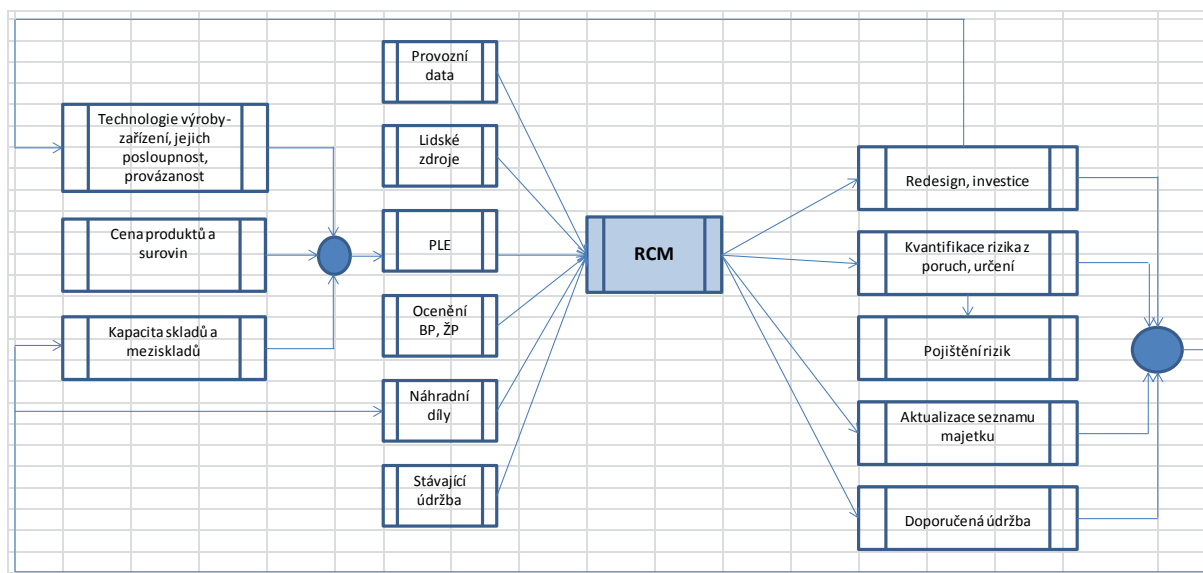
K účelu efektivního řízení údržby jsou využívány systémy optimalizace údržby. Příkladem může být systém RCM, který na základě porovnání nákladů alternativních scénářů údržby vyhodnotí alternativu pro provozovatele nejvýhodnější. Podstatný význam pro zajištění kvality výsledků systému má kvalifikovanost vstupních údajů, které zahrnují jak přímé náklady údržby, tak údaje o nákladech nepřímých – vyvolaných. Součástí požadovaných vstupů jsou rovněž odhady takových položek vyvolaných nákladů, jako jsou environmentální náklady spojené s potenciálním poškozením životního prostředí v případě selhání výrobního zařízení. Příspěvek se soustřeďuje na problematičtější položky nákladů údržby a možnosti jejich ekonomické kvantifikace.

### 2. Stručné představení systému RCM

Základním principem metody RCM je nalezení optimálního programu údržby, který představuje z dlouhodobého hlediska ekonomicky nejvýhodnější variantu pro provozovatele při zohlednění všech parametrů a charakteristik hodnocených alternativ údržby.

Výběr optimální varianty údržby se řídí hodnotou indexu efektivnosti údržby pro každou zadavatelem určenou (popsanou) komponentu výrobního systému. Tento index je vyhodnocen pro každý zadaný typ údržby. Podkladem jeho výpočtu jsou zadané údaje o celkových nákladech údržby a riziku při výpadku výrobního zařízení. Hodnota rizika je určena střední dobou do poruchy komponenty podle zadaného scénáře údržby a hodnotou sumárního následku této poruchy.

Přehled vstupních údajů a základní skupiny výsledných informací systému dokumentuje přiložený obrázek.



Obr. 1 Schéma vstupů a výstupů systému RCM

Prvořadým úkolem zajištění dostatečně věrohodných výsledků je zadání kvalifikovaných relevantních údajů do systému. V praxi dochází často k situacím, kdy nejsou potřebné údaje v dostatečné kvalitě dostupné a musí být použity kvalifikované odhady.

Pokud jde o ekonomické vstupy, týkají se jednotlivých nákladových položek analyzovaných strategií údržby s rozlišením přímých i nepřímých (vyvolaných) nákladů a ekonomického hodnocení následků selhání zařízení. Přímé náklady údržby je nutné podpořit podrobnou evidencí, která by měla obsahovat jak technické tak ekonomické údaje. Obtížnější je kvantifikace vyvolaných nákladů, sestavení rovnice výrobních ztrát v závislosti na délce výpadku zařízení, ale také environmentálních nákladů a dalších položek, u nichž většinou nelze využít údaje evidence a je třeba použít kvalifikovaný odhad.

### 3. Úloha plánování inspekcí – Volba strategie provozu a údržby paroplynového bloku

Celkové náklady údržby jsou závislé nejenom na výši jednotlivých nákladových položek, ale v případě preventivních zásahů rovněž na časovém intervalu preventivních prohlídek, tj. na volbě strategie provozu a údržby zařízení. V řadě případů jsou preventivní prohlídky stanoveny výrobcem zařízení, který garantuje řadu údržbových zásahů, ovšem za předpokladu dodržování jím stanovených pravidel provozu zařízení.

Tuto skutečnost můžeme dokumentovat na příkladu volby strategie paroplynového bloku, kde výrobce garantuje uživateli zásahy do provozu zařízení formou inspekčních prohlídek. Interval mezi prohlídkami jsou určeny počtem provozovaných hodin tohoto zařízení, jejich trvání určuje scénář, daný výrobcem. Uživatel v tomto případě volí provozní strategii provozu zařízení s ohledem na potřeby a požadavky svých odběratelů i s ohledem na maximalizaci svého zisku.

Úloha je v tomto případě založena na kalkulaci celkové produkce energie dodávané dvěma plynovými turbínami v časovém horizontu jednoho roku pro zadané strategie jejich provozu a v kalkulaci výnosů produkce v časovém toku.

Základní pravidla provozu jsou dána následovně:

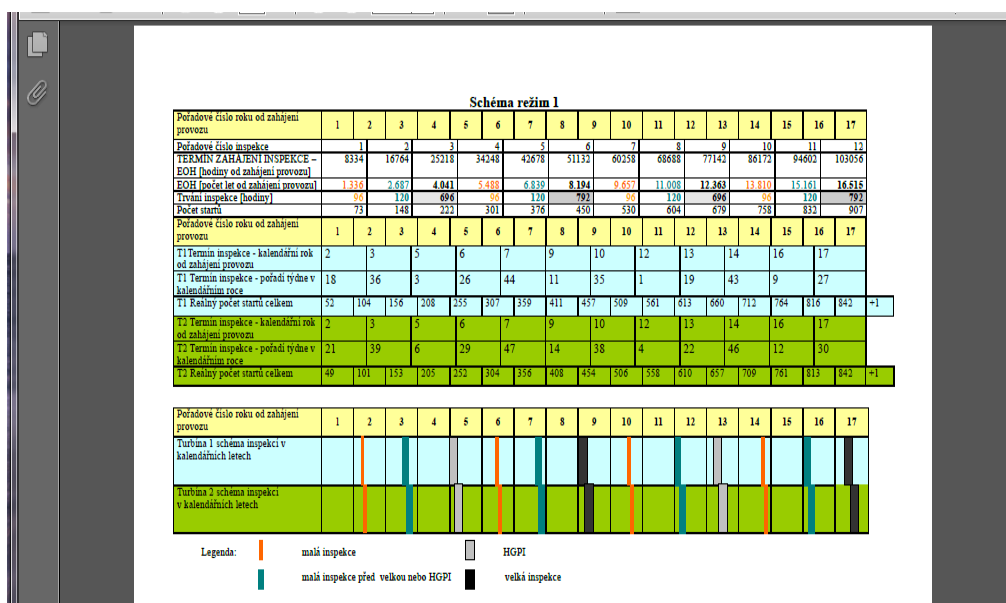
- jsou formulovány základní strategie provozu obou turbín,
- provoz každé turbíny je definován jejím jmenovitým výkonem a nastaveným výkonem pro roční období, pracovní a víkendové dny, pro denní a noční provoz,
- jsou definovány 4 typy inspekcí, každý typ má jinou délku trvání a počtem provozních hodin každé turbíny je určen interval mezi inspekcemi,
- provoz druhé turbíny je termínově posunut tak, aby byla umožněna náhrada výkonu turbíny v době její inspekce,
- pro každou strategii provozu je provedena kalkulace počtu startů turbíny po plánované odstávce (inspekci).

Produkce energie v dílčích časových obdobích je tedy dána nastaveným výkonem každé turbíny a počtem provozovaných hodin. V době inspekce je turbína odstavena. V tomto období lze

využít druhou turbínu, pokud její nastavený výkon je menší než výkon instalovaný. V době dlouhodobých inspekcí dochází k situaci, kdy jsou obě turbíny v odstávce. Tehdy je produkce energie zajišťována parní turbínou.

Cena energie je odlišná pro denní a noční provoz, proto také kalkulace výnosů rozlišuje denní a noční produkci. Náklady provozu v jednotlivých obdobích souvisí s nastaveným výkonem každé turbíny a s počtem startů po odstávkách. Model uvažuje pouze plánované odstávky, které souvisí jednak s inspekcemi, jednak s danou provozní strategií každé turbíny (starty po víkendů apod.).

Výsledkem strategického modelu provozu paroplynového bloku je harmonogram provozu turbín paroplynového bloku s kalkulací produkce a výnosů produkované energie v časovém toku běžného kalendářního roku pro všechny zadané alternativy provozu a s respektováním pravidel zařízení plánovaných odstávek. Výsledek modelu ilustruje harmonogram provozu paroplynového bloku pro vybraný režim R1.



Obr. 2 Schéma provozu plynových turbín dle strategie R1

#### 4. Ekonomické aspekty obnovy

Obnova zařízení se uskutečňuje obecně po uplynutí určitého času jeho činnosti. V zásadě lze rozlišit dvě kategorie typů obnovy.

První řeší problematiku obnovy dílčích prvků zařízení, které v určitém okamžiku selžou a přestanou plnit svoji funkci. Jedná se v podstatě o metody údržby s náhradou jednotlivých prvků systému.

Druhý typ obnovy je podmíněn důvody pro náhradu starého zařízení, jehož užitečnost pro systém se postupně snižuje z různých příčin. Týká se dlouhodobého majetku, který podléhá postupnému opotřebení jak fyzickému tak morálnímu. Ekonomicky je toto opotřebení vyjadřováno formou odpisů.

V souvislosti s dlouhodobým majetkem se rozlišuje technická a ekonomická životnost. Technická (fyzická) životnost je daná technickými parametry výrobce a její zachování vyžaduje údržbu a opravy (případně generální opravy). Ekonomická životnost je období, po které je účelné zařízení hospodárně využívat. Je zpravidla kratší než technická životnost. Teoreticky lze tedy dlouhodobý majetek využívat i po ukončení ekonomické životnosti. Nevýhodou v tomto případě jsou zpravidla vyšší nároky na opravy a údržbu.

Dlouhodobý majetek je předpisem (v ČR určen kódem SKP – standardní klasifikace produkce) zařazován do odpisových skupin pro účely výpočtu daně z příjmů. Tímto předpisem se řídí daňové odpisy dlouhodobého majetku. Na rozdíl od daňových odpisů si účetní formu odpisů volí podnik sám, a to jak dobu odepisování, tak způsob – rovnoměrné nebo nerovnoměrné odepisování.

S obnovou zařízení souvisí v zásadě náklady na pořízení nového zařízení, náklady s pořízením nového zařízení související (tj. náklady na demontáž starého zařízení, montáž nových prvků resp. montáž nového zařízení) a náklady vyvolané vyřazením zařízení z provozu v době jeho obnovy (včetně ztrát na produkci do doby plné náhrady starého zařízení).

Odhad nákladů na obnovu zařízení zpravidla nečiní větší potíže – hlavní položku tvoří cena pořízení, další položky lze víceméně přesně odhadnout. Obtížnější je rozhodování o termínu obnovy zařízení. Ten by měl být určen podle pravidel ekonomické efektivity.

#### 4.1 Metoda adverzního minima

Základem pro volbu nákladově nejvýhodnějšího okamžiku obnovy zařízení je zde kalkulace celkových provozních nákladů. Jsou to jednak náklady na provoz a údržbu (ty obvykle narůstají se stářím zařízení), amortizační náklady (rozdíl mezi pořizovací a zůstatkovou cenou zařízení v době obnovy) a náklady na opravy resp. generální opravu zařízení.

Metoda adverzního minima spočívá ve výpočtu průměrných celkových nákladů provozu zařízení pro jednotlivá období a vyhledání období s minimální hodnotou. Adverzní průměr je pak podílem celkových nákladů (ceny investice a nákladů na opravy a údržbu) k počtu let užívání investice. Náhradu zařízení je vhodné provést tehdy, kdy jsou průměrné roční náklady minimální.

Obdobou je volba optimálního termínu obnovy zařízení z hlediska nákladů a výnosů. Zde vyčíslíme celkové kumulované náklady, výnosy a zisk pro jednotlivá období. Vhodný termín pro náhradu zařízení je v období, kdy je průměrný roční zisk maximální.

Optimální termín obnovy zařízení určuje ekonomickou životnost zařízení, resp. jeho ekonomicky efektivní životnost. V tomto smyslu je tento termín doporučen rovněž pro stanovení doby účetního odepisování.

Východiskem použití metody jsou následující informace:

- pořizovací cena zařízení  $A$ ,
- náklady na údržbu v obdobích  $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ ,
- předpokládáme stejně dlouhá období.

Celkové náklady po  $n$  obdobích (pro jednu obnovu zařízení):

$$N = A + \sum_{i=1}^n c_i \quad (1)$$

Průměrné náklady

$$N_{\phi} = N / n \quad (2)$$

Postup určení ekonomické životnosti investice ilustruje následující příklad. Určujícími faktory volby optimální obnovy investice jsou:

- cena pořízení investice,
- náklady údržby,
- další ekonomické vlivy (diskontní faktor ad.).

##### Příklad aplikace metody adverzního průměru

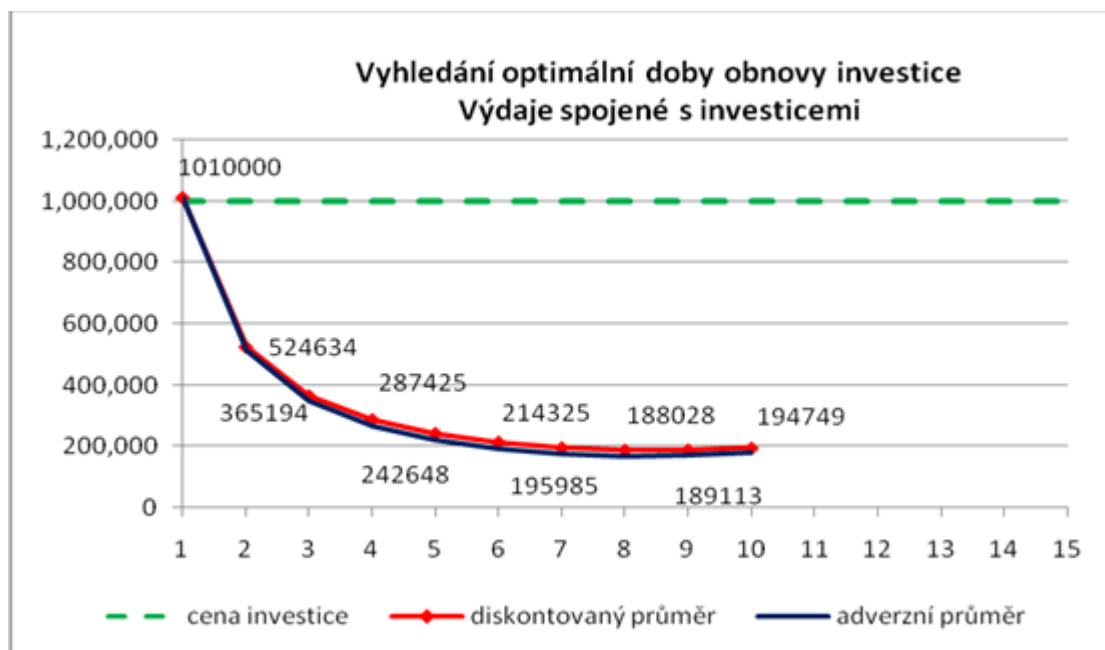
Hodnoty, jejichž vývoj v čase sledujeme, jsou hodnoty výdajů spojených s investicí, tj. v našem případě v prvním období pořizovací cena investice a v dalších obdobích výdaje na její údržbu. K většímu zohlednění faktoru času použijeme k přepočtu budoucích hodnot na současnou hodnotu metodu diskontování. Hodnoty adverzního i diskontovaného adverzního průměru jsou uvedeny v příložené tabulce (Tab. 1).

Tab. 1: Příklad výpočtu hodnot adverzního průměru

<i>Období</i>	<i>náklady na opravy</i>	<i>výdaje celkem</i>	<i>diskontní sazba</i>	<i>adverzní průměr</i>	<i>adverzní průměr diskontovaný</i>

1	10,000	1,010,000	1	1010000	1010000
2	15,000	15,000	0.952380952	512500	524634
3	22,000	22,000	0.907029478	349000	365194
4	30,000	30,000	0.863837599	269250	287425
5	40,000	40,000	0.822702475	223400	242648
6	50,000	50,000	0.783526166	194500	214325
7	65,000	65,000	0.746215397	176000	195985
8	120,000	120,000	0.71068133	169000	188028
9	200,000	200,000	0.676839362	172444	189113
10	260,000	260,000	0.644608916	181200	194749

Obrázek 3 znázorňuje graficky vývoj hodnot adverzního průměru a jeho diskontované hodnoty (pro zvolenou diskontní sazbu 5%).



Obr. 3 Odvození optimálního termínu obnovy investice metodou adverzního průměru

Pro náš příklad je tedy optimální dobou obnovy zařízení 8. rok.

#### 4.2 Finanční hledisko obnovy investice

Doba daňového odepisování je pro každý typ investice předepsána, podnik volí pouze mezi lineárním a rovnoměrným typem odpisu. Pokud je doba technické životnosti zařízení delší než doba daňového odpisu, může podnik uvažovat o trvání provozu strojního zařízení. Doba provozu zařízení by neměla být kratší než doba daňového odpisu a také ne delší, než je jeho předpokládaná technická životnost. Vzniká tak prostor pro volbu optimální doby náhrady investice a jeho ekonomické životnosti.

Z finančního hlediska souvisí obnova investice především s její reprodukcí, tj. v dlouhodobém časovém horizontu s opakovaným vynakládáním financí na náhradu vyřazeného zařízení. Při plánování příštích vydání můžeme počítat s inflací, která představuje navýšení ceny pořizované investice a také s diskontní sazbou, pomocí níž převedeme finanční dopady rozhodnutí s delším časovým horizontem na současnou platformu. S odepisováním investice souvisí dále ještě tzv. odpisový daňový štít, který představuje z finančního hlediska státem poskytovanou úlevu na daních. Tato úleva se počítá z hodnoty odpisů stanovenou procentní sazbou. V každém případě pak tedy pro podnik představuje finanční „dotaci“, kterou mu investice přináší.



Pokud odhlédneme od dalších výdajů, které jsou s investicí v době jejího využívání spojeny (náklady na spolehlivost provozu příslušného strojního zařízení), potom cena investice a odpisový daňový štít jsou základními veličinami, které představují v časovém horizontu technické životnosti zařízení finanční zatížení podniku s tímto zařízením spojené.

#### Příklad odvození doby obnovy investice z finančního hlediska

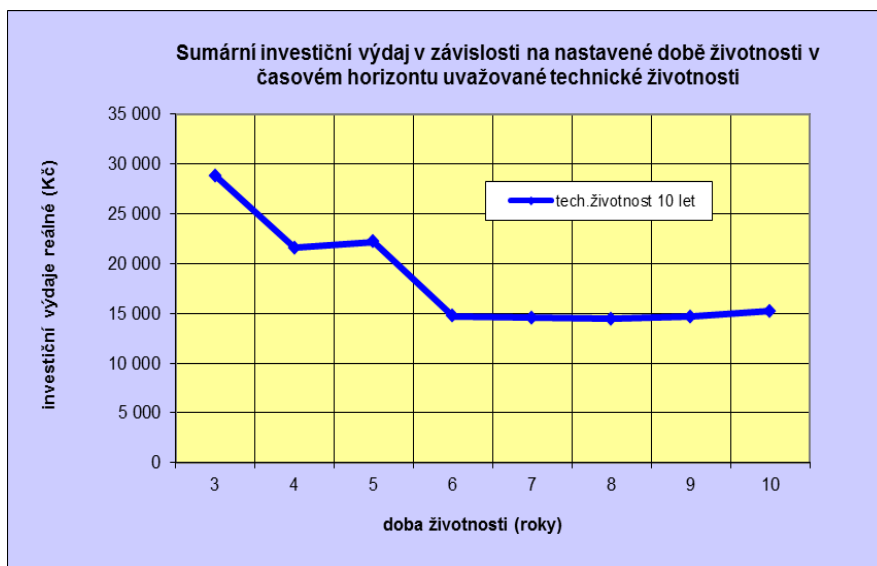
Finanční pohled na odvození optimální doby náhrady investice dokumentujeme příkladem strojního zařízení s předpokládanou dobou technické životnosti 10 let a s předepsanou dobou daňového odepisování stanovenou na 3 roky. Pořizovací cena investice je 10 mil. Kč. Hypotetický příklad počítá s daňovou sazbou 21%, předpokládanou inflací 2,5% a diskontní sazbou 5%. Výchozí tabulku kalkulace výdajů pro alternativy doby obnovy investice 3 až 10 let dokumentuje tabulka č.2.

Tab. 2: Postup odvození optimální doby obnovy investice

Doba odepisování	3	roky											
Daňová sazba	0,21												
Pořizovací cena	10 000	mil.Kč											
Inflační koeficient	0,0250												
Diskontní sazba	0,0500												
Zahrnutí vlivu inflace	1	ano/ne											
Zahrnutí diskontování	1	ano/ne											
<b>diskontní faktor</b>	1,00000		0,95238	0,90703	0,86384	0,82270	0,78353	0,74622	0,71068	0,67684	0,64461	0,61391	
<b>Inflační koeficient</b>	1,00000		1,02500	1,05063	1,07689	1,10381	1,13141	1,15969	1,18869	1,21840	1,24886	1,28008	
<b>Investiční výdaj</b>													
rok pořízení	doba provozu	technická životnost	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	3	10	10 000	0	0	9 303	0	0	8 654	0	0	8 050	0
1	4	10	10 000	0	0	0	9 081	0	0	0	8 247	0	0
1	5	10	10 000	0	0	0	0	8 865	0	0	0	0	7 859
1	6	10	10 000	0	0	0	0	0	8 654	0	0	0	0
1	7	10	10 000	0	0	0	0	0	0	8 448	0	0	0
1	8	10	10 000	0	0	0	0	0	0	0	8 247	0	0
1	9	10	10 000	0	0	0	0	0	0	0	0	8 050	0
1	10	10	10 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7 859

Pokud do kalkulace zahrneme vliv inflace a počítáme s diskontováním finančních toků, vychází optimální doba náhrady investice na 8. rok s minimální celkovou hodnotou předpokládaných výdajů spojených s investicí.

Graf vývoje sumární hodnoty výdajů na investici pro uvažované varianty obnovy investice při zadané úrovni vstupních hodnot kalkulace uvádí následující graf. Je zřejmé, že po zahrnutí nákladů na údržbu zařízení, případně dalších údajů spojených s financováním investice, můžeme dojít k odlišnému výsledku. Základní finanční kalkulaci, jak je ilustrována v příložených tabulkách, je vhodné doplnit podrobnější analýzou citlivosti ke zjištění reakce sestaveného modelu na hodnoty vstupních parametrů (daňová sazba, inflační koeficient, diskontní faktor ad.).



Obr. 4 Graf hodnot výdajů na obnovu investice pro varianty obnovy

## 5. Vyvolané náklady údržby

K určení efektivního systému s efektivní mírou údržby výrobního systému a jeho komponent může sloužit vyčíslení ekonomických ztrát, které jsou s výpadkem jednotlivých prvků výrobního systému spojeny a následně zajistit zálohování přednostně těch složek systému, jejichž výpadek představuje ztráty nejvyšší.

Výpadek činnosti dílčích provozních souborů výrobního systému znamená v každém případě narušení standardního provozu a vyžaduje operativní rozhodnutí o řešení situace: využití rezervních kapacit výrobní soustavy k náhradě výpadku, výrobu alternativní produkce, uložení meziprojektu, atd. V zavedených systémech jsou tyto náhradní scénáře většinou definovány a provozní management je s nimi dobře obeznámen.

Ekonomika spolehlivosti provozovaných technologických zařízení generuje v podstatě dvě kategorie nákladů – náklady na preventivní údržbu a náklady údržby po poruše. Pokud dojde následkem zásahu údržby k výpadku produkce, bude celková ekonomická bilance doplněna ztrátami souvisejícími se snížením produkce, s náklady provozu náhradních technologických alternativ ev. dalšími náklady, které řadíme do skupiny tzv. vyvolaných nákladů. Většina položek vyvolaných nákladů má charakter ekonomických ztrát. Do této kategorie nákladů je možné zahrnout:

- náklady způsobené ztrátou produkce;
- náklady na zajištění alternativní služby;
- náklady na odstranění případných škod na lidském zdraví, majetku, přírodním prostředí,
- vyplacenými penále za nedodržení odběratelsko – dodavatelských závazků,
- vyplacenými penále nebo pokutami za porušení předepsaných norem a limitů znečištění,
- případně dalšími nákladovými položkami.

Kromě toho mohou vzniknout náklady nepříznivého dopadu na společnost, na její dobré jméno a prestiž, což posléze může vést ke ztrátě zákazníků. Kvantifikace těchto nákladů je poněkud obtížná. V tomto směru lze využít odhady odvozené z nákladů na propagaci a nákladů na marketingové úsilí, případně nákladů na kompenzace a náhrady. V každém případě je však potřebné s těmito náklady pokud možno počítat.

S problémem kvantifikace ekonomických ztrát souvisí skutečnost, že jednotlivé ztráty nemusí nastupovat současně, ale tvoří jistou, pro každý případ specifickou časovou posloupnost následků, v závislosti na délce výpadku. Důležitým aspektem hodnocení ekonomických ztrát při selhání systému je proto časový faktor. Zatímco náklady odstranění výpadku provozního zařízení nastupují bezprostředně po vzniku poruchy, ekonomická ztráta na produkci se projeví až tehdy, když dobu výpadku nelze nahradit z kapacitních rezerv zařízení, realizací náhradní produkce, případně jinými vhodnými postupy. K rozhodování o závažnosti selhání jednotlivých komponent výrobního systému

je tedy potřebný nejenom údaj o výši potenciální ekonomické ztráty, ale také údaje o jejím dynamickém vývoji.

### 5.1 Příklad výpočtu ztrát při výpadku produkce

Určujícím kritériem rozhodování o prioritách jednotlivých technologicky přípustných scénářů řešení výpadků jednotlivých segmentů výrobní soustavy, a v konečném důsledku o zálohování určujících prvků systému, je ekonomická ztráta, která je s výpadkem jednotlivých provozních souborů spojena a ekonomické důsledky jejich případného déletrvajících vyřazení z provozu.

Pokud dojde k výpadku produkce (výpadek může teoreticky souviset nejen s poruchou, ale také s plánovanou údržbou), bude celková ekonomická bilance doplněna ztrátami souvisejícími se snížením produkce, případně náklady provozu náhradních technologických alternativ. V tomto ohledu nás zajímají především dopady selhání zařízení, tj. případné ekonomické ztráty při výpadku provozu a jejich kvantifikace, které jsou určujícím údajem při hledání vhodných preventivních opatření.

Výpadek činnosti dílčích provozních zařízení výrobního systému znamená v každém případě narušení standardního (plánovaného) provozu a vyžaduje operativní rozhodnutí o řešení vzniklé situace včetně možných alternativ náhradního provozu soustavy k náhradě výpadku, výrobu alternativní produkce atd. V zavedených systémech jsou tyto náhradní scénáře většinou definovány a provozní management je s nimi dobře obeznámen.

Základním metodickým krokem řešení uvedené problematiky je volba způsobu vyčíslení ekonomické ztráty jako následku výpadku provozního souboru. Celkově lze definovat dva typy ztrát.

První typ ztráty souvisí s omezením celkového objemu zpracovávané produkce. To se projeví v konečném důsledku ztrátou (změnou) marže odpovídající poklesu produkce. Tento typ ztráty může být proto ekonomicky vyjádřen hodnotou marže sníženého výkonu výrobní soustavy.

Druhý typ ztráty souvisí s realizací náhradního výrobního programu. Ekonomická ztráta v tomto případě vychází z kalkulace nákladů realizace dodatečného výkonu náhradní provozní jednotky, případně z rozdílu cen plánovaného a alternativního produktu.

Další premisou kalkulace výrobní ztráty je určení časového horizontu výpadku. Je zřejmé, že s trváním výpadku výrobní jednotky se může ekonomická ztráta měnit (omezující podmínky provozu technologických alternativ, kapacita úložišť pro uložení meziprojektu ad.). Tím se rozumí, že možný výpadek uvažovaných provozních souborů i ekonomická ztráta s tím související jsou posuzovány s ohledem na tento časový horizont. Vyčíslení ekonomické ztráty z výpadku výroby je tudíž dynamickým procesem.

Na základě definovaného přístupu lze formulovat metodický postup kvantifikace ekonomických ztrát z výpadku jednotlivých provozních jednotek výrobní soustavy, který spočívá v následujících krocích:

1. krok: Definice základních provozních jednotek výrobního systému a zadání jejich charakteristik.
2. krok: Definice alternativních provozních scénářů při výpadku každé provozní jednotky a určení jejich charakteristik (instalovaný výkon, rezervní kapacita).
3. krok: Kvantifikace maximálně přípustné doby výpadku každé provozní jednotky s ohledem na vymezený časový interval.
4. krok: Kvantifikace ekonomické ztráty při výpadku každé provozní jednotky v časovém vývoji.

Alternativní provozní scénáře zahrnují informace o:

- možnosti využití vlastní rezervy výkonu provozního souboru ve vymezeném časovém horizontu,
- možnosti uložení vstupního produktu provozního souboru v záložním úložišti (s udáním jejich výčtu a využitelné kapacity),
- možnosti náhrady výpadku zvýšením výkonu náhradního provozního souboru v rozsahu jeho výkonnostní rezervy dané realizačním plánem.

Východiskem ke kvantifikaci maximálně přípustné doby výpadku (v rámci vymezeného období, např. měsíce, čtvrtletí ad.) pro každý provozní soubor (dále PS) jsou následující údaje:

- Rezervní výkon provozního souboru odvozený z instalovaného výkonu a realizačního plánu výkonu.
- Rezervní výkon náhradního provozního souboru (provozní alternativy).

- Kapacita disponibilních záložních úložišť umožňujících dočasné uložení vstupního produktu provozního souboru.

Maximální přípustná doba výpadku PS bude záviset na rezervě výkonu PS a bude určena s ohledem na splnění požadovaného výkonu v rámci vymezeného časového horizontu.

Ekonomická ztráta bude záviset na druhu výrobního zařízení a jeho významnosti ve výrobním systému, na technologickém scénáři řešení výpadku zařízení (jeho nahraditelnosti a zastupitelnosti) a na délce provozního výpadku zařízení. Vyjádření ekonomické ztráty se pak liší pro každé výrobní zařízení a je určeno specifickým scénářem řešení výpadku zařízení (marže výkonu, rozdíl cen produkce ad.).

## 5.2 Vyvolané náklady údržby – environmentální náklady

Metody užívané pro stanovení vyvolaných nákladů spojených s ochranou lidského života a zdraví jsou primárně dané platnou legislativou ČR. Sekundárně pak vstupují do hodnocení skrze nadnárodní společnosti praktiky založené na zahraniční legislativě, nebo přímo na vnitřních organizačních předpisech.

Níže uvedená obecná struktura nákladů nezohledňuje dopady na jednotlivé účastníky. Dostupnost zdrojových dat pro jednotlivé položky je zde diskutována s ohledem na využitelnost pro potřeby řízení spolehlivosti a rizik v průmyslu.

- A) Problematika odhadu hodnoty lidského života a zdraví z pohledu řízení spolehlivosti a rizik v průmyslu

Náklady a ztráty jsou rozčleněny podle druhu následků pro:

- a. těžká zranění,
- b. lehká zranění.

### 1. Přímé náklady

#### 1.1 Náklady na zdravotní péči

- rychlou zdravotnickou pomoc na místě nehody včetně převozu
- ústavní nemocniční péči
- následnou ambulantní lékařskou péči a rehabilitaci

#### 1.2 Administrativní náklady

##### 1.2.1 Policie

##### 1.2.2 Arbitráž, Soudy

### 2. Nepřímé náklady

2.2 Sociální výdaje (je třeba vycházet ze stávajících platných předpisů o nemocenském a důchodovém pojištění - dávky nemocenského pojištění, vdovské a vdovecké důchody, sirotčí důchody, invalidní důchody).

Další výdaje, které lze z pohledu podniku očekávat, jsou upraveny právními normami. Zde je opět nutné zahrnout administrativní náklady. Jedná se o následující položky:

1. Náhrady a kompenzace újmy na zdraví v zaměstnání
2. Odškodnění bolesti a ztížení společenského uplatnění
3. Pokuty za porušení bezpečnosti práce

B) Škody způsobené na dalších složkách životního prostředí

- 1) Náklady likvidace odpadů resp. nebezpečného odpadu
- 2) Pokuty při překročení limitů vypouštění odpadních vod
- 3) Pokuty při překročení emisních limitů

C) Externality

Ztráty způsobené dalším výrobním subjektům

#### Úhrady zdravotní péče

Aktuální odhady celkových nákladů a ztrát jsou stále významně ovlivněny omezeným zpracováním analytických dat v rámci odpovědných institucí:

“V tomto případě jde o značně komplikovaný odhad, protože Ministerstvo zdravotnictví, ani ÚZIS nemá k dispozici údaje o nákladech na zdravotní péči v případech pracovních úrazů či

nemocí z povolání. Ani Všeobecná zdravotní pojišťovna a ostatní pojišťovny provozující veřejné zdravotní pojištění tyto náklady odděleně nesledují.” (Ronin, 2010)

„Náklady na náhrady za pracovní úrazy a nemoci z povolání jsou vyplácené podle příslušných paragrafů zákoníku práce buď přímo zaměstnavatelem (§ 366 až 393 zákoníku práce), nebo uhrazené příslušnou pojišťovnou provozující zákonné pojištění odpovědnosti zaměstnavatele za škodu při pracovním úrazu nebo nemoci z povolání (§ 365 zákoníku práce a vyhlášky Ministerstva financí č. 125/1993 Sb., ve znění pozdějších předpisů).“ Grandeová (2009).

Od roku 2005 ČSÚ v rámci harmonizace statistického vykazování pro Eurostat uvádí v publikaci Pracovní neschopnost pro nemoc a úraz v České republice náhrady nákladů spojených s léčbou zaměstnance podle § 369 c) ZP, ale vzhledem k nízkým hodnotám tam uvedených (v roce 2006 to bylo 5 193 096 Kč, v roce 2007 4 796 678 Kč a v roce 2008 7 597 172 Kč) jde s největší pravděpodobností o náklady, které byly zaměstnavatelům reálně účtovány pouze za část případů léčby pracovních úrazů nebo nemocí z povolání.

Dle předpokladů SÚIP větší část případů léčby pracovních úrazů se pravděpodobně nepromítne v přímých nákladech zaměstnavatele, a tím pádem i ve statistikách ČSÚ. Tato léčba je hrazena přímo ze zdravotního pojištění, ovšem na platbách tohoto pojištění se podílí poměrnou částí pojistného hrazeného za zaměstnance i zaměstnavatele, takže je vhodné zahrnout do nákladů zaměstnavatelů odhadnutou částku za léčbu následků všech případů následků pracovních úrazů a nemocí z povolání. Z tohoto důvodu musely být tak jako v minulých letech použity jiné, méně spolehlivé zdroje informací.

### Náklady na BOZP

V letech 2005-2009 proběhlo hned několik unikátních projektů, které opět umožnily blíže a přesněji zanalyzovat náklady a ztráty spojené s BOZP. Přesto všechno jsou výsledné údaje zatíženy vysokou dávkou nejistot a do analýz vstupují z velké části kvalifikované odhady. Evropské trendy posledních let nepřináší nové metody a postupy, ale zpřesňují a doplňují postupy staré (HSE, 2008) a na základě kontinuálních výstupů z předešlých analýz vytváří preventivní programy na míru.

Tabulka 3: Průměrné náklady na jeden případ pracovního úrazu a nemoci z povolání dle SÚIP

SÚIP Průměrné náklady na pracovní úraz a nemoc z povolání včetně nevytvořeného HDP v letech 2004 - 2008 v Kč					
průměrné náklady na	2004	2005	2006	2007	2008
1 Prac.Úraz (obecně)	291,074 Kč	294,369 Kč	321,049 Kč	298,572 Kč	322,498 Kč
1 Prac. Úraz ostatní	266,562 Kč	271,564 Kč	301,044 Kč	271,348 Kč	291,302 Kč
1 Prac.Úraz smrtelný	10,974,246 Kč	11,702,622 Kč	10,787,070 Kč	11,513,743 Kč	13,071,159 Kč
1 Nemoc z Povolání	3,122,816 Kč	3,268,688 Kč	4,011,540 Kč	4,440,808 Kč	4,304,809 Kč

Zdroj: Ronin, 2010

Některé zdroje uváděly velmi hrubé odhady nákladů na některé druhy úrazů. Tyto hrubé orientační údaje nemohly být bez výhrad použity, ale pouze potvrdily možnost substituce průměrné výše náhrady (regresu), odvozené od promilového vzorku, za neexistující relevantní údaje o průměrných nákladech. (Ronin, 2010).

Statistiky ČSÚ lze tak považovat za dolní hranici nákladů. Šetření metodikou ESAW je primárně uplatňováno pro potřeby mezinárodního srovnávání a její výstupy mají omezené uplatnění pro podrobnější analýzy systému, především úhrad zdravotní péče v podmínkách ČR.

Aktualizovat celkové hodnoty spojené s pracovními úrazy s využitím metodiky CDV lze od roku 2005 pouze omezeně, snahu co nejpřesněji analyzovat a celkově podchytit náklady v oblasti BOZP převzal VÚBP ve spolupráci s ČSÚ v rámci harmonizace vykazování statistických údajů o pracovních úrazech pro Eurostat. Zvláštní statistické šetření ČSÚ o nákladech zaměstnavatele a zraněné osoby v důsledku pracovního úrazu proběhlo v roce 2007. Snaha doplnit chybějící údaje o ekonomickém dopadu pracovních úrazů na zaměstnavatele představuje v rámci ČR unikátní projekt.

V souvislosti s dalším ukončeným projektem VÚBP jsou dále k dispozici podklady pro vyčíslení tzv. lidských nákladů, které jsou sledovány v kontextu subjektivního vnímání rizika na pracovišti. Celkový trend ve vyčíslování ztrát souvisejících s poškozením zdraví se ubírá směrem k analytickému vyjádření a klasifikaci dle zodpovědnosti a příjemce ekonomické újmy ve snaze omezit výskyt externalit.

#### Hodnota statistického života (Value of Statistical Life)

V průběhu let 2005 – 2007 proběhlo v České republice několik významných studií zabývajících se oceňováním rizik na pracovišti. (Ščasný, Urban, 2007a,b) v rámci projektu „Svět práce a kvalita života“. Obdobné studie jsou běžně používány v anglo-saských zemích pro monetární vyjádření přínosů programů BOZP. Studie vstupují do výpočtů jako tzv. „lidské náklady“. Použité přímé i nepřímé metody zjišťování hodnoty změny rizika poškození zdraví jsou mezi odborníky neustále diskutované, avšak dosažené výsledky jsou srovnatelné s obdobnými studiemi v zahraničí. Metoda podmíněného hodnocení zjišťuje ochotu přijmout kompenzaci za práci v rizikovějším prostředí. Z takto stanovených preferencí je pak dále dopočítávána hodnota statistického života. Tato metoda obecně dosahuje nejvyšších hodnot VSL.

Metoda Hedonické mzdy naopak sleduje, jak se mění výše mzdy v závislosti na objektivním riziku poškození zdraví pro dané povolání nebo odvětví. Z rozdílů mezd pak tato metoda umožní dopočítat, jakou výši VSL trh práce nepřímo nastavil. Vzhledem k tomu, že do tvorby mezd vstupuje v podmínkách ČR celá řada faktorů nezávislých na objektivním riziku poškození zdraví, má tato metoda pro potřeby této studie omezenou vypovídací schopnost. Při studii využívající metodu Hedonické mzdy je vedle oceňování objektivního rizika skrze mzdy sledováno i subjektivní vnímání rizika samotných zaměstnanců. V případě studie v ČR je subjektivní vnímání rizika na pracovišti zaměstnanci značně podceňované. Výsledky z výše zmíněných studií, jsou seříděny v Tabulce 4.

Tabulka 4: VSL v ČR a Polsku

Oceňování rizika úrazu v pracovním prostředí v ČR a Polsku				
	stř. hodnota (v mil.€)	odhad		poznámka
		v mil.€	v mil. Kč	
VSL CVM (WTA) (COŽP UK 2007)	10.7		303.238	ochota přijmout kompenzaci
VSL hedonická mzda (COŽP UK 2007)		8.7	246.558	wage differentials
		1.96	55.5464	subjektivní oceňování rizika
Giergiczny (2006)		2.26	64.0484	pouze dělnické profese

Zdroj: Ščasný, Urban (2007a)

#### Tržní metody oceňování statků životního prostředí

Analogicky s principy oceňování lidského života a zdraví pro potřeby řízení spolehlivosti a rizik je i oceňování environmentálních statků především dáno platnou legislativou ČR.

Jak uvádí Šauer (Šauer a kol., 1997), ocenění zásob přírodních aktiv na základě jejich skutečných tržních cen je možné jen ve velmi málo případech. Podmínkou zjištění této ceny je, aby transakce na trhu byly natolik reprezentativní, aby bylo možné využít cenu pro ocenění zásob. Protože však většina statků poskytovaných životním prostředím tuto podmínku nesplňuje, nejsou pak ani dále zahrnovány do systému národních účtů (SNA, System of National Accounts). Kromě toho existuje řada případů, kdy statek je na trhu obchodován a má tedy svou tržní cenu, ale tato cena neodpovídá realitě, neboť v ní nejsou internalizovány všechny aspekty čerpání, jako je to např. u neobnovitelných přírodních zdrojů

V současnosti jsou metody oceňování a ceny vybraných statků životního prostředí regulovány státem. Např. dle § 33 odst. 1 zákona č. 151/1997 Sb., o oceňování majetku (dále jen „zákon o oceňování majetku“), ve znění zákona č. 121/2000 Sb., jsou dále upravovány vyhláškami, kde jsou taxativně vymezeny ceny a způsob jejich stanovení a např. dle 540/2002 z 10.12. jsou přímo upraveny ceny pozemků. Zákon se nevztahuje na oceňování přírodních zdrojů, vyjma lesů.

Praktické oceňování pak provádí soudní znalci v oboru životního prostředí se specializací např. ekologie a ochrana životního prostředí.

Problematikou integrace hodnoty statků životního prostředí do SNA by měla do budoucna řešit implementace Systému environmentálního a ekonomického účetnictví (SEEA, System of Environmental and Economic Accounts). V současnosti jsou metody oceňování a ceny vybraných statků životního prostředí regulovány státem. Např. dle § 33 odst. 1 zákona č. 151/1997 Sb., o oceňování majetku (dále jen „zákon o oceňování majetku“), ve znění zákona č. 121/2000 Sb., jsou dále upravovány vyhláškami, kde jsou taxativně vymezeny ceny a způsob jejich stanovení a např. dle 540/2002 z 10.12. jsou přímo upraveny ceny pozemků. Zákon se nevztahuje na oceňování přírodních zdrojů, vyjma lesů. Praktické oceňování pak provádí soudní znalci v oboru životního prostředí se specializací např. ekologie a ochrana životního prostředí.

## 6. Závěr

Závěrem je třeba zdůraznit nezbytnost použití ekonomických nástrojů v problematice řízení spolehlivosti výrobních systémů. Pouze tyto nástroje dokážou vymezit období jeho efektivní – ekonomické životnosti a připravit kvalifikované podklady pro rozhodování o efektivní údržbě. Zároveň ale platí, že kvalita a věrohodnost získaných výsledků je přímo úměrná kvalitě, věrohodnosti a komplexnosti použitých údajů, zejména údajů o nákladech údržby a jejich dynamice v souvislosti se stářím zařízení a o rizicích, souvisejících s možným selháním systému.

### Literatura a zdroje:

ČSÚ (2010). Pracovní neschopnost pro nemoc a úraz v České republice. Dostupné z <[http://www.czso.cz/csu/2010edicniplan.nsf/publ/3305-10-1\\_pololeti\\_2010](http://www.czso.cz/csu/2010edicniplan.nsf/publ/3305-10-1_pololeti_2010)>, cit. [02-11-2010]

GRANDEOVÁ, V. (2009), Výsledky zpracování statistického šetření o nákladech zaměstnavatele a zraněné osoby v důsledku pracovního úrazu. Bezpečnost a hygiena práce, 2009, č. 3-4. ISSN: 0006-0453.

HSE - Health and Safety Executive (2008). Economic Analysis Unit (EAU) appraisal values. Dostupné z <<http://www.hse.gov.uk/economics/eauappraisal.htm>>, cit. [02-11-2010]

RONIN, M. (2010) Sociálně ekonomické dopady pracovních úrazů. 33. konzultační den: Pracovní lékařská péče a nemoci z povolání. Praha, 2010. Dostupné z :<<http://www.szu.cz/kalendar/centrum-pracovniho-lekarstvi>>, cit. [03-11-2010].

ŠAUER, P. a kol. Úvod do ekonomiky životního prostředí. Praha 1997. ISBN 80-7079-548-4

ŠČASNÝ, M., URBAN, J. (2007a), Estimation of wage differential for the Czech Republic: Hedonic wage model testing on three datasets. Paper presented at the 15th Annual EAERE Conference, University of Macedonia Thessaloniki, Greece, 27-30 June 2007.

URBAN, J., ŠČASNÝ, M. (2007b). "Value of work safety: application of CV method to value effects of fatal injuries on wellbeing of economic active population of the Czech Republic." Příspěvek na konferenci Svět práce a kvalita života v globalizované ekonomice, VŠE, 13.-14.9.2007.

### Literatura a zdroje:

Tato práce byla vytvořena v rámci projektu výzkumu a vývoje č. 1M06047 „Centrum pro jakost a spolehlivost výroby“ podporovaného MŠMT ČR.

Použité zkratky:

BOZP Bezpečnost a ochrana při práci

CDV Centrum dopravního výzkumu

COŽP UK Centrum pro otázky životního prostředí Univerzity Karlovy

CVM Contingent Valuation Method

ČSÚ Český statistický úřad

ESAW European Statistics on Accidents at Work (EU)

HSE UK Health and Safety Executive United Kingdom

SÚIP Státní úřad inspekce práce

VÚBP Výzkumný ústav bezpečnosti práce

VSL Value of Statistical Life

WTA Willingness To Accept

ZP Zákoník práce



# OPTIMALIZACE ÚDRŽBY SYSTÉMU „*k-out-of-n*“ ZALOŽENÁ NA NÁKLADECH MAINTENANCE OPTIMISATION OF “*k-out-of-n*” SYSTEM BASED ON COSTS

doc. Ing. David VALIŠ, Ph.D.

Univerzita obrany  
Fakulta vojenských technologií  
Kounicova 65, 662 10 Brno  
e-mail: david.valis@unob.cz

## Abstract:

Author is identifying a weakness just in the field of assessment and evaluation of diagnostic measurement regarding optimisation of diagnostic signals for maintenance (replacement). These quantities (signals) are the base for dispositional (residual) operating time (for predictive maintenance) determining which is the way to operating dependability growth. Goal of author is to find an objective stochastic method of the diagnostic signal determining for maintenance (replacement) illustrated on an example.

## 1. Úvod

Doposud již bylo vyrobeno mnoho složitých technických systémů s mnoha subsystemy a prvky. Některé z nich jsou nazývána jako systémy s mnohými komponentami. To znamená, že systém sestává z vícero identických subsystemů nebo komponent organisovaných ve struktuře. Z pohledu bezporuchovosti využíváme mnohé metody pro posuzování základních ukazatelů těchto systémů. Tyto metody jsou obvykle doplněny spojením *k-out-of-n* nebo *m-good-of-n*.

V literatuře nalezneme mnoho příspěvků, knih a publikací, které se těmito typy systémů a posuzováním jejich bezporuchovosti zabývají. Některé příspěvky se soustřeďují například na ukazatele bezporuchovosti těchto systémů (např. Barlow, R.E. & Proschan, F. 1975, Belfore, L.A. 1995, Boedigheimer, R.A. & Kapur, K.C. 1994, Gurler, S. & Bairamov, I. 2009, Chen, Y. & Yang, Q. 2005, Myers, A. 2008, Tian, Z & Richard, Y.C.M. & Ming, J.Z. & Huang, H. Z. 2008, aj.) některé spíše na posuzování bezporuchovosti počítačových systémů (např. Sevcan, D. 2009).

Některé současné práce se ale navíc zabývají přístupem posuzování bezporuchovosti za využití multi stavového přístupu nebo analýzy scénářů (např. Heidtmann, K.D. 1982, Huang, J. & Zuo, M.J. & Wu, Y.H. 2002, Huang, J. & Zuo, M.J. 2002, Koutras, M.V. 1996, Zuo, M.J. & Huang, J. & Kuo, W. 2003, Xiao, G. & Li, Z. 2008, aj.).

Lze ovšem nalézt rovněž výsledky, které se zabývají posuzováním pohotovosti těchto specifických systémů (např. McGrady, P.W. 1985, aj.).

Nicméně, velmi málo výsledků je možné nalézt v oblasti údržby a posuzování udržitelnosti těchto specifických systémů. Můžeme nalézt několik specifických přístupů orientovaných na specifické okrajové podmínky například v knize Wang H. & Pham H. 2006. Některé informace a náměty z této publikace jsou uvedeny níže. Nicméně je častěji vyžadováno, abychom měli k dispozici detailnější specifikaci podmínek, když je prováděn údržbový zásah.

Ačkoliv existuje několik přístupů pro údržbové intervaly a rozsahy specifikací pro systémy *k-out-of-n*, tyto nejsou vždy zcela dostatečné. Většina z nich je založena na stavu systému, zpravidla na počtu porouchaných komponent. Nejčastěji používané typy přístupů údržby u těchto typů systémů jsou uvedeny v následující kapitole.

Námi prezentovaný údržbový přístup je však odlišný. Posuzujeme náklady-ztráty/zisky spolu s výkonností systému v různých možných scénářích. Z tohoto důvodu nám dvojrozměrná charakteristika systému umožňuje modifikovat postupy údržby v dynamickém režimu. Dynamicky je v tomto případě myšleno to, že je údržbový zásah proveden v okamžiku, kdy je skutečně vyžadován. Vyžadován v tomto případě znamená náklady a výkonnost. Toto je hlavní myšlenkou



příspěvku, na které je vlastně založen, ačkoliv pojednáváme a zohledňujeme i ostatní zavedené a známé přístupy.

V tomto příspěvku je systém  $G$ :  $k$ -out-of- $n$  stanoven jako ucelený systém s  $n$  nezávislými subsystémy tak, že systém funguje tehdy a pouze tehdy, pokud úspěšně funguje alespoň  $k$  těchto subsystémů/komponent. Pravděpodobnost bezporuchového provozu systému s identickými jednotkami má následující podobu:

$$R_S = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i} = \sum_{i=k}^n \frac{n!}{i! \cdot (n-i)!} \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i} \quad (1)$$

kde  $p$  je pravděpodobnost poruchy subsystému.

Pro složité, unikátní a/nebo drahé systémy, které pracují v sekvenčním režimu a jsou součástí výrobní linky, není příliš rozumné zaměřovat systém, pokud se jedna komponenta systému porouchá. Toto platí speciálně pro systémy typu  $k$ -out-of- $n$ .

Takovéto poruchy systému jako celku mohou snížit celkovou úroveň výkonnosti systému. Nicméně dokud je v systému méně poruch než  $k$ , celý systém může fungovat.

Systém se navrátí do provozu obnovou, pokud je porouchaná komponenta nahrazena. V praxi samozřejmě existuje více možností, jak může být systém opraven – navrácen zpět do použitelného stavu:

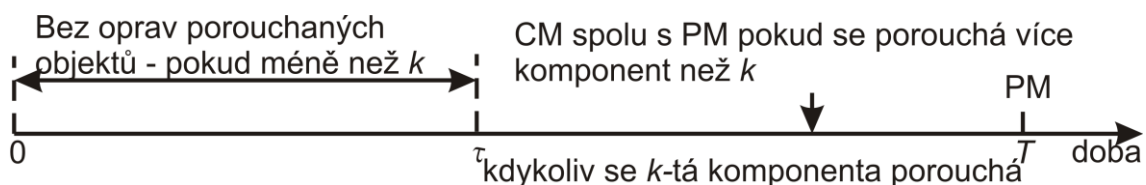
- porouchaný subsystém- jednotka může být vyměněna za novou;
- porouchaná jednotka může být renovována nebo nahrazena za použitou ale fungující.

Nicméně takový údržbový zásah neobnoví systém zcela, ale dovolí systému další provoz (Kapur *et al.* 1989). Navíc systém se v průběhu času dále opotřebovává. S ohledem na všechny výše uvedené skutečnosti je nutné, aby se v určitých časových bodech uskutečnila dobře provedená a plánovitá preventivní údržba (PM – Preventive Maintenance). Proto byly specifikovány některé části politik údržby pro systémy  $k$ -out-of- $n$  např. Wang and Pham 2006, p. 161-180. Ačkoliv ne všechny tyto principy jsou plně použitelné v našem případě, přičemž dále využíváme pouze některé fragmenty specifikovaných předpokladů. Nový systém začíná svůj provoz zpravidla v okamžiku „0“. Poruchy komponent v systému během časového intervalu  $(0, \tau)$  jsou buď ponechány bez povšimnutí, nebo bezodkladně odstraněny. Toto je dáno našimi momentálními možnostmi, situací ve vztahu k okamžitému stavu systému a především ve vztahu k celkovému počtu porouchaných komponent. Pokud je porouchaných méně než  $k$  potom se nerealizuje žádná oprava ani údržba po poruše (CM – Corrective Maintenance) a opačně. Komponenty, které se porouchají v časovém intervalu  $(\tau, T)$  mají být opraveny bezodkladně.

Tento předpoklad platí především ve vztahu k požadavkům na námi posuzovaný systém. Údržba CM na porouchaných prvcích spolu s údržbou PM na opotřebovaných prvcích je provedena v okamžiku, kdy se porouchá  $k$ -tý subsystém z  $n$ , tehdy ale, kdy celkové odhadované finanční ztráty překročí stanovený limit. Ztráty jsou představovány především poklesem produkce výroby z důvodu prostoje plus celkové náklady na údržbu.

K takové situaci dojde, pokud se porouchá  $k$  komponent v časovém intervalu  $(0, \tau)$ , kdy je společně provedena jak údržba CM v kombinaci s údržbou PM.

Pokud se ale v časovém intervalu  $(0, \tau)$  porouchá méně než  $k$  komponent, pak je údržba typu PM provedena až v čase  $T$ . Proces se v tomto smyslu opakuje tak, jak to vyžadují podmínky. Tyto základní principy údržby jsou ilustrovány na obrázku 1. V tomto pojetí jsou okamžiky označené jako  $\tau$  and  $T$  náhodnými a zároveň rozhodovacími proměnnými. Předpokládá se, že hodnota  $k$  je daná a může být předem stanovená pozitivní hodnota. Některé zdroje užívají podobné značení. Nicméně my zde vnímáme, že platí vztah  $1 \leq k \leq n - k + 1$ , přičemž  $\tau < T$ . S ohledem na různé požadavky bezporuchovosti a s ohledem na specifické požadavky na náklady,  $k$  může nabývat různých hodnot. Ve speciálních případech, kdy  $k = 1$  znamená, že systém má podstoupit údržbu kdykoliv se jedna komponenta porouchá po okamžiku  $\tau$ .



Obr. 1 Princip deterministické politiky systémů  $k$ -out-of- $n$  údržby založené na stanovených intervalech ( $\tau$ ,  $T$ )

Jiným případem je, pokud je  $k$  zvoleno rovné výrazu  $n - k + 1$ , potom je na systému  $k$ -out-of- $n$  provedena údržba, jakmile se systém porouchá. Ve velmi mnoha případech (přičemž v literatuře se hovoří o „většině případů“) je na celém systému provedena dokonalá údržba CM a PM v případě poruchy  $k = n - k + 1$  nebo částečné poruchy. Tento předpoklad my ale zde nepřijímáme. Řídíme se předpokladem, který jednoznačně předem stanovuje hodnotu  $k$  pro počet poruch u komponent. Zde nicméně rovněž předpokládáme, že ačkoliv se některé komponenty z počtu  $n$  mohou porouchat, systém lze dále provozovat – sice s nižším výkonem, s delší dobou do splnění zadání ale přece.

Zpravidla se předpokládá, že pokud je provedena údržba CM společně s PM v předem stanoveném čase nebo s ohledem na stav systému, pak oba údržbové zásahy jsou dokonalé. To znamená, že údržba CM v kombinaci s PM vyžaduje určitý počet časových jednotek, zatímco údržba PM v čase  $T$  vyžaduje jiný počet časových jednotek. Výjimkou pro tuto politiku je, že před časovým okamžikem  $\tau$  je každá komponenta v systému tak dobrá, jako nová a nejsou vyžadovány žádné významné opravy. Významné opravy jsou prováděny pouze tehdy, pokud se porouchá předem stanovený počet komponent.

Jelikož ekonomické aspekty hrají významnou roli, stejně jako určité požadavky na pohotovost, musíme zohlednit následující. Samozřejmě, že nechceme mít buď žádnou odstávku zařízení, resp. několik málo významnějších odstávek, což by v úhrnu mělo představovat nižší náklady, přičemž celá výrobní linka bude fungovat tak, jak je vyžadováno. Nicméně stále jsme vystaveni některým omezujícím faktorům. Není možné zaměnit subsystém okamžitě, ale můžeme okamžitě zahájit údržbu CM, jakmile počet porouchaných komponent dosáhne předem stanovené hodnoty  $k$ . Ve skutečnosti ale ne vždy můžeme čekat až počet porouchaných komponent dosáhne hodnoty  $k$  a zbývající  $(n - k)$  budou degradovat a tím způsobí horší provozní podmínky, čímž nakonec rovněž potřebují buď údržbu rozsahu PM nebo přímo CM.

Z těchto všech důvodů musíme rozlišovat kdy, ve kterém časovém bodě pro  $k$  porouchaných komponent / subsystémů musí být zahájena údržba typu CM společně s PM. Předpokládáme, že dokud je  $k$  méně než  $(n - k + 1)$ , potom systém funguje na požadované výkonové úrovni a nebude odstaven z důvodu potřebné údržby CM plus PM. Ekonomickou závislostí v našem případě vnímáme skutečnost, že celkové náklady nakonec představují menší výdaje a dobu pro vykonání údržby po poruše na některých porouchaných komponentách společně s preventivní údržbou na zbývajících než při poruchách na jednotlivých komponentách zvlášť. Proto rovněž předpokládáme, že pro systém složený z více komponent, čímž systém  $k$ -out-of- $n$  bezesporu je, za předpokladu silného vlivu ekonomických aspektů, pak mají být společné údržbové zásahy zvažovány a zařazovány v předem stanovených bodech (buď s ohledem na stav systému, nebo dobu). Optimální politika údržby pro tento druh systémů představuje oportunistickou cestu, která je nazývána deterministicko-charakteristická, což znamená, že optimální zásahy údržby u jednotlivých komponent, resp. jedné komponenty, závisí na stavu ostatních (Zheng 1995).

Samozřejmě, že někdy typ údržby navržené výše není tím nejlepším, ale je oportunistický a založený na stavu systému. Za určitých okolností a okrajových podmínek může být vnímána jako optimální – adekvátní a uspokojivá.

Jak zde v tomto příspěvku, tak v jiných pracích (např. Wang and Pham, 2006) rozlišujeme následující předpoklady, které jsou obecně známé a standardní:

- Všechny poruchy musejí být nezávislé – žádná jednotlivá porucha komponenty nesmí ovlivnit poruchu jiné komponenty.
- Každá komponenta se opotřebovává a její stav se postupně zhoršuje, čímž se rovněž postupně zvyšuje intenzita poruchy (*IFR* – Increasing Failure Rate) v časovém intervalu  $(0, T)$ .
- Náklady na opravu jsou pevné bez ohledu kdy je provedena stejně jako náklady na jednu provozní jednotku za předem stanovený časový interval.
- Horizont pro plánování je nekonečný nebo censurovaný – to záleží na skutečné situaci.
- $k$ -out-of- $n$  systém sestává z  $n$  nezávisle a rovnoměrně rozmístěných komponent / jednotek independently and identically distributed (*i.i.d.* - *independently and identically distributed components*).

Dále předpokládáme, že pro každou komponentu v systému se uplatňují náklady  $c$  tak, jak je uvedeno výše. Tato obecná struktura nákladů byla využita Sheu (1991) ve studii na téma model

výměny založený na stáří. Zpravidla se uplatňuje předpoklad, že pro systém s jednotlivými jednotkami je údržba PM stanovena pouze za předpokladu IFR. Výše uvedený předpoklad, že intenzita poruchy každé komponenty je vrůstající – IFR je stále podstatný pro systémy typu  $k$ -out-of- $n$ . To platí zejména proto, že na systému může být provedena jak údržba CM a PM (ve stanoveném rozsahu) v čase  $T$  a to buď v předem stanovených intervalech nebo s ohledem na podmínky/stav/situaci. S ohledem na výše popsané skutečnosti a předpoklady, a s ohledem na výsledky učiněné Wangem and Phamem (2006) jsou níže uvedeny ty nejzajímavější typy preventivní údržby použitelné v některých případech. Jsou rovněž stručně popsány níže:

- Dokonalá preventivní údržba;
- Nedokonalá preventivní údržba – dva případy.

Kromě těchto případů existují rovněž jiné speciální případy, které nicméně bohužel nebudou pojednávány v tomto příspěvku.

## 2. Preventivní údržba

### 2.1 Dokonalá preventivní údržba

Podle Wanga a Phama (2006) jsou charakterizovány jednotlivé třídy možných údržbových zásahů. Je nutné si uvědomit, že v každém okamžiku jednotlivých politik údržby popsaných výše mohou být provedeny některé alternativní zásahy údržby systému  $k$ -out-of- $n$ . Mezi ně patří například:

- Udržet současný systém s některými porouchanými subsystemy a neprovádět žádné údržbové zásahy.
- Provedení minimálních / částečných oprav na komponentách systému (před časovým okamžikem  $\tau$ ).
- Provedení dokonalé opravy na všech porouchaných komponentách spolu s údržbou PM na všech neporouchaných ale opotřebovaných komponentách (po časovém okamžiku  $\tau$ ).
- Provedení údržby typu PM na systému v časovém okamžiku  $T$  buď pokud není porouchaný žádný subsystem nebo společně s prováděnou údržbou CM na porouchaných.
- Provedení údržby CM společně s údržbou PM buď před časovým okamžikem  $\tau$ , nebo mezi časovými okamžiky  $\tau$  a  $T$  podle počtu porouchaných komponent/subsystemů  $k$  a podle celkové výkonnosti systému – což je vlastně náš uváděný případ.

Obecně se předpokládá, že každá komponenta systému  $k$ -out-of- $n$  má kumulativní distribuční funkci (*cdf – cumulative distribution function*)  $F(x)$ , a funkci hustoty pravděpodobnosti (*pdf - probability density function*)  $f(x)$ . Potom jsou jejich intenzity poruch (resp. intenzity nebezpečí) definovány jako  $q(x) = f(x) / \bar{F}(x)$  a kumulativní intenzita poruch je potom

$Q(x) = \int_0^x q(t)dt$ , která má vztah spolu s funkcí přežití / pravděpodobnosti bezporuchového

provozu  $\bar{F}(x) = \exp\{-Q(x)\}$ , kde  $\bar{F}(x) = R(x) = 1 - F(x)$ . Dále se zpravidla / obecně dále předpokládá, že intenzita poruchy je diferencovatelná funkce, monotónně rostoucí a zůstává neporušená provedením minimální opravy.

Podle Wanga and Phama (2006) platí, že pokud se neprovádí údržba PM, je zůstatková funkce přežití / pravděpodobnosti bezporuchového provozu každé komponenty je dána následujícími vztahy

$$\bar{G}(y) = P\{Y \geq \tau + y | Y > \tau\} \quad (2)$$

$$\bar{G}(y) = \int_{\tau+y}^{+\infty} f(t)dt / \int_{\tau}^{+\infty} f(t)dt \quad (3)$$

$$\bar{G}(y) = \bar{F}(\tau + y) / \bar{F}(\tau) \quad (4)$$

$$\bar{G}(y) = e^{-Q(\tau+y)+Q(\tau)} \quad (5)$$

kde  $y \geq 0$  a  $Y$  jsou náhodné proměnné s rozdělením funkce přežití

$$\bar{G}(y)$$

Předpokládá se, že údržba PM provedená v čase  $T$  je dokonalá. V našem případě předpokládáme, že každá provedená preventivní údržba je dokonalá. Předpokládá se, že preventivní údržba je rovněž provedena na počátku celého procesu. Wang and Pham (2006) na základě teorie obnovy předpokládají, že dokonalá údržba, preventivní nebo po poruše tvoří základní cyklus obnovy. Na základě obecné teorie prosté obnovy rovněž předpokládáme, že dlouhodobé očekávané náklady na údržbu systému na jednotku času mají podobu:

$$L(\tau, T) = \frac{C(\tau, T)}{D(\tau, T)} \quad (6)$$

kde  $C(\tau, T)$  jsou očekávané náklady na údržbu systému během jednoho údržbového cyklu a  $D(\tau, T)$  je očekávaná doba cyklu obnovy.

Pokud transformujeme předpoklad, že optimální politika údržby založená na  $(\tau, T)$  je získáno řešením níže uvedené rovnice.

$$\frac{\partial L(\tau, T)}{\partial \tau} = 0 \text{ and } \frac{\partial L(\tau, T)}{\partial T} = 0 \quad (7)$$

## 2.2 Nedokonalá preventivní údržba – případ A

Podle Wanga and Phama (2006) se v části 2.1 předpokládá, že údržba PM je vždy dokonalá. V praxi to nicméně znamená, že tento předpoklad není realistický pro některé případy. Nicméně je tento předpoklad uveden do praxe a je rozdílný od předchozího tím, že údržba PM v čase  $T, 2T, 3T, \dots$  může být provedena jako nedokonalá. Po provedení preventivní údržby v předepsaných časových okamžicích některé systémy  $k$ -out-of- $n$  jsou obnoveny a jsou vlastně tak dobré jako nové s pravděpodobností  $p$  (dokonalá údržba PM) a jsou tak špatné jako staré s pravděpodobností  $q = 1 - p$  (minimální údržba PM). Podle klasické a dobře známé teorie obnovy v rámci stochastických procesů tvoří doby po sobě jdoucích dokonalých údržeb, preventivní nebo po poruše, proces obnovy a v našem případě je oportunistický / deterministický podle stavu. Podle klasické teorie obnovy jsou předpokládány dlouhodobé náklady na údržbu systému za jednotku času, resp. intenzita nákladů s parametrem  $p$  vyjádřeny:

$$L(\tau, T | p) = \frac{C(\tau, T | p)}{D(\tau, T | p)} \quad (8)$$

kde  $C(\tau, T | p)$  jak je uvedeno dříve jsou očekávané náklady na údržbu systému za jeden proces obnovy a  $D(\tau, T | p)$  je očekávaná délka / trvání procesu obnovy založená na parametru  $p$ . Optimální politika údržby založená na parametrech  $(\tau, T)$  je řízena podobnými postupy a nakonec může být dosažena s parametrem  $p$  – tato metoda je shodná s tou, která je uvedena v části 2.1.

## 2.3 Nedokonalá preventivní údržba – případ B

Podle Wanga and Phama (2006) je model v této sub-kapitole založen na předpokladu modelu uvedeného v kapitole 2.1 s rozdílem, že s pravděpodobností  $p$  je systém po provedení údržby PM stejně dobrý jako nový, a přesně  $i$  komponent se porouchá s pravděpodobností  $p_i$  (všechny ostatní komponenty se stanou dobré jako nové) a podléhají dokonalým údržbám CM okamžitě pokud  $i = 1, 2, \dots, n$  and

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 - p.$$

Samozřejmě, že pozdější případ se v praxi může vyskytnout mnohem častěji (Nakagawa 1987). Následně jsou generovány jak delší doba údržby tak náklady na údržbu, jelikož je vyžadována dodatečná údržba typu CM na porouchaných komponentách kvůli které je rovněž vyžadována údržba PM. To v praxi znamená, že interval do následující preventivní údržby PM je

příliš dlouhý a modifikuje podstatně stav systému. Další skutečností je to, že preventivní údržba nezaručuje ani negarantuje dobře provedenou práci pracovníky údržby, proto čím méně přesná a kvalitní práce je během preventivní údržby provedena, tím kratší provozní periodu můžeme následně očekávat. V některých případech je stanoveno, že pouze ty komponenty, které se porouchaly kvůli nedokonalé provedené preventivní údržbě PM budou okamžitě opraveny. Je třeba si rovněž uvědomit, že  $k$  komponent se může porouchat s ohledem na údržbu PM, protože PM může rovněž způsobit následné poškození (Nakagawa 1987) a stane se horším principem provádění údržby PM.

Nyní se musíme soustředit na systematické modelování intenzity nákladů údržby ve vztahu k modelování pohotovosti. Opět podle klasické teorie obnovy, vyjadřují doby mezi po sobě následujícími dokonalými údržbami, preventivními nebo po poruše, cyklus obnovy. Podle Wanga and Phama (2006) jsou dlouhodobé očekávané náklady na údržbu systému na jednotku času dány, resp. intenzita nákladů údržby závisí na parametrech  $p$  a  $p_i$  pro  $i = 1, 2, \dots, n$ , potom jsou:

$$L(\tau, T | p, p_i) = \frac{C(\tau, T | p, p_i)}{D(\tau, T | p, p_i)} \quad (9)$$

kde  $C(\tau, T | p, p_i)$  jsou očekávané náklady na údržbu systému za jeden cyklus údržby a  $D(\tau, T | p, p_i)$  je očekávaná délka cyklu obnovy založená na parametrech pravděpodobností  $p$  a  $p_i$ .

Optimální politika údržby založená na předpokladech  $(\tau, T)$  tak, jak byla stanovena výše s parametrem  $p$  může být získána tak, jak bylo uvedeno výše v předchozím případě za využití stejných metod tak, jak je uvedeno v sekci 2.1.

Ačkoliv respektujeme všechny principy pro preventivní údržbu a to jak dokonalou, tak nedokonalou – se dvěma případy to není možné zcela přesně popsat. Je nutné získat rozhodnutí o tom, kdy má být preventivní údržba provedena, jelikož stav systému to vyžaduje. Počet porouchaných komponent / subsystémů  $k$  indikuje pokles celkové výkonnosti systému, tedy v zásadě rovněž pokles možného zisku. Nicméně naše předpoklady pro provedení údržby PM a CM jsou založeny jak na stavu systému - výkonnosti, ale hlavně na souvisejících nákladech – buď zisky nebo ztrátami (očekávanými). Hovoříme buď o ztrátách kvůli nutnosti provedení okamžité údržby PM nebo o odstávce systému a/nebo o ztrátách způsobených poklesem produkce. Závislost mezi výkonností systému (fungující nebo porouchané subsystémy), zbývající časovou periodou a náklady je hlavním prvkem pro další předpoklady. Tyto principy, podmínky stanovení, okrajové podmínky a počáteční předpoklady jsou popsány v následující části.

### 3. Navrhované postupy údržby

Žádný z výše uvedených modelů zcela nesplňuje předpoklady o našem případě. Z tohoto důvodu zavádíme přesnější popis systému.

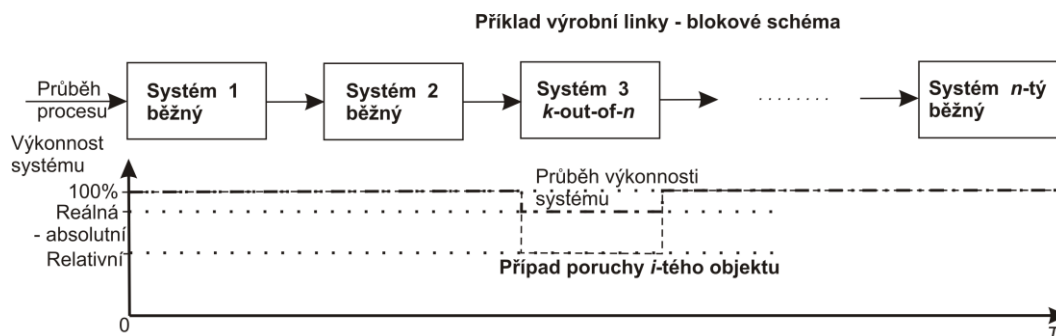
Jedná se o složitý mechatronický systém - kombinační váhy. Tyto kombinační váhy slouží k přesnému odvažování / dávkování drobného sypkého materiálu jako je sypké zboží, např. ořišky, těstoviny, cereálie, müsli, šroubky, apod. Celý systém sestává ze tří úrovní. Na první úrovni je materiál rozdělován setřásáním z vibračního talíře do jednotlivých násypků (obvykle 8 až 16). Na druhé úrovni je přes násypky materiál díky vibraci relativně rovnoměrně rozdělen do vázících zásobníků. Pokud jeho množství překročí stanovenou mez, je navraceno zpět na vibrační talíř. Kombinací dílčích hmotností v jednotlivých násypkách na druhé je rozhodnutím systému zvoleno tolik z nich, aby svým součtem vytvořily přesnější požadované množství, které je odesláno do nejnižší třetí úrovně. Systém trvale přijímá informaci o uskutečněném procesu odvážení požadovaného množství materiálu. Na třetí úrovni je tedy docíleno relativně přesného požadovaného množství materiálu v jednotlivých násypkách, který je konečnou finální kombinací vložen do obalu.

Pokud je množství materiálu na třetí úrovni znova nadlimitní a tedy pro další proces nepoužitelné, je opět navraceno zpět do nejvyšší části počátek procesu na vibrační talíř.

Pokud se některý vázící systém porouchá, je tím redukován konečný počet jednotek schopných vytvořit finální množství na třetí nejnižší úrovni. Matematický prostor vodný pro výběr

vhodné kombinace jednotlivých dávek bude poté rovněž zúžen, čímž by došlo ke zpomalení procesu a celé výrobní linky. Jednoduše řečeno, každá porucha vážícího subsystému povede k celkovému snížení výkonnosti systému. Nicméně, snížení výkonnosti systému nemá lineární průběh ve vztahu k počtu poruch, ale klesá progresivně s ohledem na počet porouchaných jednotek. Pokud se porouchá určitý počet jednotek  $k < n$ , systém celkově ztrácí svou schopnost vykonávat požadovanou funkci.

Jelikož jsou kombinační váhy součástí složitého výrobního řetězce, pokles v jejich výkonnosti okamžitě vede k poklesu výkonnosti celého výrobního řetězce a poklesu produkce – potenciální ztráty generované jak nižší produkcí, tak výhledem na nutnou investici ve vztahu k obnově. Tento princip je znázorněn na obrázku 2.



Obr. 2 Průběh výkonnosti systému k-out-of-n

Provádění opravy u porouchané jednotky v systému není možné za jeho provozu. Je tedy nutné odstavit celý systém až do okamžiku, kdy je provedena obnova. Nicméně přerušení výrobního procesu je vždy spojeno s určitými ztrátami způsobenými poklesem / odstavením výroby.

Pokud se reálně vyskytne porucha, je operátor vystaven rozhodnutí, zda je ekonomicky efektivnější pokračovat na snížený výkon systému až do nejbližšího okamžiku pro provedení plánované údržby PM – s rizikem poruchy další jednotky, nebo zda systém odstavit okamžitě, provést opravu a pokračovat dále na plný výkon. To vše s rizikem, že buď by musela být na zbývajících jednotkách provedena rovněž údržba PM nebo ne – zde ale s vyšším rizikem vzniku další poruchy v období opětovného spuštění systému až do následujícího okamžiku pro uskutečnění preventivní údržby PM.

Řešením pro tuto skutečnost je založeno na předpokladu, že systém je po určitou dobu v konstantním provozu a tedy je pro něj následně plánována údržba, čímž je umožněno provedení minimální údržby.

Následující charakteristiky produkce jsou zavedeny za účelem následujícího řešení.

- $q_k[\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}]$  - jmenovitá hmotnostní výkonnost systému v kilogramech za provozní hodinu při  $k$  fungujících jednotkách z celkového počtu  $n$ ;
- $c[\text{EUR}\cdot\text{kg}^{-1}]$  - příjem provozovatele z vyrobené jednotky - kilogram);
- $t_{SD}$  - doba do odstávky (plánovaná);
- $MTTR [\text{EUR}]$  - střední doba do obnovy;

Rozhodnutí, zda provést údržbu okamžitě po výskytu poruchy nebo během nejbližší plánované odstávky je zde založeno pouze na jediném kritériu a tím jsou náklady – jak ušlé zisky, tak ztráty z neprovoznosti způsobené investicí do údržby. Po každé poruše jsou ztráty analyzovány, čímž jsou stanoveny náklady (zisky i ztráty) při výrobě na snížený výkon systému až do nejbližší plánované odstávky. Tyto jsou porovnány s jednorázovou investicí do zařízení za předpokladu, že obnova je provedena okamžitě po vzniku poruchy. Ta varianta, která přináší nižší celkovou ztrátu s ohledem na celý výrobní systém, je potom zvolena jako optimální řešení.

Ztráty, které by vznikly z důvodu provádění opravy, jsou dány dobou nutnou pro provedení opravy a výkonností zařízení před tím, než byla oprava zahájena (provoz přerušen, zařízení odstaveno). Předpokládáme, že právě  $k$  jednotek bylo v provozu, přičemž ztráta může být vyjádřena následující rovnicí:

$$C_{Rk} = MTTRc q_k \tag{10}$$

Je dobré podotknout, že v okamžiku posuzování potenciální ztráty způsobené prováděním opravy u jedné nebo více jednotek, rovněž jedna nebo více jednotek může už být v poruchovém stavu.

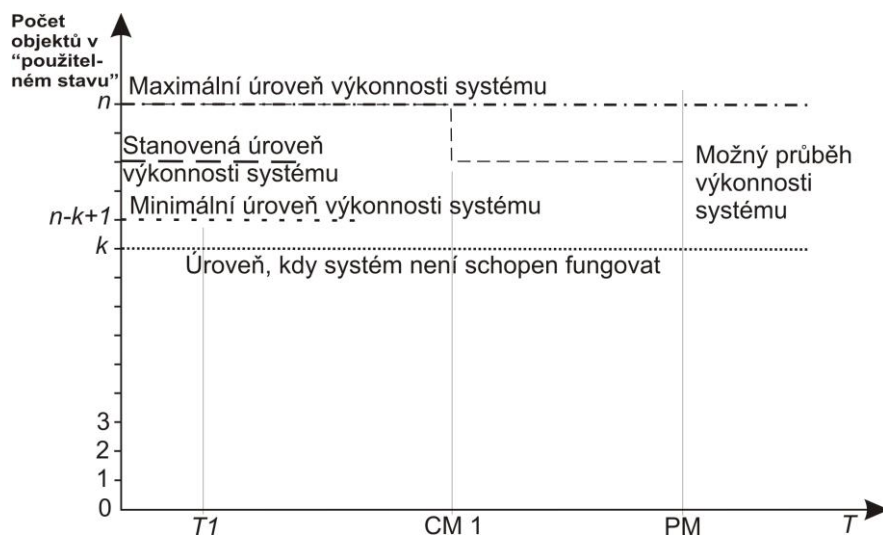
Tato situace se může vyskytnout během provozu a může předcházet poslední zaznamenanou poruchu jednoho nebo více subsystémů. Oprava těchto poruch v porovnání s prezentovanými postupy bude potom hodnocena jako neefektivní. Hodnota  $MTTR$  v rovnici (10) nemusí být ovlivněna pouze potížemi způsobenými opravou jednotlivého subsystému, ale rovněž počtem opravovaných subsystémů. Pro další řešení předpokládáme, že pokud je provedeno rozhodnutí o přerušení výrobního procesu a uskutečnění opravy, je nutné počítat se skutečností opravy všech porouchaných subsystémů v daném okamžiku. Rovněž se předpokládá, že proto, abychom provedli opravu subsystému bude k dispozici tolik pracovníků údržby, jako je počet porouchaných subsystémů. Přičemž předpokládáme, že  $MTTR$  bude rovněž stále stejná bez ohledu na počet porouchaných subsystémů.

Poté je nutné stanovit ztráty, které jsou způsobeny skutečností, že oprava bude odložena na dobu nejbližší plánované odstávky. Tato odstávka je dána dobou, která zůstává, dokud není provedena plánovaná odstávka a rovněž je dána rozdílností mezi celkovou maximální možnou výkonností systému (všechny  $n$  subsystémy pracují) a výkonností systému před jeho odstávkou.

$$C_{Ok} = t_{SD}c(q_n - q_k) \quad (11)$$

Pokud následujeme ostatní předpoklady, je možné vyloučit náklady související s náhradními díly, spotřebním materiálem použitým během opravy a pracovní silou. Nicméně náklady spojené s opravou je v podstatě nutné pokládat za potřebné k vynaložení. Předpokládá se dále, že náklady vynaložené na opravu budou jednotkově stále stejné bez ohledu na to, jak je oprava provedena – to znamená jestli je to bezprostředně po výskytu poruchy nebo později během plánované odstávky.

Nicméně, dokonce pokles produkce umožňuje systému dále fungovat. Tento princip je uveden na obrázku 3. Zde jsou uvedeny možné průběhy výkonnosti systému v závislosti na  $k$  porouchaných subsystémech.



Obr. 3 Průběh výkonnosti a údržbových cyklů v závislosti na porouchaných subsystémech.

Pokud následujeme informace uvedené výše s ohledem na podmínky, ve kterých je provedeno rozhodnutí o uskutečnění opravy, řešení může být uvedeno tímto způsobem. Provedení opravy je efektivní, pokud budou celkové ztráty (z neprovozuschopnosti z důvodu provádění obnovy) celkově nižší než ušlý zisk způsobený fungováním výrobního zařízení na nižší výkonnost.

$$C_{Rk} < C_{Ok} \quad (12)$$



Pokud využijeme výraz z rovnic (10) a (11) můžeme získat následující rovnici:

$$MTTR c_{Rk} < t_{SD} c(q_n - q_k) \quad (13)$$

Pokud transformujeme tento výraz, můžeme získat podmínku vhodnou k rozhodnutí pro uskutečnění opravy uvedenou níže. Tato forma nám umožní rozhodnout se o tom, zda provést opravu, což je založeno na porovnání kritérií se současnou dobou do nejbližší odstávky.

$$t_{SD} \geq \frac{MTTR_{q_k}}{(q_n - q_k)} \quad (14)$$

Hodnocení splnění této podmínky musí být prováděno po každé zaznamenané poruše.

## 5. Závěr

V tomto příspěvku je představena metoda pro návrh a optimalizaci údržbového schématu tzv. systému  $k$ -out-of- $n$ . Jak bylo již zdůrazněno v úvodu, je tato metoda založena na rozdílných charakteristikách, než je doposud zvykem a než je běžně používáno. Tento přístup je založen na závislostech výkonnosti systému a přínosů z provozu systému (jak zisky tak ztráty). Tento přístup se liší od běžně používaných metod a profituje z metod optimalizací nákladů, způsobů pro souvislý a hladký výrobní proces.

Jelikož by výkonnost systému měla být říditelná, vyřazení  $i$ -tého subsystému nutně nevede ke ztrátě schopnosti vykonávat požadovanou funkci.

Přínos z produkce ovlivňuje rozhodovací proces v časových intervalech vhodných pro modifikaci preventivní údržby a údržby po poruše. Tento princip není v souladu s typickým přístupem, který nejdříve zaznamenává výskyt poruch a určitou mírou pravděpodobnosti. Zde se nutně projevuje intenzifikace parametrů výkonnosti a souvisejících ztrát.

Na základě všech těchto informací se operátor výrobního zařízení rozhodne pro eventuelní modifikaci intervalů a rozsahu údržby.

Další práce bude zaměřena na přesnější specifikaci nákladů spojených s obnovou a se sníženou výkonností. Očekává se, že výsledek bude součástí rozhodovacího procesu ve vztahu k modifikacím intervalů údržby. Rovněž se předpokládá, že díky přesnějším údajům o preventivní údržbě a údržbě po poruše bude možné tento model zpřesnit. Specifikace ztrát způsobených odstávkou systému významně ovlivní možnost pro modifikaci rozhodovacího procesu. Interval pro uskutečnění údržby závisí na poklesu výkonnosti systému bude patrně stanoven ještě přesněji.

## Poděkování

Tento příspěvek byl sestaven s podporou Ministerstva obrany České republiky, díky „Projektu pro rozvoj organizace“ UO/FVT-K202 a rovněž z podporou Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky, projekt č. 1M06047 “Výzkumné centrum pro Spolehlivost a Jakost Výroby”.

## Literatura:

- Barlow, R.E. & Proschan, F. 1975. *Statistical theory of reliability and life testing: probability models*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Belfore, L.A. 1995. An  $o(n(\log_2(n))^2)$  algorithm for computing the reliability of  $k$ -out-of- $n$ :G &  $k$ -to- $l$ -out-of- $n$ :G systems. *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 44, no. 1, p. 132–136.
- Boedigheimer, R.A. & Kapur, K.C. 1994. Customer-driven reliability models for multi-state coherent systems. *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 43, no. 1, p.46-50.
- Gurler, S. & Bairamov, I. 2009. Parallel and  $k$ -out-of- $n$ : G systems with non-identical components and their mean residual life functions. *Applied mathematical modelling*, vol. 33, no. 2, p. 1116-1125.



- Heidtmann, K.D. 1982. Improved method of inclusion-exclusion applied to  $k$ -out-of- $n$  systems. *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 31, no. 1, p. 36-40.
- Huang, J. & Zuo, M.J. & Wu, Y.H. 2002. Generalized multi-state  $k$ -outof- $n$ :G systems. *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 51, no. 1, p.32-40.
- Huang, J. & Zuo, M.J. 2002. Dominant multi-state systems. *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 51, no. 1, p.41-47.
- Chao, M.T. & Fu, J.C. 1989. A limit theorem of certain repairable systems. *Annual of Institution of Statistical Mathematics*, vol. 41, p. 809-818.
- Chen, Y. & Yang, Q. 2005. Reliability of Two-stage weighted  $k$ -out-of- $n$  systems with components in common. *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 54, no. 3, p. 431-440.
- Kapur, P.K. & Garg, R.B. & Butani N.L. 1989. Some replacement policies with minimal repairs and repair cost limit. *International Journal of Systems Science* 20/2:267-279.
- Koutras, M.V. 1996. On a Markov chain approach for the study of reliability structures. *Journal of Applied Probability*, vol. 33, p. 357-367.
- McGrady, P.W. 1985. The availability of a  $k$ -out-of- $n$ :G network. *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 34, no. 5, p. 451-462.
- Myers, A. 2008. Achievable limits on the reliability of  $k$ -out-of- $n$ : G systems subject to imperfect fault coverage. *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 57, no. 2, p. 349-354.
- Nakagawa, T. & Yasui, K. 1987. Optimum policies for a system with imperfect maintenance. *IEEE Trans. Reliability* R-36/5:631-633.
- Sevcán, D. 2009. Reliability of combined  $k$ -out-of- $n$  on consecutive  $k_{<sub>c</sub>}$ -out-of- $n$  systems of Markov dependent components. *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 58, no. 4, p. 691-693.
- Sheu S.H. 1991. A general age replacement model with minimal repair and general random repair cost. *Microelectronics and Reliability* 31/5:1009-1017.
- Tian, Z & Richard, Y.C.M. & Ming, J.Z. & Huang, H. Z. 2008. Reliability bounds for multistate  $k$ -out-of- $n$  systems. *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 57, no. 1, p. 53-58.
- Wang H. & Pham H. 2006. Reliability and optimal maintenance. London: Springer. ISBN: 978-1-84628-324-6, 352 p (p. 161-180).
- Xiao, G. & Li, Z. 2008. Estimation of dependability measures and parameter sensitivities of a consecutive  $k$ -out-of- $n$ : F repairable system with  $(k - 1)$ -Step Markov dependence by simulation. *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 57, no. 1, p. 71-83.
- Zheng X. 1995. All opportunity-triggered replacement policy for multiple-unit system. *IEEE Transactions on Reliability* 44/4:648-652.
- Zuo, M.J. & Huang, J. & Kuo, W. 2003. *Handbook of Reliability Engineering*. Edited by Hoang Pham. London : Springer 2003. Section 1, Multi state  $k$ -out-of- $n$  Systems, p. 3-15.