

**ČESKÁ SPOLEČNOST PRO JAKOST**

**Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1**

**47. SEMINÁŘ  
ODBORNÉ SKUPINY PRO SPOLEHLIVOST**

pořádané výborem Odborné skupiny pro spolehlivost  
k problematice

**Specifikace, alokace  
a optimalizace požadavků  
na spolehlivost**



**Materiály ze 47. semináře  
odborné skupiny pro spolehlivost**

Brno, červen 2012

**ISBN 978-80-02-02394-4**

## **OBSAH:**

<b>SPECIFIKACE POŽADAVKŮ NA SPOLEHLIVOST</b>	<b>2</b>
<i>Doc. Ing. David VALIŠ, Ph.D., Prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc., Prof. Ing. Rudolf HOLUB, CSc., Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany</i>	
<b>ANALÝZA POŽADAVKŮ NA SPOLEHLIVOST</b>	<b>18</b>
<i>Ing. Michal VINTR, Ph.D., Fakulta strojní, Vysoké učení technické v Brně</i>	
<b>ALOKACE POŽADAVKŮ NA SPOLEHLIVOST</b>	<b>27</b>
<i>Prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc., Ing. Tomáš VINTR, Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany v Brně</i>	
<b>EKONOMICKÉ ASPEKTY OPTIMALIZACE POŽADAVKŮ NA SPOLEHLIVOST</b>	<b>35</b>
<i>Doc. Ing. Pavel FUCHS, CSc., Ing. Julie VOLFOVÁ, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Technická univerzita v Liberci Ing. Jan KRAUS, Škoda Electric, a.s.</i>	

# SPECIFIKACE POŽADAVKŮ NA SPOLEHLIVOST

## DEPENDABILITY REQUIREMENTS SPECIFICATION

doc. Ing. David VALIŠ, Ph.D.  
prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc.  
prof. Ing. Rudolf HOLUB, CSc.

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

### 1. Úvod – místo a úloha specifikace požadavků na spolehlivost v programu spolehlivosti

První etapa životního cyklu má zásadní postavení z hlediska spolehlivosti. Jedná se o etapu tvorby **koncepce a stanovování požadavků**. V této etapě vznikají základní charakteristiky spolehlivosti výrobku. Jedním z hlavních úkolů v této fázi je rozumné stanovení požadavků na spolehlivost v kvalitativní i kvantitativní formě. Rovněž tak je nutné vypracování programu spolehlivosti, jímž bude splnění těchto požadavků zajišťováno.

Spolehlivosti výrobku může být obecně specifikována a připravena jak producentem, tak uživatelem/odběratelem. Je rovněž možné ji připravovat společně formou vzájemné spolupráce obou stran<sup>1</sup>. V případě obecných výrobků, které jsou určeny široké skupině uživatelů (jedná se o výrobky komerčního charakteru) a kdy výrobce žádný protějšek pro stanovení požadavků nemá, je jeho „protějškem pro stanovení“ především situace na trhu.

Situace, kdy je vytvářen výrobek dle koncepce, která je předem známá, včetně odběratele (nebo se jedná o výrobek „přímo na zakázku“ pro konkrétního odběratele – je určitým způsobem specifická. V takovém případě je součinnost odběratele při tvorbě koncepce výrobku a především specifikace požadavků na spolehlivost nedílná, neodmyslitelná, nutná a nezastupitelná. Takové situace jsou obvyklé při zadávání velkých technologických celků, nebo například v případě dodávek většího počtu totožných produktů pro jednoho odběratele (příkladem mohou být obranné akvizice). V takových situacích je v zájmu budoucího uživatele, aby byl schopen jasně specifikovat své požadavky – popř. aby na jejich tvorbě s výrobcem spolupracoval. Specifikace požadavků na spolehlivost by měla být rovněž nedílnou součástí uzavřených obchodních smluv.

Proto, aby se specifikace požadavků stala součástí porozumění mezi odběratelem a výrobcem, je nutné, aby specifikované požadavky byly *jednoznačné, verifikovatelné, nerozporné a monitorovatelné*. K tomu je třeba provést analýzy a stanovení:

- kvalitativních požadavků bezporuchovosti a udržovatelnosti výrobku, definic všech funkcí výrobku, kritérií všech potenciálně možných poruchových stavů, provozních podmínek prostředí a doby technického života produktu – kdy se očekává shoda s požadavky;
- kvantitativních požadavků ukazatelů bezporuchovosti, udržovatelnosti a pohotovosti,
- kvalitativních a kvantitativních požadavků na zajištěnost a podporu údržby;
- požadavků na testovatelnost – způsobilost ke zkoušení (stanovení zkušebních funkcí a postupů, přesnosti zkoušek atd.).

Každý požadavek by měl být specifikován tak, že je třeba vyznačit prostředky a přístupy pro verifikaci shody (analýzy, simulace, zkoušky atd.) a rovněž označit tu etapu životního cyklu, ve které shoda bude verifikována.

Dalším neméně důležitým krokem, který se v rámci specifikace požadavků na spolehlivost provádí je rozdělení (alokace) požadavků. Ty se přiřazují na jednotlivé díly produktu (nebo části podpory a zajištěnosti údržby). Cílem tohoto procesu je stanovit

---

<sup>1</sup> Pro zajímavost v případě vojenské techniky by proces specifikace požadavků na spolehlivost měl vždy probíhat v režii odběratele, tj. armády

požadavky na spolehlivost každého dílu produktu tak, aby stanovené požadavky byly splněny i produktem jako celkem. Pokud provádíme dále alokaci požadavků, je nutné zohlednit nejen strukturu produktu, ale i úkoly údržby, ustanovení verifikace a validace požadavků. Proces alokace požadavků na spolehlivost není jednorázovou procedurou. Jedná se o činnost úzce svázanou s vlastním procesem návrhu a vývoje produktu. Přičemž dílčí kroky se mohou opakovat z důvodů změn v návrhu, resp. z důvodu optimalizačních studií.

## 2. Zadávání požadavků na spolehlivost

Ve standardních postupech současnosti se respektuje všeobecná zásada zadávání požadavků na spolehlivost v tzv. *úplné formě*. Tento postup má některé výhody. Předpokládá, že se provozovatel i smluvní výrobce budou zabývat spolehlivostí pojednávaných produktů systematicky (viz např. ARMP-4/Ed.3.0 nebo Ayyub B. M. & McCuen R. H. 2003).

Komplexně a systémově je nutné řešit otázky jako:

- optimalizace spolehlivosti v rámci struktury a složitosti systémů, v mezioborových souvislostech, při různorodých používáních produktů, v rozdílných podmínkách provozu apod.;
- sledování trendů v oboru spolehlivosti a vývoje komplexních systémů ve světě, při definování ukazatelů; a dále mapování trendů ve vývoji požadavků na spolehlivost produktů v případech jejich potenciálních uživatelů;
- zjišťování, monitorování, analýza a zobecňování vlivu použitých technologií, podmínek provozu, schémata provozu a údržby na úroveň spolehlivosti v provozu, budování databází údajů o spolehlivosti;
- rozvíjení a používání metod zpracování a předpovědí spolehlivosti systémů a jejich jednotlivých prvků;
- vývoj metod zkoušení (ověřování) spolehlivosti, vývoj metodik pro zrychlené a zkrácené zkoušky;
- řešení problémů souvisejících s optimalizací rizika u nespolehlivých výrobků.

### 2.1 Forma a způsob zadávání požadavků na spolehlivost

Jako nedostatečné se vnímá, aby požadavky na spolehlivost produktu byly předepisovány jen selektovaným souborem ukazatelů a jejich numerických hodnot. Pokud chybějí podrobnosti a upřesnění (viz např. Barlow R.E. & Proschan F. 1975 nebo ČSN EN 60300-3-4 Ed. 2.0 nebo Holub, R a Vintr, Z. 2004, aj.).

Při zadávání požadavků se musí respektovat tzv. „Úplná forma“, která by měla obsahovat níže uvedené informace:

- pojmenování ukazatelů dílčích vlastností spolehlivosti;
- numerické hodnoty ukazatelů dílčích vlastností spolehlivosti;
- podmínky pro provoz objektu, na který se ukazatele vztahují;
- období technického života objektu, o které se pojednává (například prototyp, výrobek z ověřovací série, sériový výrobek, aj.);
- kritéria pro posouzení, klasifikaci a započitatelnost poruchy a mezních stavů;
- principy pro verifikaci spolehlivosti (podmínky posuzování a metodiky, stanovení přípustných rizik při nesplnění požadavků).

Vybrané zásady specifikace požadavků na spolehlivost jsou zcela v souladu s ustanovením platných norem ČSN IEC, ARMP, MIL-STD a dalších. Všechny jiné způsoby vyjádření požadavků se zvláště ve finální fázi projektu (při prokazování naplnění požadavků) ukáží jako nedostatečné a ne zřídka i jako spekulativní.

## Nomenklatura ukazatelů spolehlivosti

Vhodnou a dosud jedinou pomůckou pro volbu nomenklatury ukazatelů spolehlivosti produktů různé konstrukční složitosti je norma ČSN 010606 (Postup volby nomenklatury normovaných ukazatelů spolehlivosti). Citovanou částí normy se říká, že: „Norma určuje jednotný algoritmus pro výběr ukazatelů tím, že:

- Zařazuje každý objekt do *třídy* v závislosti na tom, zda se jedná o objekt *opravovaný* po poruše nebo o objekt po poruše *neopravovaný* (vyřazovaný z provozu);
- Přiřazuje každému objektu charakteristický *provozní režim* (nepřetržitý, cyklický, operativní, všeobecný);
- Zařazuje každý objekt do *skupiny spolehlivosti* v závislosti na závažnosti důsledků poruchy (ohrožení bezpečnosti lidí, rozsah materiální škody);
- Zařazuje každý objekt podle způsobu ohraničení jeho *doby používání* (zda ohraničení je: plánované, nebo vynucené).“

Na základě zařídění uvedeného výše je potom v normě přiřazena jednotlivým typům objektů množina ukazatelů. Jedná se o takové, které nejlépe vystihují charakteristiky spolehlivosti příslušného objektu.

Přehled vybraných a v praxi nejčastěji užívaných ukazatelů dílčích vlastností spolehlivosti jsou uvedeny v Tabulce 1 a 2. V první uvedené jsou ukazatele používané u tzv. opravovaných objektů. Ve druhé tabulce jsou potom ukazatele neopravovaných objektů. Další možnosti popisu je možné nalézt například v Chandrupatla T. R. 2009, Pham H. 2003, Rausand M. & Hoyland A. 2003, Stapelberg R. F. 2009.

Tab. 1 Vybrané ukazatele dílčích vlastností spolehlivosti u opravovaných objektů

Sledované vlastnosti	Sledované veličiny	Ukazatelé spolehlivosti	Označení
Bezporuchovost	Doba provozu mezi poruchami	Pravděpodobnost bezporuchového provozu	$R(t_1, t_2)$
		Intenzita poruch	$\lambda(t)$
		Střední intenzita poruch	$\bar{\lambda}(t_1, t_2)$
		Parametr proudu poruch (okamžitý)	$z(t)$
		Střední parametr proudu poruch	$\bar{z}(t_1, t_2)$
		Střední doba provozu mezi poruchami	MTBF, $\bar{t}$
		p-quantil doby mezi poruchami	$t_p$
Životnost	Doba užitečného (technického) života	Střední užitečný (technický) život	$\bar{t}_z$
		p-quantil užitečného života	$t_{zp}$
Udržovatelnost a zajištěnost údržby	Doba údržby	Pravděpodobnost provedení údržby	$M(t_1, t_2)$
	Doba preventivní údržby	Střední doba preventivní údržby	$\bar{t}_{ou}$
	Doba opravy	Intenzita opravy (okamžitá)	$\mu(t)$
		Střední intenzita opravy	$\bar{\mu}(t_1, t_2)$
		Střední doba opravy	MRT, $\bar{t}_{oo}$
		p-quantil doby opravy	$t_{po}$
	Pracnost údržby	Střední pracnost údržby	$\bar{t}_{pú}$
	Pracnost preventivní údržby	Střední pracnost preventivní údržby	$\bar{t}_{ppú}$
Pracnost opravy	Střední pracnost opravy	$\bar{t}_{po}$	

	Doba údržby po poruše	Střední doba do obnovy	MTTR
	Logistické zpoždění	Střední logistické zpoždění	MLD, $\bar{t}_L$
		p-kvantil logistického zpoždění	$t_{Lp}$
Pohotovost	Doba použitelného stavu, Doba nepoužitelného stavu	Střední doba použitelného stavu	MUT
		Střední doba nepoužitelného stavu	MDT
		Okamžitá pohotovost	A(t)
		Součinitel asymptotické pohotovosti	A
		Součinitel střední pohotovosti	$\bar{A}(t_1, t_2)$
		Okamžitá nepohotovost	U(t)
		Součinitel střední nepohotovosti	$\bar{U}(t_1, t_2)$
	Součinitel asymptotické nepohotovosti	U	

Tab. 2 Vybrané ukazatele dílčích vlastností spolehlivosti u neopravovaných objektů

Sledované vlastnosti	Sledované veličiny	Ukazatelé spolehlivosti	Označení
Bezporuchovost	Doba provozu do poruchy	Pravděpodobnost bezporuchového provozu	R(t)
		Intenzita poruch	$\lambda(t)$
		Střední doba provozu do poruchy	MTTF, $\bar{t}_1$
		p-kvantil doby do poruchy	$t_{1p}$
Životnost	Doba užitečného (technického) života	Střední užitečný (technický) život	$\bar{t}_z$
		p-kvantil užitečného (technického) života	$t_{zp}$
Udržovatelnost a zajištěnost údržby	Doba preventivní údržby	Střední doba preventivní údržby	$\bar{t}_{ou}$
		Pravděpodobnost provedení údržby	M(t <sub>1</sub> , t <sub>2</sub> )
	Pracnost preventivní údržby	Střední pracnost preventivní údržby	$\bar{t}_{ppu}$
	Logistické zpoždění	Střední logistické zpoždění	MLD, $\bar{t}_L$
		p-kvantil logistického zpoždění	$t_{Lp}$

Numerické hodnoty ukazatelů dílčích vlastností spolehlivosti.

Exaktní numerické hodnoty jednotlivých ukazatelů dílčích vlastností spolehlivosti je možné pro potřeby specifikace požadavků na spolehlivost určit několika způsoby:

- Expertním odhadem;
- Využitím výsledků monitorování (zkoušek) spolehlivosti stejného nebo srovnatelného produktu a jejich interpolací na objekt nový;
- Přijetím požadavků budoucího uživatele;
- Adaptováním hodnot ukazatelů srovnatelných vzorů (výrobky renomovaných výrobců);
- Optimalizací hodnot dílčích ukazatelů podle stanovených kritérií (například optimalizací nákladů životního cyklu, apod.);
- Přijetím ustanovení a požadavků norem, předpisů a zákonných nařízení (pokud ovšem existují);

- Výpočtem (analýzou) pro danou strukturu systému a pro cílové hodnoty ukazatelů systému (například odvozením z požadované úrovně pohotovosti příslušné struktury, nebo z požadavků na pravděpodobnost úspěšnosti splnění zadání);
- Využití specializovaných expertních databází (např. SPIDR, EPRD, NPRD, FMD, VZAP-95, aj)

Každé konkrétní řešení je závislé na výběru vhodného zdroje pro získání číselných hodnot jednotlivých ukazatelů dílčích vlastností. Některé možnosti praktického určení kvantitativních požadavků jsou popsány dále v textu.

#### Podmínky provozu objektu.

Podle doporučení norem IEC (ze kterých citujeme dále) se *provozní podmínky* dělí na *operační podmínky* a *podmínky prostředí*.

*Operační podmínky*: - souvisí s vlastní činností systému a jejich obsahem je kombinace různých operačních parametrů a jejich úrovní. K operačním podmínkám patří například:

- podmínky, vyplývající z dovoleného způsobu provozování (fungování, používání) objektu včetně prostojů, údržby, oprav, skladování, přepravy apod.;
- struktura a úroveň vstupních signálů, charakter zpracovávaných materiálů apod.;
- charakter a úroveň zatížení, obecně reprezentované rychlostmi, silami, tlaky, zrychlením, deformacemi provozními teplotami;
- činnosti operátorů.

*Podmínky prostředí*: - tímto pojmem se označují fyzikální a chemické vnější podmínky, v nichž systém pracuje a jejichž působení je tedy systém při plnění svých funkcí vystaven. Obsahují kombinaci parametrů prostředí a jejich úrovní. Při návrhu systému je třeba znát podmínky prostředí, protože na nich je úroveň spolehlivosti silně závislá. Parametry prostředí se mohou členit do několika skupin, jedná se například:

- klimatické parametry, jako je vlhkost, teplota prostředí, tlak vzduchu, vítr, sluneční záření, denní a noční doba, apod.
- mechanické parametry podmíněné přirozeným prostředím (seismické, gravitační, chemická agresivita prostředí, aj.);
- jiné parametry prostředí (radiační podmínky, blesk, biologické podmínky, aj.).

#### Časové období v životě výrobků, pro které ukazatele platí.

Podle toho, ve které etapě technického života se objekt nachází, můžeme označovat vývoj spolehlivosti, sledovat a předepisovat její úrovně. Jedná se například o:

- objekt ve fázi prototypu;
- objekt z ověřovací série;
- objekt ze sériové výroby (včetně rozlišování jednotlivých sérií);
- provozní spolehlivost (úroveň spolehlivosti s vlivem provozních podmínek).

Poznámky:

Míra splnění spolehlivosti se u prototypů a objektů z ověřovací série často prokazuje pouze analytickými metodami a/nebo tzv. zkouškami kritických prvků, resp. zkouškami malého (často jediného) kusu produktu. V takovém případě je riziko ne zcela přesného určení ukazatelů spolehlivosti relativně vysoké. V takovém případě není možné zjištěné skutečnosti/nedostatky z posuzovaných produktů nekriticky přenášet na budoucí sériově vyráběné produkty.

Míra splňování požadavků a úroveň dílčích vlastností spolehlivosti objektů ze sériové výroby se zpravidla ověřuje na větším počtu. Taková zkouška obvykle trvá déle, není proto výjimkou, že se ověřuje až například v provozních (ve specifických odvětvích např. vojenských) zkouškách. V tomto případě je rovněž riziko omylu při stanovení úrovně spolehlivosti nižší.

Dosažené zkušenosti dále prokazují, že celková úroveň spolehlivosti objektu z ověřovací série bývá až o 30% vyšší než je tomu v případě prototypu. U objektu ze sériové výroby bývá až o 10% nižší než je tomu v případě ověřovací série a úroveň provozní

spolehlivosti (u prvních sérií) bývá až o 30% nižší než jejich stanovená míra inherentní spolehlivosti.

### Započitatelnost a stanovení kritérií poruch pro posuzování.

Záležitost kategorizace poruch je individuální a důležitou částí specifikace požadavků. Poruchy obecně třídíme (viz např. Valis D. and Bartlett L., 2010) podle:

- rychlosti vzniku (postupná, náhlá, aj.)
- stupně rozsahu (úplná, částečná, aj.)
- podle příčiny (nezávislá/závislá, z nesprávného návrhu, z nesprávného použití, z nesprávného zacházení, aj.)
- podle důsledků (rozsahu, povahy – s vlivy na systém, prostředí, člověka, službu, aj.)

Je stanoveno, že nedílnou součástí specifikace a dále potom alokace požadavků na spolehlivost v úplné formě bývá rovněž přesně stanovená kritéria pro vznik poruch a mezních stavů. Taková kritéria poruch a mezních stavů jsou stanovena za účelem jasného a přesného definování přípustného resp. nepřípustného technického stavu objektu a podmínek přechodů mezi takto definovanými stavy. Více o možnostech posuzování stavu je možné se dozvědět např. v Wang H. & Pham H. 2006.

### **3. Struktura požadavků na spolehlivost**

V souladu se současným pojetím managementu spolehlivosti se požadavky obecně dělí do čtyř skupin:

- požadavky na bezporuchovost (případně spolu s požadavky na bezpečnost);
- požadavky na udržovatelnost;
- požadavky na pohotovost;
- požadavky na zajištěnost/podporu údržby.

Poslední z uvedených má specifické postavení, protože podpora/zajištěnost údržby je často stanovena pouze podmínkami pro použití produktu a nebývá inherentním požadavkem samotného produktu – požadavky na podporu/zajištěnost údržby se obvykle nerealizují v etapě návrhu produktu.

Nicméně požadavky ze zbývajících skupin a jejich zajištění jsou s vlastním návrhem produktu velmi úzce svázané. Z hlediska praxe není nutné (někdy rovněž žádoucí) pro každý produkt specifikovat kompletní (tři) charakteristické znaky spolehlivosti (tedy máme na mysli pohotovost, bezporuchovost a udržovatelnost). Dva z těchto tří znaků obvykle dostačují, přičemž v praxi se standardně používají jejich dvě kombinace. Obvykle bývají specifikovány požadavky na bezporuchovost a udržovatelnost, nebo pohotovost a bezporuchovost. Produkty bez stanovených údržbových rámců nevyžadují pro specifikování spolehlivosti více než stanovení bezporuchovosti (respektive odvozené životnosti).

Podrobnější pojednání o jednotlivých vlastnostech a specifikacích na ně je uvedeno níže.

#### **3.1 Specifikování a strukturování požadavků na bezporuchovost**

Požadavky na bezporuchovost je možné dělit do dvou skupin: kvantitativní a kvalitativní.

#### Kvalitativní požadavky na bezporuchovost

Bývají vyjádřeny alespoň jedním z následujících způsobů:

- a) kritérium návrhu produktu;
- b) činnosti pro zlepšování bezporuchovosti, které se mají během jednotlivých etap životního cyklu produktu aplikovat.



Při specifikování kritérií návrhu produktu se kvalitativně uvádí požadavky, které musí být uskutečněny. To proto, aby byla zajištěna odpovídající úroveň bezporuchovosti a/nebo bezpečnosti produktu. Požadavky jsou obvykle stanoveny díky výsledkům analýz kritičnosti selhání určitých funkcí produktu. Přičemž je dobré, aby odrážely skutečný význam spolehlivosti u analyzovaného produktu.

Všechny požadavky zpravidla slouží k tomu, aby produkt byl tak zvaně „bezpečný při poruše“ (failure safe). Tím se rozumí vlastnost konstrukce produktu, která zajistí, aby poruchy vedly ke kritickým a katastrofickým poruchovým stavům. Dosažení takového stavu lze na různých úrovních dosáhnout zavedením celé řady zásad při návrhu produktu. Níže uvádíme několik obvyklých příkladů takovýchto kritérií při návrhu produktu:

- žádný jednotlivý a izolovaný poruchový stav nesmí způsobit kritický stav produktu;
- žádný nedetekovaný poruchový stav (skrytá – hidden – porucha) v kombinaci s dalším jednotlivým poruchovým stavem nesmí způsobit kritický stav produktu;
- žádný poruchový stav jednoho záložního sub-systému nesmí způsobit poruchový stav jiného záložního subsystému;
- kritické funkce systému/produktu musí být sledovány, ať již automaticky nebo ručně, nepřetržitě a/nebo periodicky.

Uskutečnění některých kritérií návrhu produktu nezávisí jen na rozhodnutí výrobce, nebo jeho dohodě s uživatelem. V řadě případů je plnění kritérií vyžadováno rovněž legislativně. Jedná se především o takové produkty, jejichž porucha by mohla způsobit ohrožení zdraví a životů osob, velké materiální či ekologické škody, apod. K charakteristickým oborům, kde se kritéria návrhu produktu stanovují velmi striktně, patří například letectví, (jaderná) energetika, chemický průmysl, vojenství, aj. V určitých modifikacích je možné se se standardizovanými kvalitativními požadavky na bezporuchovost setkat téměř ve všech technických aplikacích (např. jeřáby, dopravní technika, zbraně, munice, aj.)

Někdy je naproti tomu lepší kromě kritérií návrhu produktu také specifikovat posloupnost aktivit pro zvýšení bezporuchovosti: Jedná se o takové činnosti, které se mají uskutečňovat v průběhu jednotlivých etap technického života produktu. Uvedené aktivity jsou zvláště důležité v případech, kdy kvantitativní požadavky na bezporuchovost nejsou specifikovány dostatečně přesně. Plán těchto aktivit by potom měl být v časových souvislostech zpracován rovněž do programu spolehlivosti produktu.

### Kvantitativní požadavky na bezporuchovost

Kvantitativní požadavky na bezporuchovost mohou být specifikovány celou řadou ukazatelů a jejich kombinací – některé již byly uvedeny výše v tabulce. Při výběru vhodných charakteristik je třeba brát v úvahu povahu výrobku, režimy provozu, kritičnosti poruch a použité zásady/omezení doby používání.

Stanovení vybraných ukazatelů bezporuchovosti vychází z předpokladu, že se sledované objekty mohou nacházet pouze ve dvou stavech – provoz a poruchový. Jedním z předpokladů pro zajištění srozumitelnosti požadavků na bezporuchovost je tedy jasné stanovení těchto dvou stavů a kritérií přechodu objektu z jednoho stavu do druhého.

Pro zaručení srozumitelnosti, verifikovatelnosti, jednoznačnosti, monitorovatelnosti a posuzovatelnosti kvantitativních požadavků na bezporuchovost je rovněž nutné stanovit podmínky provozu. Je potřeba, aby byly vymezeny očekávané podmínky prostředí a určeny metody, postupy a kritéria hodnocení v souladu se stanovenými požadavky. Bez těchto podmínek nemá kvantitativní specifikace požadavků na bezporuchovost smysl.

Pro všechny zvolené ukazatele bezporuchovosti je na základě rozumné úvahy dále nutné stanovit jejich numerické hodnoty. Tedy takové, jejichž splnění bude u produktu vyžadováno. Při specifikaci takových požadavků je třeba brát v úvahu následující skutečnosti:

- limity aktuálního stavu technologií;
- určení a konstrukční složitost výrobku;

- zkušenosti budoucího uživatele s provozováním a udržováním požadovaného nebo podobného typu výrobku;
- uskutečnitelnost verifikace každého specifikovaného požadavku;
- úroveň bezporuchovosti dílčích komponent;
- odhad nákladů spojených s vývojem, výrobou a ověření produktu za stanovené a specifikované úrovně bezporuchovosti.

Jestliže se během etapy vývoje projeví, že některý ze základních předpokladů není platný, je nutné požadavky na bezporuchovost znovu posoudit a případně aktualizovat, přepracovat, změnit.

### 3.1.1 Kvantifikace požadavků na bezporuchovost

Vhodné vymezení kvantitativních požadavků na bezporuchovost produktu vyžaduje přístup opřený o pečlivé analýzy, kvalifikovaná rozhodnutí a kompetentní přístup. To je dáno skutečností, že žádný jednoznačný postup pro stanovení numerických hodnot příslušných ukazatelů bezporuchovosti není známý. Rovněž tak nikde nenalezneme žádné obecně použitelné a/nebo „doporučené“ hodnoty (viz např. Stapelberg R. F. 2009. nebo Chandrupatla T. R. 2009.).

Specifikace se odlišuje případ od případu, přičemž vždy musí být realizován s ohledem na konkrétní produkt: Východiskem k jejich stanovení může být:

- že z požadavků na pohotovost jsou odvozeny požadavky na bezporuchovost;
- provedení analýzy rizik spojených s možnými poruchami objektu;
- analýza CBA – optimalizace nákladů a přínosů;
- využití jako podkladů z výsledků zkoušek nebo provozního sledování objektů obdobné konstrukce;
- využití znalostí o obdobném objektu pro převzetí číselných hodnot u specifikace požadavků na bezporuchovost;
- provedení odborného odhadu expertními metodami;
- přijetí a převzetí požadavků mezinárodních, či národních norem a předpisů;
- přijetí požadavků budoucího uživatele (odběratele).

Dále bude podrobněji pojednáno pouze o některých z výše uvedených přístupů, protože použití ostatních je zbyvajících postupů zřejmá z jejich názvu.

#### Odvození požadavků na bezporuchovost z požadavků na pohotovost;

Výše již bylo zmíněno, že úplná specifikace požadavků na spolehlivost opravovaných objektů má zahrnovat numerické hodnoty ukazatelů alespoň dvou z následujících vlastností: bezporuchovosti, udržovatelnosti a pohotovosti. Nejčastěji jsou využívány následující dvě kombinace vlastností a jejich požadavků:

- bezporuchovost a udržovatelnost;
- pohotovost a udržovatelnost.

U takových objektů, kde jejich pohotovost hraje dosti významnou roli (např. komunikační systémy, energetická zařízení, vojenská technika, výrobní linky, dopravní technika, a další.) se používá druhá z výše uvedených kombinací.

Předpokládejme tedy, že známe hodnoty požadavků pohotovosti a udržovatelnosti objektu. Požadavky pro stanovení bezporuchovosti potom můžeme snadno odvodit na základě matematických souvislostí, které mezi těmito ukazateli jsou.

Za předpokladu exponenciálního rozložení dob mezi poruchami a dob do obnovy objektu můžeme pro součinitel asymptotické pohotovosti uvádět:

$$A = \frac{MTBF}{MTTR + MTBF} \quad (1)$$

Známe-li požadovanou hodnotu součinitele asymptotické pohotovosti objektu a střední dobu do obnovy, můžeme snadno zformulovat požadavek na střední dobu mezi poruchami:

$$MTBF \geq MTTR \cdot \frac{A}{1-A} \quad (2)$$

### Analýza rizik spojených s poruchami objektu

Jestliže další úvahy opřeme o definici bezporuchovosti, můžeme konstatovat, že hlavním hodnoceným znakem bezporuchovosti objektu je jeho funkčnost. Základním východiskem pro formulování požadavků na bezporuchovost by za těchto předpokladů tedy byla znalost funkce, jejíž plnění se od výrobku očekává a eventuální rizika, která případné selhání funkce přinášejí.

Popis funkcí objektu s sebou nese jistou míru nejistoty, že nebude realizována tak, jak je požadováno. Navíc se může stát, že případné odchylky od očekávané funkce budou mít nebezpečný nežádoucí důsledek, který se může projevit na výsledek funkce objektu jako celku. Je tedy nutné uvažovat s jistým rizikem, přičemž toto riziko je vnímáno, jako kombinace pravděpodobnosti s jakou může nežádoucí a navíc nebezpečná událost (porucha) nastat a takových důsledků, které by tato událost měla, pokud by nastala. Někdy se (tak jak je uvedeno dále ve výrazu (3)) doplňuje o opatření určená ke snížení míry rizika a expozice, která doplňuje fyzikální jednotku vystavení riziku. Potenciál a znalost jednotlivých důsledků nebo pravděpodobností nastoupení události nemusí ještě nutně vést ke vzniku nepřijatelné míry rizika. Jestliže nebezpečná nežádoucí událost nemá závažný důsledek, pak rovněž při značně velké pravděpodobnosti jejího výskytu může být riziko přijatelné. To samozřejmě platí i v opačném případě.

Riziko tak obecně a standardně definujeme jako součin pravděpodobnosti, s jakou může nebezpečná nežádoucí událost nastat a důsledků, které má nastoupení takové události na výsledek funkce objektu. Matematicky jednoduše zapsáno:

$$RIZIKO = \frac{P \times D}{O} \times E [UNIT] \quad (3)$$

Kde: P – pravděpodobnost výskytu nebezpečné nežádoucí události (např. poruchy);  
 D – důsledek jevu pokud nastane;  
 O – opatření pro snížení míry rizika;  
 E – expozice/vystavení míře rizika.

Důsledkem z takové události zde rozumíme například míru závažnosti ztráty funkčnosti produktu v případě výskytu poruchy. Rozsah důsledků je třeba stanovit vhodným způsobem. Jednou z možností je například číselně jako relativní hodnotu v rozmezí hodnot ( $0 \leq D \leq 1$ ). V praxi se však důsledky nekvantifikují (zpravidla pro svou obtížnost). Spokojíme se tedy s kategorizací do jednotlivých tříd podle jejich závažnosti: Té pak v souladu s výše uvedenou logikou pojetí rizika přidělíme odpovídající hodnoty pravděpodobností.

Obecně použitelná kategorizace poruch bohužel neexistuje. V běžné praxi je standardní, že každému konkrétnímu posuzovanému objektu či druh objektů je třeba příslušnou hodnotovou stupnici vytvořit. Dále potom jednotlivé kategorie poruch podle jejich důsledku definovat.

Obvyklým a rozhodujícím kritériem, které je třeba při tvorbě kategorizace poruch respektovat je právě výše uváděné hledisko bezpečnosti objektu při poruše: Tehdy se posuzuje, zda případné výskyty poruch objektu nemohou vést k ohrožení zdraví a životů osob nebo ke značným materiálním či jiným ztrátám. Podle takových kritérií pak rozdělujeme objekty na ty, které při poruše bezpečnost neohrožují a takové, které by při poruše potenciálně bezpečnost ohrožovat mohly.

#### *Objekty, jejichž poruchy bezpečnost neohrožují*

Do této skupiny zahrnujeme takové objekty, u nichž žádný způsob selhání (poruchy) nemůže vést k ohrožení zdraví a životů osob nebo ke značným materiálním škodám. Tedy se jedná o takové objekty, jejichž poruchy by mohly vést „pouze“ k nespokojenosti uživatele,

či ztrátě důvěry uživatele v úroveň kvalitu objektu. Takové typy poruch mají zpravidla jisté negativní dopady pro uživatele ve formě ekonomické.

U takovýchto typů objektů je rozhodujícím kritériem pro kategorizování poruch jejich důsledek na fungování vlastního objektu.

Níže je uveden příklad obvykle používaného třídění poruch u objektů, jejichž poruchy by bezpečnost neohrozily:

- Poruchy I. typu: poruchy, které neomezí plnění parametrů hlavních funkcí objektu (selhání podpůrné funkce);
- Poruchy II. typu: poruchy, které zhorší, sníží nebo omezí parametry plnění hlavních funkcí objektu, ale nebrání jejich dalšímu plnění (selhání vedlejší funkce);
- Poruchy III. typu: poruchy, které znemožní objektu plnění hlavních funkcí (selhání hlavních funkcí).

Počet uvedených typů/tříd/úrovní (kategorií) je v zásadě flexibilní a odvíjí se pouze od přijatých omezení pro posuzování. Je ovšem rovněž důležité, aby podle použité klasifikace bylo možné jednoznačné zařazení jednotlivých poruch.

V dalším postupu se provádí kvantifikace hodnoty pravděpodobnosti, s jakou je možné nastoupení jednotlivých kategorií poruch připustit. Při stanovování numerických hodnot pravděpodobností se zpravidla vychází z informací o bezporuchovosti obdobných produktů nebo se využívá expertních odhadů.

Samotná činnost specifikace požadavků na bezporuchovost objektu potom spočívá ve stanovení očekávaných a potenciálně možných způsobů (angl. modes) poruch objektu a jejich klasifikace do tříd-viz např. příklad výše. Klasifikováním poruchy do příslušné třídy dle typu je rovněž souběžně stanoven požadavek na bezporuchovost posuzované funkce objektu.

#### *Objekty, které svou poruchou mohou ohrožovat bezpečnost*

Pokud porucha funkce posuzovaného objektu může způsobit ohrožení životů a zdraví osob nebo velké materiální škody, je nutné specifikaci požadavků na bezporuchovost odvozovat rovněž od specifikace požadavků na bezpečnost. Naproti skutečnostem uvedeným v předchozí kapitole není zkoumán důsledek poruchy na *funkci* vlastního objektu, ale její následek na vlastní objekt (z důvodů poškození nebo zničení objektu, apod.) rovněž především na prostředí (jako například následky na obsluhu, personál, životní prostředí, atd.). Pojmem bezpečnost je zde potom chápán stav, ve kterém je míra rizika škody na zdraví nebo materiální škody sníženo na přijatelnou úroveň.

Rovněž v takovém případě vycházíme z klasifikace poruch. V některých dokumentech celosvětového významu se v oboru bezpečnosti pro účely klasifikace poruch objevují například následující třídy poruch:

- *Nezávažný důsledek* vyvolají poruchy, které nesníží ani jinak neovlivní funkční schopnosti objektu.
- *Závažný důsledek* vyvolají poruchy, které by mohly snížit funkční schopnosti objektu, ale nevedou k ohrožení zdraví lidí a materiálním škodám a důsledky takových poruch jsou v provozu obsluhou zvládnutelné.
- *Kritický důsledek* vyvolají poruchy, které by mohly snížit funkční schopnosti objektu pod akceptovatelnou mez tak, že by to postupně mohlo vést až k poruše s katastrofickými důsledky, pokud by neprodleně nebo ve stanovené době nebyla přijata odpovídající opatření k nápravě.
- *Katastrofický důsledek* vyvolají poruchy, které by mohly vést k ohrožení zdraví osob nebo značným materiálním ztrátám.

Tato škála není nijak závazná. Podle konkrétních potřeb a aplikací v praxi se modifikuje jak počtem tříd, tak i jejich obsahovým vyjádřením. Navržená škála však pro případného posuzovatele musí umožňovat alternativu pro jednoznačné zařazení každé případné, byť potenciální, poruchy objektu do určité třídy.

Stanovení přijatelné úrovně pravděpodobnosti, se kterou připustíme výskyt určitých tříd poruch, je rovněž důležité. Přesné hodnoty povolené míry pravděpodobnosti výskytu poruchy

jsou potom závislé na povaze posuzovaného objektu, očekávaných a potenciálně možných rozsahů důsledků, provozních podmínkách a jiných zohledňovaných okolnostech. Pro některá významná technická odvětví, kde selhání objektů může mít závažné a široké důsledky (např. letectví, jaderná energetika, zpracovatelský-procesní-chemický průmysl, aj.), se zpravidla tyto numerické hodnoty direktivně stanovují vládními, národními nebo mezinárodními předpisy pro oblast bezpečnosti. V jiných aplikacích nebo oborech je možné, že se tyto meze stanovují pro každý objekt individuálně – to samozřejmě s využitím různých expertních přístupů (např. hodnotové analýzy).

Pokud jsou požadavky na bezpečnost u objektů specifikovány způsobem popsaným výše, potom se vyžaduje, aby byly požadavky akceptovány rovněž v případě tvorby a odvozování požadavků na bezporuchovost. Zpravidla to v praxi znamená, že v případě všech poruch, jejichž důsledky by závažné, kritické nebo katastrofické být mohly, jsou odpovídající kvantitativní požadavky na bezpečnost zahrnuty přímo do specifikace požadavků na bezporuchovost. U takových typů poruch, jejichž důsledky by mohly být posuzovány jako nezávažné, je možné pro vymezení požadavků na bezporuchovost objektu zvolit jiný/alternativní přístup (např. simulaci, modelování, optimalizaci, aj.).

### Optimalizace nákladů a přínosů

V rámci specifikace požadavků na bezporuchovost je třeba pamatovat na to, že každé rozhodnutí může mít významné dopady na výši nákladů spojených s jednotlivými etapami technického života objektu (viz např. ČSN 60300-3-3).

Je možné položit přímou úměru mezi velikostí nároků/požadavky na bezporuchovost objektu, a velikost nákladů, které bude nutné vynaložit na výzkum, návrh, vývoj a výrobu objektu. Na druhé straně lze očekávat, že nízká úroveň poruchovosti objektu může vést k nízkým celkovým nákladům v etapě provozu a údržby. To je také důvodem, proč bývá vhodné provádět optimalizaci požadavků na bezporuchovost objektu tak, aby náklady na celý technický život objektu byly pokud možno minimální. Celkové náklady lze z pohledu uživatele vyjádřit jako součet nákladů spojených s akvizicí/pořízením výrobku a nákladů spojených s vlastnictvím výrobku.

Pořizovací/akviziční náklady jsou zpravidla tvořeny nákupní cenou výrobku, ve které se zprostředkovaně odráží všechny předchozí náklady, které musely být výrobcem v průběhu výzkumu, vývoje a výroby vynaloženy. Do pořizovacích nákladů jsou však započítávány rovněž další náklady (například záruční náklady, náklady na instalaci výrobku, náklady na vyškolení obsluhy, apod.)

Mezi vlastnické náklady jsou zpravidla zahrnovány:

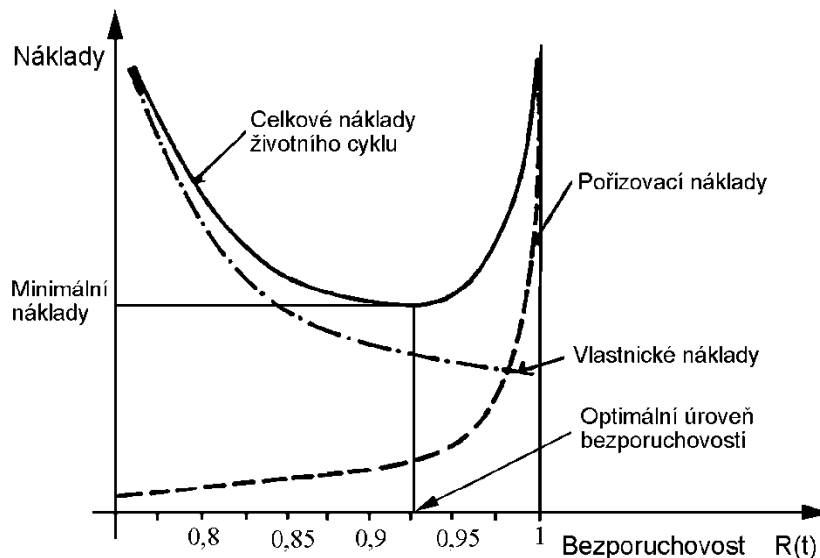
- *Náklady na provoz výrobku:* Lze sem zahrnout materiál a energie, které jsou při provozu produktu spotřebovávány a také další náklady, které se zabezpečením provozu produktu souvisí přímo. Výše nákladů na provoz obvykle není modifikována úrovní bezporuchovosti produktu.
- *Náklady na údržbu po poruše.* Sem lze zahrnout náklady, jež souvisí s identifikací a detekcí příčin vzniku poruch a s jejich odstraňováním opravou. Zahrnují se náklady vynaložené jak na materiál spotřebovaný při provádění opravy (náhradní díly, spotřební materiál, aj.) tak rovněž cena lidské práce vynaložené na provedení dané opravy. Nerealizuje-li se oprava dodavatelsky, pak je třeba sem zahrnout rovněž náklady spojené s dílnami – jejich zřízení a vybavení, dále výcvikem specialistů, energie, atd. Bezporuchovost produktu přímo ovlivňuje koncepci a modifikuje výši těchto typů nákladů. Platí, že se nižší počet poruch je svázán s vyšší mírou inherentní bezporuchovosti a tedy patrně i s nižšími náklady na odstraňování poruch.
- *Náklady na preventivní údržbu.* Tyto typy nákladů obsahují položky spojené s prováděním údržby. Zpravidla se jedná o pevně a dopředu stanovené intervaly nebo podle schémata určitých údržbových kritérií. Hlavním cílem je snížení pravděpodobnosti vzniku poruchy nebo zamezení případnému snížení schopnosti produktu fungovat. Preventivní údržba je zpravidla prováděna dle předem sestavených programů pro údržbu

a/nebo je prováděna na základě analýzy a posuzování přímých/nepřímých diagnostických veličin. Do této třídy jsou začleňovány zpravidla náklady na materiál spotřebovaný při provádění preventivní údržby plus cena lidské práce. Rovněž zde není možné pracovat bez zařízených a vybavených dílen, prostorů, vyškoleného personálu a/nebo speciálního diagnostického vybavení – čili tyto náklady také tvoří nedílnou součást této položky. Také zde míra bezporuchovosti přímo ovlivňuje výši těchto nákladů. Nižší náklady na preventivní údržbu lze očekávat za předpokladu vyšší míry inherentní bezporuchovosti.

- *Náklady z důvodu nepohotovosti produktu.* Jestliže je produkt ve stavu provozu-neschopnosti, tedy ve stavu neschopném (pro poruchu nebo preventivní údržbu) plnit požadované funkce, je možné, že tato situace by pro uživatele mohla představovat finanční ztráty. V některých případech dokonce může znamenat nutnost vynaložení dalších mimořádných výdajů. Tyto náklady/ztráty mohou při posuzování produktů mít velmi významnou úlohu. Zejména je to patrné v situacích, kdy jsou produkty užívány pro komerční účely. Rovněž v tomto případě tedy míra bezporuchovosti modifikuje náklady z důvodu provozu neschopnosti produktu.
- *Další vlastnické náklady.* Další náklady je možné zahrnout do této skupiny. Z pohledu celkových nákladů technického života nemají vždy takový význam. Nicméně mohou být v případě potřeby do hodnocení zahrnuty. Zahrnujeme sem například náklady spojené s provedením plánovaných modernizací, resp. generálních oprav, náklady spojené s odpovědností za škody způsobené produktem, náklady na vypořádání (vyřazení a likvidaci) produktu apod. Bezporuchovost v zásadě neovlivňuje míru těchto vlastnických nákladů.

Bezporuchovost a udržitelnost tedy dle výše uvedeného v mnoha ohledech ovlivňují míru nákladů vynakládaných v průběhu technického života produktu. S jejich vyššími mírami (R&M) lze očekávat snižující se úroveň nákladů.

Charakteristický průběh závislosti úrovně bezporuchovosti a pořizovacích/vlastnických nákladů je uvedený na Obr. 1. Z grafu je také zřejmé, že jistá hodnota bezporuchovosti je představována určitou minimální hodnotou nákladů. Určení kompromisu a rovnováhy mezi minimálními náklady a požadovanou úrovní bezporuchovosti představuje poměrně složitý postup, který přesahuje rámec tohoto textu.



Obr. 1 Průběh závislosti míry bezporuchovosti a nákladů životního cyklu produktu

### 3.2 Specifikace a struktura požadavků na udržovatelnost

Úplnost požadavků na udržovatelnost objektu by měla minimálně zahrnovat tyto složky:

- ukazatele udržovatelnosti v kvantitativní formě;
- ukazatele udržovatelnosti v kvalitativní formě;
- požadavky na schopnost objektu být zkoušen – testovatelnost.

Nicméně musí být dále doplněny informace, které upřesňují, jak a za jakých podmínek tyto požadavky mají být naplněny. Pro tento účel je tedy potřeba uvést zejména:

- podmínky provozu a prostředí, za jakých bude objekt používán;
- u pracovníků zodpovědných za provoz a údržbu potom požadovanou kvalifikaci a jejich odpovědnost;
- v případě, že jsou tyto skutečnosti známy, potom je potřeba mít představu o managementu údržby, který se uplatňuje, a dále představu o přidružených postupech a opatřeních podpory/zajištění údržby.

#### Požadavky na udržovatelnost v kvalitativní formě

Kvalitativní požadavky na udržovatelnost zpravidla korespondují se zavedeným systémem a managementem údržby. Obvyklou situací je, že specifikují požadavky na objekt tak, aby vše bylo v souladu (management a údržba).

Požadavky na udržovatelnost v kvalitativní formě se mohou týkat např. konstrukčního uspořádání objektu, nebo způsobů, kterými je samotná údržba prováděna. Uvádíme příklad některých základních požadavků této formy:

- BITE – vestavěné diagnostické zařízení – musí být s to identifikovat minimálně 95 % poruchových stavů;
- vyměnitelné části objektu musí být konstruovány v tzv. modulovém provedení;
- na objektu musí být možné posouzení technického stavu bez demontáže;
- vyměnitelné části objektu musí být možné demontovat bez použití speciálního nářadí a pomůcek;
- vyžaduje se barevné označení, rozlišení, vizualizace, apod. u všech kontrolních a/nebo seřizovacích míst objektu;
- musí být z pohledu konstrukce objektu zajištěna možnost vizuální kontroly technického stavu hlavních částí;
- vyžaduje se, aby pouze silami obsluhy a na místě používání objektu bylo možné provedení údržby prvního a druhého stupně.

#### Požadavky na udržovatelnost v kvantitativní formě

Kvantitativní požadavky obvykle korespondují s časovým úsekem, ve kterém objekt není (důvodem je provádění údržby) schopen provozu. Souhrnně tuto dobu obvykle charakterizujeme jako *střední dobu aktivní údržby*. Obvykle však nepostačuje její specifikování z důvodu neumožnění vyjádření odlišných priorit u různých objektů.

To je také důvodem, proč se pro specifikaci udržovatelnosti používá celá řada jiných ukazatelů, které jsou odvozeny od monitorování rozdílných dob při aktivním uskutečňování údržby. Příkladně se jedná o:

- střední dobu preventivní údržby;
- střední dobu opravy;
- střední dobu do obnovy;
- střední dobu různých zpoždění (MAD, MLD, MTD), apod.

Samozřejmě je při specifikaci požadavků na udržovatelnost možné kromě těchto ukazatelů využít také využít i další ukazatele, které přímo charakterizují dílčí části udržovatelnosti objektu. Je možné specifikovat například požadavky na:

- pracnost údržby;
- počet pracovníků údržby;
- počet stupňů údržby, na jejich intervaly, apod.

### 3.2.1 Možnosti stanovení požadavků na udržovatelnost v kvantitativní formě

Při stanovení numerických hodnot ukazatelů na udržovatelnost je možné využívat následující postupy:

- odvození z požadavků na pohotovost objektu;
- již dříve zmíněnou optimalizací nákladů a přínosů;
- převzetí numerických hodnot ze specifikace požadavků na udržovatelnost obdobného objektu;
- přijetím požadavků zadavatele (uživatele);
- odborný odhad expertními metodami.

Dále budou podrobněji rozvedeny první dva z výše uvedených přístupů (použití zbývajících postupů je již zřejmé z jejich názvu).

#### Použití požadavků na pohotovost pro odvození požadavků na udržovatelnost

Dle výše uvedeného musí úplná specifikace požadavků na spolehlivost opravovaných objektů obsahovat numerické ukazatele minimálně dvou z následujících vlastností: bezporuchovosti, udržovatelnosti a pohotovosti. Za předpokladu, že u objektu známe požadavky na jeho bezporuchovost a pohotovost, je možné požadavek na udržovatelnost rovněž odvodit.

Opíráme se tedy o znalost požadované míry pohotovosti a bezporuchovosti objektu. Požadavky na udržovatelnost lze relativně jednoduše určit na základě relací, které tyto ukazatele mají.

Například za předpokladu exponenciálního rozložení dob mezi poruchami a dob do obnovy objektu (pro součinitel asymptotické pohotovosti vztah (1)), je možné požadavek na střední dobu do obnovy psát vztahem:

$$MTTR \leq MTBF \cdot \frac{(1 - A)}{A} \quad (4)$$

Analogicky lze z ostatních ukazatelů pohotovosti, resp. bezporuchovosti odvodit i další ukazatele udržovatelnosti.

#### Optimalizace nákladů a přínosů

Abychom zajistili vysokou míru bezporuchovosti, a udržovatelnosti při minimalizaci požadavků na podporu/zabezpečení údržby je někdy třeba hledat kompromis. Rovněž zde je použitelný přístup optimalizace nákladů a přínosů.

Potřeba komplexního posouzení vlivu úrovně bezporuchovosti, udržovatelnosti a přijatého managementu/politiky údržby na celkové náklady technického života objektu je nutná. Je obvyklé, že všechny souvislosti působí navzájem a změny v jedné oblasti mohou mít dopady ve zbývajících oblastech. Specifikaci požadavků na udržovatelnost proto není dobré oddělovat. Musí být prováděna koncepčně, v úzkém souladu se specifikací bezporuchovosti a konkrétní koncepcí údržby posuzovaného objektu.

### 3.3 Požadavků na pohotovost – jejich specifikace a struktura

V technické praxi máme mnoho objektů (jako jsou složité technické/energetické soustavy a systémy – typickou oblastí je vojenská technika), je potřeba společně vnímat problematiku zálohování a udržovatelnosti. To znamená posuzovat možnosti, že určité poruchové stavy by mohly existovat, aniž by tím byla ovlivněna schopnost objektu plnit požadované funkce. U takových produktů bývá dobré, namísto zmiňování samostatných požadavků na bezporuchovost a udržovatelnost, specifikovat rovněž požadavky na pohotovost. Zpravidla jsou využívány požadavky na pohotovost ustálenou nebo asymptotickou.



Vyjádření požadavků na pohotovost bývá buď ve formě desetinného čísla, nebo v procentech. Příkladem může být střední doba použitelného stavu, kterou lze vyjádřit v procentech doby pozorování.

Specifikování kvalitativních požadavků na pohotovost je výjimečné a provádí se pouze tehdy, pokud kvantitativní požadavky na pohotovost objektu nejsou specifikovány s dostatečnou přesností. Může se jednat například o formulaci doby nepoužitelného stavu, která může být za určitých podmínek provozu kritičtější.

Při stanovení požadavků na pohotovost v kvantitativní podobě je vhodné vnímat dva druhy pohotovosti:

- pohotovost inherentní;
- pohotovost operační/provozní.

### Inherentní pohotovost

*Inherentní pohotovost charakterizuje schopnost objektu být ve stavu schopném plnit požadované funkce v daných podmínkách, v daném časovém okamžiku nebo v daném časovém intervalu a to za předpokladu že všechny požadované prostředky jsou zajištěny (tak hovoří definice z IEC 50/191:1990). Tento předpoklad je tedy založen na faktu, že potřebné logistické zdroje (např. prostředky pro údržbu, kvalifikovaní pracovníci, náhradní díly, zkušební zařízení, prostory, diagnostické prostředky, atd.) jsou v případě potřeby k dispozici okamžitě.*

Pokud bychom předpokládali u posuzovaného objektu exponenciální rozložení doby pro bezporuchovost i udržovatelnost, pak je inherentní pohotovost objektu možné vyjádřit s využitím střední doby mezi poruchami (MTBF) a střední doby do obnovy (MTTR). V tomto případě zanedbáváme negativní vlivy preventivní údržby, logistických, technických a administrativních zpoždění. Tento předpoklad je tedy jistou formou ideálního prostředí. V praxi je pro popis inherentní pohotovosti využíván tzv. součinitel (ustálené/asymptotické, limitní/stacionární) pohotovosti vyjádřený vztahem:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (5)$$

Inherentní pohotovost určitým způsobem charakterizuje míru inherentní (vložené/vkonstruované) pohotovosti (spolehlivosti). To vše za předpokladu, že není ovlivňována jinými vlivy než koncepcí a konstrukcí objektu. Naplnění požadavků na inherentní pohotovost je tedy nutné zabezpečit právě dosažením stanovení míry bezporuchovosti v kombinaci s konstrukcí objektu, která umožní snadnou opravitelnost objektu.

### Operační/provozní pohotovost

*Operační pohotovost popisuje schopnost objektu být ve stavu schopném plnit požadované funkce v daných podmínkách, v daném časovém okamžiku nebo v daném časovém intervalu a to ve skutečném provozním prostředí. V této situaci tedy bereme do úvahy vliv údržby pop poruše spolu s uvážením všech druhů různých zpoždění. Operační pohotovost lze vyjádřit následujícím vztahem:*

$$A_o = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad (6)$$

Kde: MUT - střední doba použitelného stavu (mean up time);  
MDT - střední doba nepoužitelného stavu (mean down time).

Provozní/operační pohotovost tedy popisuje nejen úroveň inherentní pohotovosti (spolehlivosti) posuzovaného objektu, ale je také modifikována použitým managementem a politikou údržby, resp. úrovní její podpory/zajištění. Pokud je požadavek na provozní/operační pohotovost specifikován, je nutné vyšetřovat možnosti jeho naplnění jak

u objektu samotného, tak rovněž volbou vhodného managementu/politiky údržby a návrhu podpory/zabezpečení údržby.

#### 4. Závěr

Je zřejmé, že výše prezentované postupy pro rozdělení požadavků na bezporuchovost nejsou použitelné bez znalosti apriorní úrovně spolehlivosti stejných nebo podobných prvků v již známé provozní aplikaci.

V případě, že tyto údaje nejsou k dispozici, lze použít i jiné metody váženého rozdělení požadavků, které jsou založeny na odlišných postupech a principech. Jejich popis však přesahuje rámec tohoto textu a proto zde nebudou uvedeny.

#### Poděkování

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

#### Literatura:

- ARMP-4 - Guidance for writing NATO reliability and maintainability requirements documents (3. Ed.)
- Ayyub B. M. & McCuen R. H. 2003. *Probability, Statistics, and Reliability for Engineers and Scientists*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC.
- Barlow R.E. & Proschan F. 1975. *Statistical theory of reliability and life testing: probability models*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- ČSN EN 60300-3-3 Ed. 2.0 Management spolehlivosti - Část 3-4: Pokyn k použití – Analýza nákladů životního cyklu.
- ČSN EN 60300-3-4 Ed. 2.0 Management spolehlivosti - Část 3-4: Pokyn k použití - Pokyny ke specifikaci požadavků na spolehlivost.
- Holub, R a Vintr, Z. 2004. *Základy spolehlivosti*. Brno: Vojenská akademie.
- Huang, J. & Zuo, M.J. 2002. Dominant multi-state systems. *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 51, no. 1, p.41-47.
- Chandrupatla T. R. 2009. *Quality and Reliability Engineering*. Cambridge: University Press.
- Pham H. 2003. *Handbook of Reliability Engineering*. London: Springer
- Rausand M. & Hoyland A. 2003. *System Reliability Theory models, statistical methods, and applications*. New Jersey: Wiley.
- Stapelberg R. F. 2009. *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*. London: Springer.
- Valis D. and Bartlett L. The Failure Phenomenon: A Critique. *International Journal of Performability Engineering*, [online]. March 2010, Vol.6, No 2. p. 181-190 [cit. 2010-03-16]. ISSN 0973 – 1318. Dostupné z < <http://www.ijpe-online.com/> >.
- Wang H. & Pham H. 2006. *Reliability and optimal maintenance*. London: Springer. ISBN: 978-1-84628-324-6, 352 p.

# ANALÝZA POŽADAVKŮ NA SPOLEHLIVOST DEPENDABILITY REQUIREMENTS ANALYSIS

Ing. Michal VINTR, Ph.D.

e-mail: michal.vintr@usi.vutbr.cz

## 1. Úvod

Cílem tohoto příspěvku je seznámit čtenáře s postupem provádění a specifiky analýzy požadavků na spolehlivost produktu a zejména poukázat na nedostatky a záludnosti, na které je třeba se zaměřit při analýze požadavků. Předpokládá se situace, kdy dodavatel obdrží od svého zákazníka, společně s ostatními požadavky, také požadavky na spolehlivost produktu. Uvedená situace je obvyklá u produktů dodávaných na zakázku konkrétního zákazníka. Dodavatel by v takovém případě měl požadavky zákazníka na spolehlivost pečlivě analyzovat, aby byl schopen rozhodnout, zda je schopen požadavky splnit a jsou pro něj akceptovatelné.

Autor v příspěvku shrnuje svoje dosavadní praktické zkušenosti s analýzou požadavků na spolehlivost prováděnou pro nejrůznější dodavatele, zejména z oblasti železničního průmyslu. Příspěvek si nečiní nárok být podrobným návodem k provádění analýzy požadavků na spolehlivost. Autor se v příspěvku snaží zejména upozornit na různá úskalí, nedostatky a vady požadavků a rizika z nich vyplývající. Příspěvek je psán z pohledu dodavatele (respektive je určen pro dodavatele), který má analyzovat požadavky zákazníka na spolehlivost.

## 2. Postup a výsledky analýzy požadavků na spolehlivost produktu

V odborné literatuře [0], případně standardech [0], [0] lze dohledat, že požadavky na spolehlivost by měly splňovat určitá kritéria. Zejména by měly být:

- úplné;
- jednoznačné;
- nerozporné;
- posuzovatelné;
- sledovatelné.

Analýza požadavků zákazníka na spolehlivost spočívá zejména v posouzení toho, zda:

- požadavky splňují výše uvedená kritéria;
- je dodavatel schopen požadavky splnit;
- jsou pro dodavatele akceptovatelné.

Skutečnost, že dodavatel je schopen požadavky splnit, ještě nemusí nutně znamenat, že je ochoten je splnit (že jsou pro něj akceptovatelné).

Postup analýzy požadavků na spolehlivost není standardizován a je nutné ho vždy volit v závislosti na konkrétní situaci. Autor článku považuje za vhodné, v rámci analýzy požadavků na spolehlivost, realizovat následující základní kroky:

- analyzovat dokumentaci s požadavky;
- analyzovat obecné požadavky související se spolehlivostí;
- analyzovat konkrétní požadavky na spolehlivost (její subvlastnosti);
- rozhodnout, zda jsou požadavky (jednotlivě nebo jako celek) akceptovatelné.

Výsledkem analýzy požadavků na spolehlivost má být vyjádření dodavatele k jednotlivým požadavkům, případně k požadavkům jako celku. Vyjádření se mohou pohybovat od zcela kladných (požadavek je akceptován) až po zcela záporné (požadavek není akceptován). Pokud je možná diskuze se zákazníkem, je vhodné zdůvodnit neakceptování požadavku. To může, v některých případech, vést až ke změně nebo úplnému zrušení daného požadavku.

### 3. Analýza dokumentace s požadavky na spolehlivost produktu

V prvním kroku analýzy požadavků na spolehlivost je nezbytné analyzovat dokumenty, které obsahují požadavky na spolehlivost a dokumenty související.

Cílem je především zjistit, jestli:

- jsou k dispozici všechny dokumenty obsahující požadavky na spolehlivost;
- jsou k dispozici všechny související dokumenty (dokumenty, na které se odkazují požadavky na spolehlivost);
- jsou dokumenty v odpovídajícím jazyce;
- jsou k dispozici aktuální (poslední) verze dokumentů.

V tomto kroku se mohou vyskytnout, mimo jiné, následující nedostatky komplikující (ne-li znemožňující) analýzu požadavků na spolehlivost:

- požadavky se odkazují na neexistující dokumenty, kapitoly a přílohy dokumentů;
- dokumenty se vztahují k jinému produktu (projektu);
- dokumenty nebo jejich části jsou v „jiných“ jazycích;
- dokumenty jsou zjevně neodborně přeloženy.

Shromáždění všech „správných“ dokumentů je pro analýzu požadavků na spolehlivost nezbytné. Pokud se podaří shromáždit všechny „správné“ dokumenty je možné přistoupit k dalšímu kroku analýzy požadavků na spolehlivost.

### 4. Analýza obecných požadavků se vztahem ke spolehlivosti produktu

V druhém kroku analýzy požadavků na spolehlivost je nezbytné analyzovat požadavky, které nestanovují přímo nomenklaturu a číselné hodnoty ukazatelů, ale úzce souvisí se spolehlivostí a často bývají zahrnuty v dokumentech obsahujících požadavky na spolehlivost. Takové požadavky se týkají zejména:

- provozních podmínek produktu;
- časového období života produktu;
- kritérií poruch a mezních stavů;
- kritérií „započitatelnosti“ poruch do hodnocení spolehlivosti;
- zásad ověřování spolehlivosti (metodik a podmínek hodnocení).

Cílem analýzy je především zjistit, jestli:

- jsou úplně a jednoznačně definovány provozní podmínky;
- jsou úplně a jednoznačně definovány podmínky prostředí;
- je úplně a jednoznačně definován profil životního cyklu (úkolů, mise);
- je úplně a jednoznačně definována konfigurace produktů (např. počet produktů v rámci systému, vytížení v provozu, způsob zálohování);
- je v rámci zabezpečování spolehlivosti vyžadováno použití (a dodržení) standardů a databází, které jsou běžně dostupné;
- jsou úplně a jednoznačně definovány kategorie poruch a jejich započitatelnosti (jak z hlediska bezporuchovosti, tak bezpečnosti);
- je požadováno při provádění analýz a modelování spolehlivosti použití standardních metod a postupů (např. standardizovaných);
- má být ověřování spolehlivosti (zkoušky, sledování a vyhodnocování v provozu) prováděno běžnými postupy (např. standardizovanými);
- jsou srozumitelně definovány činnosti, které mají být v rámci zabezpečování spolehlivosti realizovány;
- jsou jednoznačně definovány dokumenty, které mají být v rámci zabezpečování spolehlivosti zpracovány;
- jsou vyžadovány specifické činnosti v rámci zabezpečování spolehlivosti (např. ustanovení „specialisty“ spolehlivosti, spolupráce na vyhodnocování v provozu, apod.);
- jsou definovány sankce za nesplnění požadavků (např. finanční postihy nebo prodlužování záruk).

Mimo skutečnost, že některé informace zcela chybí, se mohou v obecných požadavcích se vztahem ke spolehlivosti vyskytnout následující nedostatky a někdy také záludnosti:

- je vyžadováno použití standardů, které nejsou běžně k dispozici (např. interní firemní standardy) nebo nejsou k dispozici ve „správném“ jazyce (např. národní standardy);
- je vyžadováno použití již neplatných (předchozích nebo zrušených verzí) standardů, případně databází (zejména databází bezporuchovosti);
- profil životního cyklu je zadán nejednoznačně a umožňuje více interpretací;
- není zřejmé, zda se požadavky týkají jednoho nebo více produktů (pokud se produkt v systému vyskytuje více než jedenkrát);
- kategorizace poruch je nejednoznačná a umožňuje různou interpretaci;
- kategorizace poruch je vztažena k celému systému a nelze ji aplikovat na daný produkt (nelze jednoznačně rozhodnout o důsledcích poruch produktu pro celý systém);
- je požadováno zjevně nesmyslné pořadí realizace jednotlivých činností a překládání dokumentů v rámci zabezpečování spolehlivosti;
- je požadováno odevzdání dokumentů v nestandardních formátech nebo zpracování dokumentů s využitím specializovaných softwarových produktů;
- je požadováno provedení ověřování spolehlivosti pomocí nestandardních, resp. neobjektivních postupů (ať již z neznalosti, nebo záměrně);
- je vyžadováno integrovat management spolehlivosti produktu do systému managementu jakosti produktu;
- je požadována výrazná spolupráce nebo spolufinancování při ověřování spolehlivosti;
- jsou definovány sankce za nesplnění požadavků, které jsou za hranicí „dobrých mravů“ (ať již nechtěně, nebo záměrně).

Pokud jsou obecné požadavky se vztahem ke spolehlivosti prosté nedostatků a neobsahují případné záludnosti, je možné přistoupit k dalšímu kroku analýzy požadavků na spolehlivost. V případě, že tomu tak není, je vhodné řešit nastalou situaci se zákazníkem, nebo rovnou požadavky neakceptovat.

## 5. Analýza konkrétních požadavků na spolehlivost produktu

V předposledním kroku je nezbytné analyzovat konkrétní požadavky na spolehlivost, respektive požadavky na její subvlastnosti. Takové požadavky se týkají zejména:

- nomenklatury ukazatelů;
  - číselných hodnot ukazatelů.
- Dále bude kapitola jednotlivě zaměřena na analýzu požadavků:
- na bezporuchovost;
  - na udržovatelnost;
  - na pohotovost;
  - na bezpečnost (ta sice není v subvlastnostech spolehlivosti, ale požadavky na ni velmi často bývají součástí požadavků na spolehlivost);
  - dalších, souvisejících se spolehlivostí.

Požadavkům na poslední subvlastnost spolehlivosti – zajištěnost údržby – nebude věnována samostatná podkapitola, protože zajištěnost údržby je velmi často dána pouze podmínkami použití produktu a nebývá vnitřním požadavkem samotného produktu a požadavky na zajištěnost údržby bývají často slučovány s požadavky na udržovatelnost.

Hlavním úskalím konkrétních požadavků na spolehlivost je fakt, že mnohdy není na první pohled zřejmé, co znamená a vyžaduje splnění konkrétního požadavku. U technických požadavků (např. hmotnost produktu maximálně 120 kg) je obvykle zřejmé, jak je splnit a jak relativně snadno ověřit jejich splnění. Avšak u požadavků na spolehlivost (např. *MTBF* minimálně 100000 hodin, *MTTR* maximálně 1,5 hodiny) je situace nepoměrně složitější a skýtá nejrůznější úskalí.

Analýza konkrétních požadavků na spolehlivost obvykle patří mezi nejnáročnější část analýzy požadavků a vyžaduje odpovídající znalosti nejen v oblasti zabezpečování spolehlivosti a bezpečnosti.

### 5.1 Požadavky na bezporuchovost

Požadavky na bezporuchovost lze rozdělit na kvalitativní a kvantitativní. Nicméně v dokumentech s požadavky nebývají takto striktně rozděleny a je třeba zvládnout je rozlišit.

#### Kvalitativní požadavky na bezporuchovost

Kvalitativní požadavky na bezporuchovost bývají obvykle vyjádřeny formou:

- kritérií návrhu produktu;
- definovaných činností pro zlepšování bezporuchovosti, které se mají realizovat během jednotlivých etap životního cyklu produktu.

Cílem analýzy kvalitativních požadavků na bezporuchovost je především zjistit, jestli:

- jsou požadavky specifikovány a splňují již zmíněná kritéria (úplnost, jednoznačnost, nerozpornost, posuzovatelnost a sledovatelnost);
- existují legislativně specifikované požadavky týkající se daného produktu;
- existují požadavky specifikované ve standardech týkajících se daného produktu;
- dodavatel má představu, jakým způsobem splní požadavky (tzn., ví, jak navrhne produkt a jaké činnosti bude realizovat) a jak případně jejich splnění prokáže;
- je dodavatel schopen požadavky splnit.

Dále jsou uvedeny příklady kvalitativních požadavků na bezporuchovost, jejichž splnění a zejména prokázání splnění může být problematické a proto je potřeba jim věnovat náležitou pozornost:

- požadavek na dosažení vysoké úrovně bezporuchovosti (bez dalších podrobností);
- požadavky týkající se poruch a jejich důsledků (např. „žádná jednotlivá porucha nesmí mít katastrofické důsledky“);
- požadavek na realizaci a prokázání růstu úrovně bezporuchovosti v průběhu návrhu a vývoje produktu;
- požadavek na použití výhradně dat získaných z provozu stejných nebo obdobných produktů.

#### Kvantitativní požadavky na bezporuchovost

Kvantitativní požadavky na bezporuchovost mohou být specifikovány celou řadou ukazatelů, případně jejich kombinací.

Cílem analýzy kvantitativních požadavků na bezporuchovost je především zjistit, jestli:

- jsou požadavky specifikovány;
- existují legislativně specifikované požadavky týkající se daného produktu;
- existují požadavky specifikované ve standardech týkajících se daného produktu;
- je dodavatel (respektive jeho produkt) schopen požadavky splnit.

Nejnáročnějším bodem je poslední uvedený – posouzení schopnosti dodavatele splnit kvantitativní požadavky na bezporuchovost. Posouzení by se mělo skládat ze dvou kroků:

- posouzení jednotlivých požadavků – zda splňují již zmíněná kritéria (úplnost, jednoznačnost, nerozpornost, posuzovatelnost a sledovatelnost);
- posouzení schopností dodavatele – zda je dodavatel schopen požadavky splnit.

V kvantitativních požadavcích se mohou vyskytnout nedostatky a někdy také záludnosti, například:

- není definováno k jakým provozním podmínkám, podmínkám prostředí a profilu životního cyklu (úkolů, mise) se požadavky vztahují;
- jsou používány nestandardní (ne-li neznámé) ukazatele bezporuchovosti;
- požadavky umožňují různou interpretaci („přeurčení“ požadavků);

- jsou zadány výrazně odlišné požadavky na totožné produkty, které budou použity jen v mírně odlišných podmínkách;
- jsou zadány požadavky obtížně splnitelné nebo nespílitelné (ať již nechtěně, nebo záměrně).

Při posuzování schopnosti dodavatele (resp. produktu) splnit jednotlivé kvantitativní požadavky na bezporuchovost je třeba mít informace o předpokládané úrovni bezporuchovosti produktu. Tyto informace lze získat prostřednictvím dat ze zkoušek nebo provozu stejných nebo obdobných produktů. V takovém případě je nutné zohlednit fakt, že stejný produkt bude z hlediska bezporuchovosti dosahovat v různých podmínkách různých výsledků. Výrazný vliv přitom má odlišnost profilu životního cyklu produktu. Pokud dodavatel nemá k dispozici informace o stejných nebo podobných produktech, měl by již ve fázi analýzy požadavků na spolehlivost sestavit alespoň jednoduchý model bezporuchovosti. Při jeho sestavování může využít například principů metody počítání z prvků („parts count“) popsané ve standardu MIL-HDBK-217F 0 a údajů z databází bezporuchovosti a metodik predikce bezporuchovosti.

Dále je při posuzování požadavků na ukazatele bezporuchovosti, zejména na střední dobu provozu mezi poruchami (*MTBF*), nezbytné zohlednit vliv profilu životního cyklu a především jednotky, ve které je ukazatel zadán (např. hodiny, kilometry, počty cyklů, atd.). Například v případě produktu, určeného pro zabudování do dopravního prostředku, lze dokázat, že se zvyšující se průměrnou rychlostí pohybu dopravního prostředku bude hodnota *MTBF* produktu v hodinách klesat a hodnota *MTBF* v kilometrech vzrůstat.

## 5.2 Požadavky na udržovatelnost

Podobně jako u požadavků na bezporuchovost, i požadavky na udržovatelnost lze rozdělit na kvalitativní a kvantitativní. Nicméně v dokumentech s požadavky nebývají takto striktně rozděleny a je třeba zvládnout je rozlišit.

### Kvalitativní požadavky na udržovatelnost

Kvalitativní požadavky na udržovatelnost obvykle úzce souvisí s přijatou politikou údržby a zpravidla specifikují požadavky na objekt takovým způsobem, aby jeho udržovatelnost co možná nejlépe korespondovala s touto politikou údržby.

Kvalitativní požadavky na udržovatelnost se zpravidla týkají buď konstrukčního provedení objektu, nebo způsobu provádění jeho údržby.

Cílem analýzy kvalitativních požadavků na udržovatelnost je především zjistit, jestli:

- jsou požadavky specifikovány a splňují již zmíněná kritéria (úplnost, jednoznačnost, nerozpornost, posuzovatelnost a sledovatelnost);
- dodavatel má představu, jakým způsobem splní požadavky (tzn., ví, jak navrhne produkt a jak navrhne provádění údržby) a jak případně jejich splnění prokáže;
- je dodavatel schopen požadavky splnit.

Dále jsou uvedeny příklady kvalitativních požadavků na udržovatelnost, jejichž splnění může být problematické a proto je potřeba jim věnovat náležitou pozornost:

- požadavek na razantní snížení časů na údržbu oproti současné praxi;
- požadavek na minimalizaci nákladů na údržbu;
- je definován režim údržby (stupně údržby, intervaly údržby, omezení činností a míst údržby na jednotlivých stupních);
- požadavek na „bezúdržbovost“ produktu po celou dobu životního cyklu;
- požadavek na dodání kompletní dokumentace (výkresů, apod.) každému náhradnímu dílu;
- je definován seznam nářadí, které jediné může být použito při údržbě produktu;
- je zakázáno používání speciálních nástrojů při údržbě produktu;
- požadavek na prokázání (demonstraci) udržovatelnosti produktu u zákazníka.

Mezi časté nedostatky v kvalitativních požadavcích na udržovatelnost patří:

- definovaný režim údržby nerespektuje profilu životního cyklu a charakter produktu.

### Kvantitativní požadavky na udržovatelnost

Kvantitativní požadavky na udržovatelnost mohou být specifikovány celou řadou ukazatelů, které jsou založeny na sledování různých dob při provádění údržby.

Cílem analýzy kvantitativních požadavků na udržovatelnost je především zjistit, jestli:

- jsou požadavky specifikovány;
- je dodavatel (respektive jeho produkt) schopen požadavky splnit.

Nejnáročnějším bodem je opět poslední uvedený – posouzení schopnosti dodavatele splnit kvantitativní požadavky na udržovatelnost. Posouzení by se mělo skládat ze dvou kroků:

- posouzení jednotlivých požadavků – zda splňují již zmíněná kritéria (úplnost, jednoznačnost, nerozpornost, posuzovatelnost a sledovatelnost);
- posouzení schopností dodavatele – zda je dodavatel schopen požadavky splnit.

V kvantitativních požadavcích se mohou vyskytnout nedostatky, které jsou analogické s nedostatky uvedenými u kvantitativních požadavků na bezporuchovost.

Dále jsou uvedeny příklady kvantitativních požadavků na udržovatelnost, jejichž splnění může být problematické a proto je potřeba jim věnovat náležitou pozornost:

- jsou definovány minimální intervaly pro výměny dílů (generální opravy);
- jsou definovány maximální povolené časy pro jednotlivé údržbové operace;
- je definován maximální počet pracovníků údržby.

Mezi nejčastější kvantitativní požadavek na udržovatelnost patří požadavek na střední dobu do opravy (*MTTR*). Splnění požadavku na *MTTR* lze do jisté míry ovlivňovat, zejména volbou LRU (vyměnitelných jednotek) a počtem osob, které budou údržbu provádět. Velmi časté jsou také požadavky ekonomického charakteru – požadavky na maximální přípustné náklady na nápravnou a/nebo preventivní údržbu. Jejich splnění lze také do jisté míry ovlivňovat změnami v údržbě a změnami cen.

Při posuzování schopnosti dodavatele (resp. produktu) splnit jednotlivé kvantitativní požadavky na udržovatelnost je třeba mít informace o předpokládané úrovni udržovatelnosti produktu. Ty lze získat s využitím zkušeností s údržbou obdobných prvků, zkušeností s opravářskou činností, expertních odhadů apod.

### **5.3 Požadavky na pohotovost**

Požadavky na pohotovost mají nejčastěji formu kvantitativního požadavku na:

- inherentní pohotovost (*A*);
- operační/provozní pohotovost (*A<sub>o</sub>*).

Cílem analýzy kvantitativních požadavků na pohotovost je především zjistit, jestli:

- jsou požadavky specifikovány;
- je dodavatel (respektive jeho produkt) schopen požadavky splnit.

Nejnáročnějším bodem je opět poslední uvedený – posouzení schopnosti dodavatele splnit kvantitativní požadavky na pohotovost. Posouzení by se mělo skládat ze dvou kroků:

- posouzení jednotlivých požadavků, včetně posouzení konzistentnosti s požadavky na bezporuchovost a udržovatelnost;
- posouzení schopností dodavatele – zda je dodavatel schopen požadavky splnit.

V kvantitativních požadavcích se mohou vyskytnout nedostatky a někdy také záludnosti, například:

- není definováno k jakým provozním podmínkám, podmínkám prostředí a profilu životního cyklu (úroku, mise) se požadavky vztahují;
- jsou zadány výrazně odlišné požadavky na totožné produkty, které budou použity jen v mírně odlišných podmínkách;
- zadané požadavky nejsou konzistentní s požadavky na bezporuchovost (*MTBF*) a/nebo udržovatelnost (*MTTR*);
- jsou zadány požadavky obtížně splnitelné nebo nesplnitelné (ať již nechtěně, nebo záměrně).



Při analýze požadavku na inherentní pohotovost je, mimo jiné, důležité věnovat pozornost tomu, zda se má uvažovat i vliv preventivní údržby a zpoždění. Při analýze požadavku na operační pohotovost je, mimo jiné, důležité věnovat pozornost tomu, jak jsou definovány doby použitelného a nepoužitelného stavu.

Splnění kvantitativních požadavků na pohotovost lze do jisté míry ovlivňovat, a to zejména změnami v údržbě (udržovatelnosti) produktu.

Při posuzování schopnosti dodavatele (resp. produktu) splnit kvantitativní požadavky na pohotovost je třeba mít informace o předpokládané úrovni pohotovosti produktu. Tyto informace lze získat s využitím informací o bezporuchovosti a udržovatelnosti produktu.

#### 5.4 Požadavky na bezpečnost

Požadavky na bezpečnost nejsou sub-vlastností spolehlivosti, ale požadavky na ni velmi často bývají součástí požadavků na spolehlivost.

Požadavky na bezpečnost mohou být:

- kvalitativní (obvykle mají formu definic kritérií návrhu produktu a definovaných činností pro zlepšování bezpečnosti, které se mají realizovat během jednotlivých etap životního cyklu produktu);
- kvantitativní (např. definování maximální přípustné pravděpodobnosti výskytu nežádoucí události nebo definování přípustných a nepřípustných úrovní kritičnosti)

Cílem analýzy kvalitativních i kvantitativních požadavků na bezpečnost je především zjistit, jestli:

- jsou požadavky specifikovány;
- existují legislativně specifikované požadavky týkající se daného produktu;
- existují požadavky specifikované ve standardech týkajících se daného produktu;
- dodavatel má představu, jakým způsobem splní požadavky (tzn., ví, jak navrhne produkt a jaké činnosti bude realizovat, aby byl produkt „bezpečný“) a jak případně jejich splnění prokáže;
- je dodavatel (respektive jeho produkt) schopen požadavky splnit.

Nejnáročnějším bodem je poslední uvedený – posouzení schopnosti dodavatele splnit požadavky na bezpečnost. Posouzení by se mělo skládat ze dvou kroků:

- posouzení jednotlivých požadavků – zda splňují již zmíněná kritéria (úplnost, jednoznačnost, nerozpornost, posuzovatelnost a sledovatelnost);
- posouzení schopností dodavatele – zda je dodavatel schopen požadavky splnit.

V kvalitativních a kvantitativních požadavcích se mohou vyskytnout nedostatky a někdy také záludnosti, například:

- není definováno k jakým provozním podmínkám, podmínkám prostředí a profilu životního cyklu (úkolů, mise) se požadavky vztahují;
- požadavky umožňují různou interpretaci („přeuročení“ požadavků);
- jsou zadány výrazně odlišné požadavky na totožné produkty, které budou použity jen v mírně odlišných podmínkách;
- jsou zadány požadavky obtížně splnitelné nebo nesplnitelné (ať již nechtěně, nebo záměrně).

Dále jsou uvedeny příklady požadavků na bezpečnost, jejichž splnění může být problematické a proto je potřeba jim věnovat náležitou pozornost:

- požadavek na přijetí politiky bezpečnosti;
- požadavek, aby byl produkt bezpečný při poruše („fail-safe“);
- je definována matice rizik (tj. úrovně přípustných a nepřípustných rizik);
- požadavek na využití některého ze standardizovaných přístupů (ALARP, GAMAB nebo MEM) při akceptaci rizik;
- jsou definována nebezpečí, která je nezbytné brát v úvahu;
- požadavek na prokázání úrovně integrity bezpečnosti (SIL);
- požadavky v oblasti požární bezpečnosti produktu.

## 5.5 Další požadavky související se spolehlivostí

Současně s konkrétními požadavky na spolehlivost produktu se mohou vyskytovat další požadavky související se zabezpečováním spolehlivosti, které nelze zařadit do dosud uvedených kategorií požadavků. Dále jsou uvedeny příklady takových požadavků, kterým je potřeba věnovat náležitou pozornost:

- požadavek na vypracování programu spolehlivosti a/nebo bezpečnosti;
- požadavek na provedení analýzy nákladů životního cyklu produktu (LCC);
- požadavek na maximální přípustnou hodnotu nákladů životního cyklu;
- je přesně specifikováno, jaké dokumenty mají být zpracovány a předloženy zákazníkovi v rámci zabezpečování spolehlivosti;
- požadavek na zapojení do systému hlášení poruch, jejich analýzy a nápravných opatření (FRACAS).

## 6. Rozhodnutí o akceptaci požadavků

Pokud dodavatel na základě analýzy zjistí, že je schopen všechny požadavky na spolehlivost splnit, musí učinit poslední krok – musí rozhodnout, zda jsou pro něj požadavky (jednotlivě nebo jako celek) akceptovatelné. Skutečnost, že dodavatel je schopen požadavky splnit, ještě nemusí nutně znamenat, že je ochoten je splnit.

Při rozhodování o akceptovatelnosti požadavků je nezbytné brát v úvahu nejen technické aspekty (tj. zejména aspekty spolehlivosti), ale také aspekty ekonomické, marketingové, politické apod.

Pokud dodavatel v průběhu analýzy požadavků na spolehlivost zjistí, že není schopen některé nebo všechny požadavky splnit, nezbyvá mu než požadavky neakceptovat, vyjma situací popsaných dále. V některých situacích, pokud je možná diskuze se zákazníkem, je vhodné sdělit, případně prodiskutovat, důvody neakceptování požadavků. To může, v některých případech, vést až ke změně nebo úplnému zrušení požadavku nebo požadavků. Dodavatel se také může rozhodnout akceptovat nesplnitelné požadavky, protože jejich nesplnění mu způsobí jen minimální ztráty (například proto, že nejsou definovány sankce za nesplnění požadavků) nebo jsou ztráty kompenzovány v jiných oblastech (např. dodavatel chce, i za cenu ztrát, proniknout na nový trh).

Někdy se lze setkat s kvantitativními požadavky, u kterých není uvedena číselná hodnota, ale dodavatel je žádán k definování, čeho je schopen dosáhnout (k doplnění a tudíž akceptování vlastní hodnoty ukazatele).

## 7. Závěr

Příspěvek seznámil čtenáře s postupem provádění a specifiky analýzy požadavků na spolehlivost produktu a zejména poukázal na nedostatky a záludnosti, na které je třeba se zaměřit při analýze požadavků na spolehlivost produktu. Příspěvek si nečiní nárok být podrobným návodem k provádění analýzy požadavků na spolehlivost.

V požadavcích na spolehlivost se mohou vyskytovat nejrůznější nedostatky a záludnosti. Mezi nejčastější patří:

- chybějící informace a dokumenty;
- neúplně zadané požadavky umožňující různou interpretaci;
- požadavky obtížně splnitelné nebo nesplnitelné;
- požadavek na provedení ověřování spolehlivosti pomocí neobjektivních postupů.

Výjimečně se lze setkat i s požadavky, které „zkouší, co dodavatel vydrží“ (ve kterých jsou obsaženy naprosto nereálné požadavky). Takové požadavky bývají nereálné buď z neznalosti, nebo záměrně. V případě neakceptování takových požadavků není neobvyklé, že zákazník požadavky „změkčí“ nebo dokonce zcela zruší.

Analýze požadavků na spolehlivost musí být věnována dostatečná pozornost a musí být prováděna kvalifikovanou osobou/osobami. Pokud tomu tak nebude, hrozí, že bude akceptováno nespelnitelné, což může mít fatální důsledky.

Největším problémem požadavků na spolehlivost je fakt, že mnoho „nebezpečí“ je skrytých a není patrných na první pohled. Proto je nezbytné vždy provést podrobnou analýzu požadavků na spolehlivost.

#### **Literatura:**

- ARMP-4. Guidance for Writing NATO R & M Requirements Documents (Edition 3). Brussels: NSA, 2003.
- ČSN EN 50126. *Drážní zařízení – Stanovení a prokázání bezporuchovosti, pohotovosti, udržitelnosti a bezpečnosti (RAMS)*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- ČSN EN 60300-3-4. *Management spolehlivosti – Část 3-4: Pokyn k použití – Pokyny ke specifikaci požadavků na spolehlivost*. Praha: ÚNMZ, 2008.
- Holub, R. a Vintř, Z. *Aplikované techniky spolehlivosti. Část 1. – Specifikace požadavků na spolehlivost*. Brno: Vojenská akademie v Brně, 2002.
- Kraus, J. Management spolehlivosti ve výrobě pohonů trakčních vozidel. In *Případové studie realizace projektů spolehlivosti*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2012, s. 19–31. ISBN 978-80-02-02363-0.
- MIL-HDBK-217F. *Military Handbook: Reliability Prediction of Electronic Equipment*. Washington: Department of Defense, 1991.
- Murthy, D.N.P. and Rausand, M. – Østerås, T. *Product Reliability: Specification and Performance*. London: Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-1-84800-270-8.

# ALOKACE POŽADAVKŮ NA SPOLEHLIVOST DEPENDABILITY REQUIREMENTS ALLOCATION

prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc.  
Ing. Tomáš VINTR

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

## 1. Úvod – místo a úloha alokace požadavků na spolehlivost v programu spolehlivosti

Proces kvantifikace požadavků na spolehlivost nekončí specifikací požadavků na spolehlivost systému jako celku nebo jeho jednotlivých funkcí, ale musí následovat rozdělení těchto souhrnných požadavků na jednotlivé prvky systému. Tento proces se nazývá alokací požadavků na spolehlivost (ČSN IEC 300-3-4).

Alokace požadavků na spolehlivost je důležitým úkolem v programu spolehlivosti, který se realizuje v etapě návrhu a vývoje systému za účelem rozvržení (alokace) požadavků na jednotlivé části systému. Cílem úkolu je určit požadavky na spolehlivost každé části systému tak, aby stanovené požadavky splňoval i systém jako celek. Alokace požadavků na spolehlivost přitom není jednorázovou činností, ale jde o proces, který je úzce svázán s vlastním procesem návrhu a vývoje výrobku a jehož dílčí kroky se mohou opakovat v souvislosti se změnami návrhu či na základě optimalizačních studií.

## 2. Proces alokace požadavků na bezporuchovost

U složitých technických systémů zpravidla není možné přímo kvantifikovat požadavky na spolehlivost jednotlivých prvků, ale je nutné provádět postupnou dekompozici požadavků v závislosti na složitosti a funkční struktuře systému. Základním východiskem zde je definování jednotlivých úrovní složitosti systému, které jsou charakterizovány prvky, jež jsou na dané úrovni považovány za dále nedělitelné. Příklad takového rozčlenění systému je naznačen na Obr. 2. Alokace požadavků na spolehlivost se potom provádí postupně po jednotlivých zvolených úrovních složitosti systému. Požadavky kladené na celý systém se v prvním kroku rozloží na jednotlivé subsystémy, ve druhém kroku se požadavky kladené na jednotlivé subsystémy rozloží na jejich montážní skupiny a stejným způsobem se pokračuje přes všechny zvolené úrovně složitosti systému až k jednotlivým součástem (dále nedělitelným objektům). Celý proces přitom musí být realizován tak, že stanovené požadavky na spolehlivost jednotlivých prvků zajistí splnění požadavků stanovených pro systém jako celek (Vintr & Holub, 2002). Musí být tedy zajištěno že:

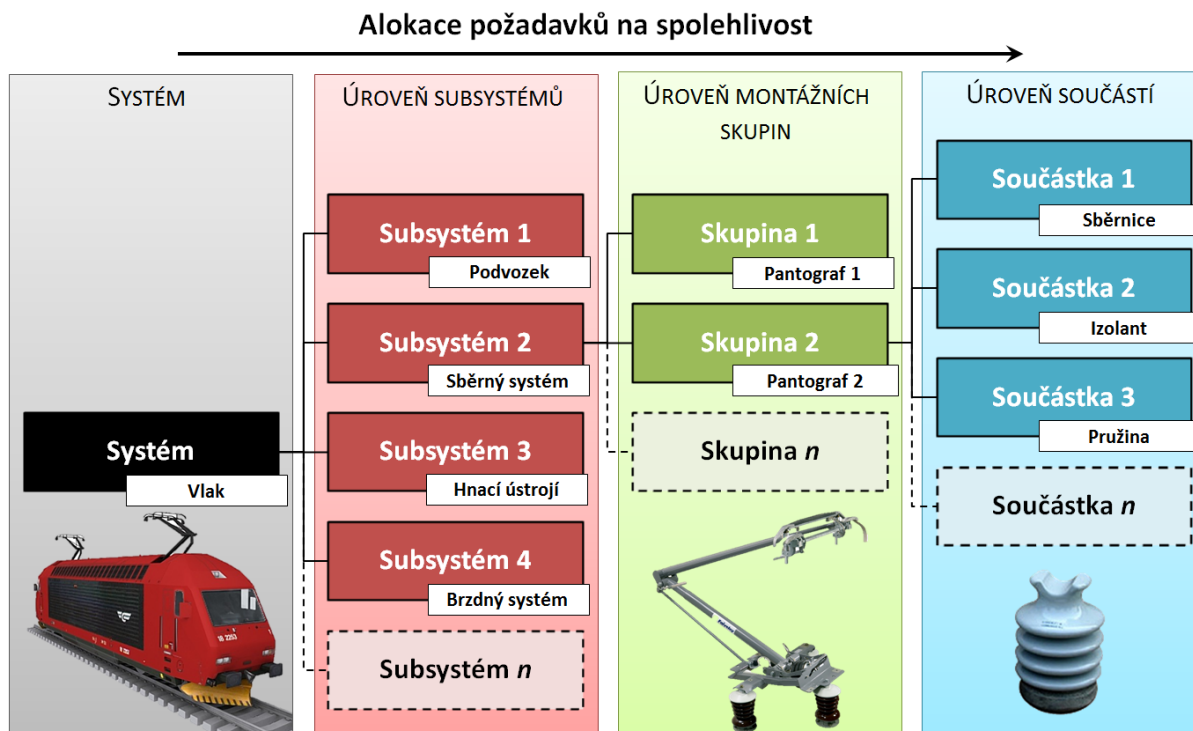
$$U_S \geq U_S^* \quad (1)$$

kde:  $U_S$  - úroveň spolehlivosti systému, daná úrovní spolehlivosti jednotlivých prvků systému specifikované při alokaci s uvážením struktury systému;

$U_S^*$  - požadovaná úroveň spolehlivosti systému.

Úroveň spolehlivosti je zde obecně chápána v souladu s definicí spolehlivosti, jako úroveň pohotovosti případně činitelů, které ji ovlivňují, tj. bezporuchovosti, udržovatelnosti a zajištěnosti údržby. Prakticky se tato úroveň spolehlivosti vyjadřuje vhodnými ukazateli pohotovosti, bezporuchovosti a udržovatelnosti. V procesu rozdělování požadavků na spolehlivost je třeba průběžně prověřovat vhodnost použití jednotlivých ukazatelů spolehlivosti a v případě potřeby na nižších úrovních struktury výrobku zavádět i jiné ukazatele, než které byly definovány ve specifikaci pro vlastní výrobek. To vyplývá ze

skutečnosti, že jednotlivé díly výrobku mohou mít z hlediska spolehlivosti jiný charakter než finální výrobek. Například opravovaný výrobek může být sestaven z neopravených dílů.



Obr. 2 Dekompozice systému na nižší úrovně

### 3. Metody a postupy alokace požadavků na spolehlivost

V souladu s definicí spolehlivosti lze metody rozdělit na metody alokace:

- požadavků na bezporuchovost;
- požadavků na udržitelnost;
- požadavků na pohotovost.

Z hlediska přístupu k rozdělení požadavků lze metody alokace požadavků na spolehlivost (bezporuchovost, udržitelnost nebo pohotovost) rozdělit do dvou základních skupin

- metody rovnoměrného rozdělení požadavků;
- metody váženého rozdělení požadavků.

#### 3.1 Rovnoměrné rozdělení požadavků

Při rovnoměrném rozdělení jsou požadavky na spolehlivost alokovány rovnoměrně mezi jednotlivé prvky na dané úrovni systému. Tento přístup se využívá především v raných fázích návrhu, kdy není k dispozici dostatek informací o systému (Vintr & Holub, 2002).

Dále bude naznačen postup rovnoměrné alokace pro jeden z ukazatelů bezporuchovosti a to pro pravděpodobnost bezporuchového stavu. Postup alokace pro jiné ukazatele spolehlivosti by byl analogický.

Předpokládejme, že u jistého systému je požadováno, aby pro pravděpodobnost jeho bezporuchového stavu  $R_S$  platilo:

$$R_S \geq R_S^*, \quad (2)$$

kde:  $R_S^*$  je požadovaná pravděpodobnost bezporuchového provozu systému.

Pro pravděpodobnost bezporuchového stavu sériové struktury, složené z  $n$  prvků, jejichž pravděpodobnost bezporuchového stavu je rovna  $R_i$ , platí vztah:

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i \quad (3)$$

a pro pravděpodobnost bezporuchového stavu paralelní struktury platí:

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (4)$$

S využitím rovnice (2) a (3) můžeme pro požadovanou hodnotu pravděpodobnosti bezporuchového stavu jednotlivých prvků sériové struktury psát:

$$R_i^* \geq \sqrt[n]{R_S^*} \quad (5)$$

a pro pravděpodobnost bezporuchového stavu jednotlivých prvků paralelní struktury podle rovnice (2) a (4) platí:

$$R_i^* \geq 1 - \sqrt[n]{1 - R_S^*}. \quad (6)$$

Rovnoměrná alokace požadavků na spolehlivost zohledňuje jen typ struktury a počet prvků v této struktuře. Racionální řešení praktických úloh alokace požadavků na spolehlivost však vyžaduje zohlednění odlišnosti prvků a celé řady dalších kritérií. K tomu se využívají různé metody váženého rozdělení požadavků na spolehlivost.

### 3.2 Vážené rozdělení požadavků

Základním principem racionální alokace požadavků na spolehlivost na jednotlivých úrovních složitosti systému je stanovení určité významnosti (váhy) každého prvku ve struktuře systému. Významnost jednotlivých prvků systému potom může být dána na základě:

- znalostí (o spolehlivosti obdobných systémů/prvků);
- hodnocení kritérií (ovlivňující spolehlivost systémů/prvků).

#### 3.2.1 Metody založené na znalosti

Při těchto metodách alokace se využívají údaje o spolehlivosti stejných nebo podobných prvků u systémů obdobného charakteru a požadavek je alokován proporcionálně k těmto údajům (Wessels, 2010).

Typickým představitelem těchto metod je metoda ARINC vyvinutá poradní skupinou společností Aeronautical Radio Inc. Metoda ARINC slouží k alokaci požadavku na bezporuchovost, který je dán hodnotou intenzity poruch systému. Dále bude popsán postup rozdělení požadavku na bezporuchovost založený na metodě ARINC.

#### Příklad váženého rozdělení požadavků u systému se sériovým uspořádáním prvků

Prezentovaný postup vychází z předpokladu, že rozdělení dob mezi poruchami u jednotlivých prvků má exponenciální charakter a proto platí:

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (7)$$

kde:  $\lambda_S$  - intenzita poruch celého systému;  
 $\lambda_i$  - intenzita poruch  $i$ -tého prvku systému;  
 $n$  - počet prvků systému.

Dále se předpokládá, že jsou k dispozici informace o bezporuchovosti (vyjádřené formou intenzity poruch) stejných nebo podobných prvků v jiných systémech, dlouhodobě sledovaných v provozu. Jestliže každému prvku systému, u něhož je prováděna alokace tímto způsobem, přidělíme jistou hodnotu intenzity poruch, můžeme potom význam každého prvku vyjádřit s využitím tzv. váhového faktoru, který je definován vztahem:

$$\omega_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (8)$$

Z této rovnice je patrné, že pro váhy prvků musí platit:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (9)$$

Vlastní postup alokace lze rozdělit do následujících kroků:

- Každému prvku systému se přidělí určitá (apriorní) hodnota intenzity poruch odvozená ze znalosti bezporuchovosti stejných nebo podobných prvků použitých u systémů obdobného charakteru.
- Na základě těchto intenzit poruch se určí pro každý prvek podle rovnice (8) příslušný váhový faktor.
- Určí se požadované hodnoty intenzity poruch jednotlivých prvků  $\lambda_i^*$ , které zajistí dosažení požadované intenzity poruch  $\lambda_S^*$  u systému jako celku podle vztahu:

$$\lambda_i^* \leq \omega_i \lambda_S^* \quad (10)$$

Snadno lze odvodit, že pro celý systém musí být splněna podmínka:

$$\lambda_S^* \geq \sum_{i=1}^n \omega_i \lambda_i^* \quad (11)$$

#### Příklad váženého rozdělení požadavků u systému s paralelním uspořádáním prvků

Analogicky lze zformulovat i postup váženého rozdělení požadavků na bezporuchovost u systému s paralelním uspořádáním prvků. Opět se předpokládá exponenciální rozdělení dob mezi poruchami. V tomto případě je postup založen na platnosti přibližného vztahu:

$$\lambda_S = \prod_{i=1}^n \lambda_i \quad (12)$$

který, lze aplikovat pouze v případě, že platí podmínka  $\lambda t \ll 1$ , která je zpravidla u moderních vysoce spolehlivých systémů dostatečně splněna.

Váhový faktor se v tomto případě vyjádří vztahem:

$$\psi_i = \frac{\lambda_i}{\prod_{i=1}^n \lambda_i} \quad (13)$$

přičemž pro váhové faktory platí:

$$\prod_{i=1}^n \psi_i = 1 \quad (14)$$

Vlastní postup alokace je obdobný s postupem naznačeným u systému se sériově uspořádanými prvky, s tím že v tomto případě platí následující vztahy:

$$\lambda_i^* \leq \psi_i \lambda_S^* \quad (15)$$

$$\lambda_S^* \geq \prod_{i=1}^{i=n} \psi_i \lambda_i^* \quad (16)$$

Je zřejmé, že výše prezentované postupy pro rozdělení požadavků na bezporuchovost nejsou použitelné bez znalosti apriorní úrovně spolehlivosti stejných nebo podobných prvků v již známé provozní aplikaci.

V případě, že tyto údaje nejsou k dispozici, lze použít i jiné metody váženého rozdělení požadavků, které jsou založeny na odlišných postupech a principech.

### 3.2.2 Metody založené na alokačních kritériích

Při těchto metodách je významnost (váha) prvků systému určena podle stanovených kritérií, kterými mohou například být (Stapelberg, 2009):

- složitost prvku;
- důsledek poruchy prvku;
- udržitelnost prvku;
- náklady na opravu, případně údržbu prvku;
- poměr ceny a úrovně spolehlivosti;
- minimalizace rozměrů, hmotnosti apod.;
- možnosti detekce poruchy atd.

Tato hladina významnosti může být při praktickém řešení vyjádřena různými způsoby, které jsou závislé na charakteru příslušného ukazatele a typu příslušné struktury.

Dále bude naznačen obecný postup váženého rozdělení bezporuchovost založený, na bodovém hodnocení faktorů, které ovlivňují úroveň bezporuchovosti prvků systému.

Předpokládejme, že systém se skládá z  $n$  vzájemně nezávislých prvků, které tvoří z hlediska bezporuchovosti sériovou strukturu. Pak lze vyjádřit pravděpodobnost bezporuchového provozu  $i$ -tého prvků tohoto systému následovně:

$$R_i^* = (R_S^*)^{w_i} \quad (17)$$

kde:  $w_i$  - váhový faktor  $i$ -tého prvku, přičemž pro váhové faktory platí:

$$\sum_{i=1}^{i=n} w_i = 1 \quad (18)$$

V případě exponenciálního rozdělení dob mezi poruchy lze rovnici (17) upravit do tvaru:

$$\lambda_i^* \leq w_i \lambda_S^* \quad (19)$$

Váhový faktor  $i$ -tého prvku se vyjádří vztahem

$$w_i = \frac{\Theta_i}{\sum_{i=1}^n \Theta_i} \quad (20)$$

kde:  $\Theta_i$  - celkové bodové hodnocení  $i$ -tého prvku, jehož hodnota je určena na základě číselného hodnocení zvolených faktorů dle rovnice:

$$\Theta_i = r_{i1} r_{i2} r_{i3} r_{i4} \dots r_{ik} \quad (21)$$

kde  $r_{ik}$  - bodové hodnocení  $k$ -tého faktoru  $i$ -tého prvku.



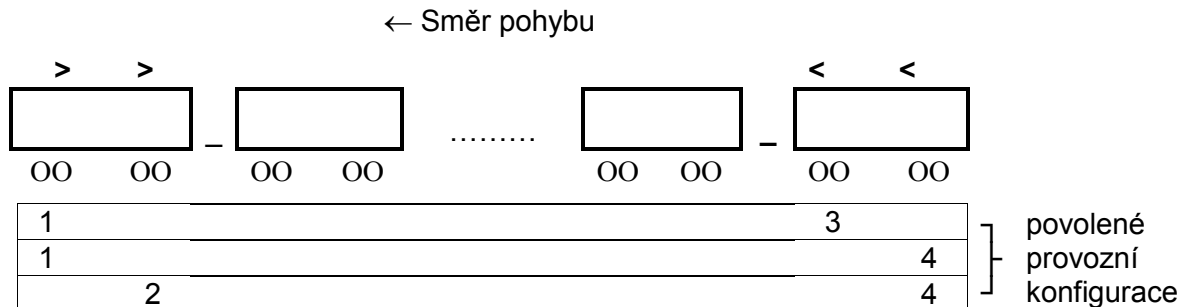
Každému faktoru  $r_{ik}$  z rovnice (21) je přiřazeno číslo ze stupnice od 1 do 10. Hodnota jednotlivých faktorů se určuje např. na základě expertních odhadů nebo na základě znalostí a zkušeností návrhářů.

Volba daných faktorů je ovlivněna typem systému a jeho použitím. Uvedený postup vychází z alokační metody FOO (Feasibility of Objectives). Metoda FOO byla primárně určena pro mechanicko-elektrické systémy a alokuje požadavek s ohledem na čtyři faktory: složitost, state-of-the-art, dobu a prostředí provozu prvků systému.

#### 4. Praktický příklad alokace požadavků na bezporuchovost

Prezentováno bylo několik základních metod a postupů alokace požadavků na spolehlivost. Při praktické alokaci požadavků na spolehlivost je nutné tyto metody a postupy vhodně upravovat a přizpůsobovat charakteru řešeného systému a jeho struktuře. Postupy a metody alokace požadavků na spolehlivost prezentované v předchozí kapitole lze relativně snadno aplikovat v případě, kdy předmětný systém má jednoduchou, čistě sériovou nebo paralelní strukturu. Pokud je struktura systému složitější, celý proces alokace se výrazně komplikuje a je nezbytné jednotlivé postupy a metody kombinovat či hledat nové postupy.

Dále je uveden příklad alokace požadavků na bezporuchovost systému využívajícího netriviální způsob zálohování. Jedná se o systém sbírání proudu u vlakové soupravy se dvěma lokomotivami umístěnými na začátku a konci soupravy (viz Obr. 2). Každá z těchto lokomotiv je vybavena dvěma konstrukčně shodnými pantografy (sběrači proudu), v činnosti přitom může být na každé lokomotivě nejvýše jeden pantograf. Pro zabezpečení správné činnosti je totiž také nezbytné, aby mezi jednotlivými pantografy, které současně sbírají proud, byla jistá minimální vzdálenost, jejíž dosažení je zajištěno pouze při určitých provozních konfiguracích pantografů, které jsou znázorněny v Obr. 2 (čísla v tabulce vyjadřují pořadová čísla pantografů od začátku soupravy). Při pohybu pantografu po trolejovém vedení totiž dochází k rozkmitání vedení, a pokud by předepsaná minimální vzdálenost mezi pantografy nebyla dodržena, mohlo by dojít k poškození pantografů či trolejového vedení. Dále je požadováno, aby vlaková souprava byla trvale poháněna oběma lokomotivami. Operátor vlakové soupravy smí během provozu použít kteroukoli z povolených konfigurací pantografů.



Obr. 3 Povolené provozní konfigurace pantografů

V technických požadavcích na systém sběru proudu vlakové soupravy je stanoveno, že pravděpodobnost bezporuchového provozu (během doby provozu  $t$ )  $R_S$  nesmí být menší než požadovaná hodnota  $R_S^*$ :

$$R_S \geq R_S^* \tag{21}$$

Cílem alokace je v tomto případě stanovení požadavku na úroveň bezporuchovosti jednotlivého pantografu charakterizovanou pravděpodobností bezporuchového provozu pantografu  $R_p^*$ . Další řešení je založeno na zjednodušeném předpokladu, že se vlaková souprava se po celou dobu své živnosti pohybuje jedním směrem. Dále se předpokládá, že

všechny pantografy jsou konstrukčně shodné a budou mít stejnou úroveň bezporuchovosti. Ve své podstatě se tedy jedná o rovnoměrné rozdělení požadavků na bezporuchovost.

Naznačenou úlohu lze řešit mnoha způsoby, avšak vzhledem k jejímu charakteru se zde jako výhodný postup nabízí využití pravdivostní tabulky. Do tabulky se zaznamenají všechny potenciálně možné kombinace poruchových a provozuschopných stavů jednotlivých pantografů a každé takové kombinaci se přiřadí stav celého systému s ohledem povolené provozní konfigurace pantografů tak, jak je to ukázáno v následující tabulce.

Tab. 1 Možné stavy systému sběru proudu

P.č.	Pořadové číslo pantografu				Stav systému	Pravděpodobnost nastoupení příslušného stavu
	1	2	3	4		
	Stav pantografu					
1	1	1	1	1	1	$R_1R_2R_3R_4$
2	1	1	1	0	1	$R_1R_2R_3Q_4$
3	1	1	0	1	1	$R_1R_2Q_3R_4$
4	1	0	1	1	1	$R_1Q_2R_3R_4$
5	0	1	1	1	1	$Q_1R_2R_3R_4$
6	1	1	0	0	0	$R_1R_2Q_3Q_4$
7	1	0	0	1	1	$R_1Q_2Q_3R_4$
8	0	0	1	1	0	$Q_1Q_2R_3R_4$
9	0	1	1	0	0	$Q_1R_2R_3Q_4$
10	1	0	1	0	1	$R_1Q_2R_3Q_4$
11	0	1	0	1	1	$Q_1R_2Q_3R_4$
12	1	0	0	0	0	$R_1Q_2Q_3Q_4$
13	0	1	0	0	0	$Q_1R_2Q_3Q_4$
14	0	0	1	0	0	$Q_1Q_2R_3Q_4$
15	0	0	0	1	0	$Q_1Q_2Q_3R_4$
16	0	0	0	0	0	$Q_1Q_2Q_3Q_4$

Poznámka: hodnota „0“ značí poruchový stav a hodnota „1“ provozuschopný stav.

V posledním sloupci tabulky je pro každou kombinaci vyjádřena pravděpodobnost nastoupení této kombinace přičemž pro pravděpodobnost bezporuchového stavu  $i$ -tého pantografu platí:

$$R_i = \exp(\lambda_i \cdot t) \quad (22)$$

a pro pravděpodobnost poruchy platí:

$$Q_i = 1 - R_i \quad (23)$$

přičemž  $\lambda_i$  značí intenzitu poruch  $i$ -tého pantografu (předpokládá se exponenciální rozdělení dob mezi poruchami).

Pravděpodobnost toho, že po předpokládanou dobu provozu  $t$  bude celý systém v provozuschopném stavu lze s využitím pravdivostní tabulky stanovit jako součet pravděpodobností uvedených v těch řádcích, které vyjadřují některou z provozuschopných kombinací systému:

$$R_S = R_1R_2R_3R_4 + R_1R_2R_3Q_4 + R_1R_2Q_3R_4 + R_1Q_2R_3R_4 + Q_1R_2R_3R_4 + R_1Q_2Q_3R_4 + R_1Q_2R_3Q_4 + Q_1R_2Q_3R_4 \quad (24)$$

Pro další řešení se vychází z požadavku, že úroveň bezporuchovosti všech použitých pantografů je stejná a platí tedy:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_p \quad (25)$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = Q_p \quad (26)$$

Potom lze rovnici (23) přepsat do následujícího tvaru:

$$R_S = R_p^4 + 4R_p^3 Q_p + 3R_p^2 Q_p^2 \quad (27)$$

a po dosazení za  $Q_p$  dle rovnice (23) a vhodných úpravách obdržíme výsledný vztah ve tvaru:

$$R_S = 3R_p^2 - 2R_p^3 \quad (28)$$

Pokud vezmeme do úvahy celkový požadavek na úroveň bezporuchovosti systému daný nerovnicí (21) lze rovnici (28) přepsat do následujícího tvaru, který implicitně vyjadřuje požadavek na úroveň bezporuchovosti pantografu  $R_p^*$ :

$$R_S^* \leq 3R_p^{*2} - 2R_p^{*3} \quad (29)$$

Vyřešením této nerovnice potom obdržíme požadavek na pravděpodobnost bezporuchového provozu pantografu, ze kterého lze s využitím rovnice (22) určit i požadovanou úroveň intenzity poruch pantografu:

$$\lambda_p^* = \frac{-\ln R_p^*}{t} \quad (30)$$

Praktické řešení nerovnice (29) zde není vzhledem k zaměření článku prezentováno, protože představuje čistě matematický problém.

## 5. Závěr

Vzhledem k omezenému rozsahu článek nemohl postihnout všechny aspekty související s problematikou alokace požadavků na spolehlivost a prezentuju pouze základní metody a postupy alokace požadavků na bezporuchovost, které jsou zpravidla využitelné u jen relativně jednoduchých technických systémů.

V případě složitých systémů s komplexními způsoby zálohování funkcí může alokace požadavků představovat poměrně složitý problém, řešitelný jen s využitím sofistikovaných metod a za podpory výpočetní techniky. V praxi se však často můžeme setkat i se zdánlivě jednoduchými systémy, u kterých však běžné techniky alokace požadavků selhávají a je třeba hledat netradiční řešení, tak jak to je ukázáno na příkladu systému sběru proudu kolejového vozidla.

## Poděkování

Tento příspěvek byl sestaven s podporou Ministerstva obrany České republiky, díky Projektu pro rozvoj organizace UO/FVT-K202.

## Literatura:

- ČSN IEC 300-3-4 Management spolehlivosti Část 3: Návod k použití Oddíl 4: Pokyny ke specifikaci požadavků na spolehlivost
- Vintr, Z., Holub, R. 2002. Aplikované techniky spolehlivosti. Část 1. Specifikace požadavků na spolehlivost [Skriptum]. Brno: Vojenská akademie v Brně.
- Stapelberg, R. F. 2009. Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design. London: Springer.
- Wessels, W. R. 2010. Practical reliability engineering and analysis for system design and life-cycle sustainment. Boca Raton: CRC Press.

# **EKONOMICKÉ ASPEKTY OPTIMALIZACE POŽADAVKŮ NA SPOLEHLIVOST ECONOMICAL ASPECTS OF DEPENDABILITY REQUIREMENTS OPTIMISATION**

Doc. Ing. Pavel FUCHS, CSc., Ing. Julie VOLFOVÁ  
Fakulta Mechatroniky, informatiky a mezioborových studií  
Studentská 2  
Technická univerzita v Liberci  
461 17 Liberec  
e-mail: pavel.fuchs@tul.cz

Ing. Jan KRAUS – Škoda Electric a.s.  
Tylova 1/57  
316 00 Plzeň  
e-mail: jan.kraus@skoda.cz

## **1 ÚVOD**

Název příspěvku evokuje zdánlivě jednoduchou problematiku. Avšak zdání klame. Jak spolehlivost, tak ekonomika mají řadu aspektů. Samy o sobě jsou souhrnem vlastností objektů a vazeb a nelze je jako souhrn popsat jedním ukazatelem a kvantifikovat jeho hodnotou. Proto je škála úloh ekonomické optimalizace s vazbou na spolehlivost neobyčejně rozsáhlá a pestrá. Jejich, byť rámcový, výčet by byl rozsáhlý a zcela určitě, z jiných úhlů pohledu na tuto problematiku, neúplný. Proto se zřejmě musíme spokojit s názorem, že uplatňování spolehlivosti bez vazby na ekonomiku je možné jen v teoretických výzkumech. Ale pro každodenní praxi je spolehlivost bez ekonomiky fádni a nezajímavá. Budiž technikům útěchou, že to platí i obráceně, byť řada ekonomů si to nepřipouští. Teprve v racionálním sepětí obou disciplín se lze dobrat efektivních řešení. Prezentovaný příspěvek se proto snaží alespoň dílčím způsobem ukázat příklad tohoto sepjetí. Zvoleným příkladem je rozhodování o velké investici do modernizace technologického uzlu s nevyhovujícími parametry spolehlivosti. A to na základě ekonomického posuzování investičních variant s rozdílnými investičními náklady, s rozdílnými náklady životního cyklu a samozřejmě s rozdílnou spolehlivostí.

## **2 EKONOMICKÉ ÚVAHY**

### **2.1 Náklady životního cyklu výrobku (LCC)**

V poslední době se z hlediska řízení celkových nákladů a zisků produktů uplatňuje přístup sledování jejich ekonomického životního cyklu. Ekonomický životní cyklus představuje období, po které produkt vyvolává náklady, nebo přináší výnosy. Obecně je tedy vymezen obdobím vynaložení prvního a posledního nákladu souvisejícího s výkonem na produktu. Podstatnou složkou této metody je kromě etap životního cyklu identifikace všech činností, které se v těchto etapách provádějí, včetně analýzy vztahu těchto činností k výkonnosti, bezpečnosti, bezporuchovosti, udržovatelnosti a k dalším znakům ovlivňujícím celkové náklady i možná rizika, která s těmito činnostmi souvisejí.

Mezi obecnější typy rozhodnutí, u nichž je vhodné použití nástroje LCC (Life Cycle Cost), se zahrnuje například:

- posuzování alternativ přístupů a volitelných technologií vypořádání (likvidace),
- posouzení ekonomické realizovatelnosti projektů/produktů,
- vyhodnocení a porovnání alternativ jednotlivých činností na produktu,
- identifikace položek, které zvyšují náklady, hledání nákladově výhodnějších alternativ,

- vyhledávání optimální alokace disponibilních finančních prostředků,
- optimalizace metodou nákladů a přínosů,
- dlouhodobé finanční plánování.

Metoda LCC spočívá v postupné realizaci těchto základních kroků:

- analýza životního cyklu výrobku a vymezení jeho etap,
- formulace nákladových položek jednotlivých etap životního cyklu,
- formulace požadavků na údaje potřebné k analýze LCC,
- získání dat pro modelování LCC od uživatele,
- využití výsledků modelování LCC.

#### Odhad nákladů životního cyklu produktu

Obecně lze celkové náklady vynaložené v těchto etapách rozdělit na pořizovací náklady, vlastnické náklady a náklady na vypořádání. Platí tedy:

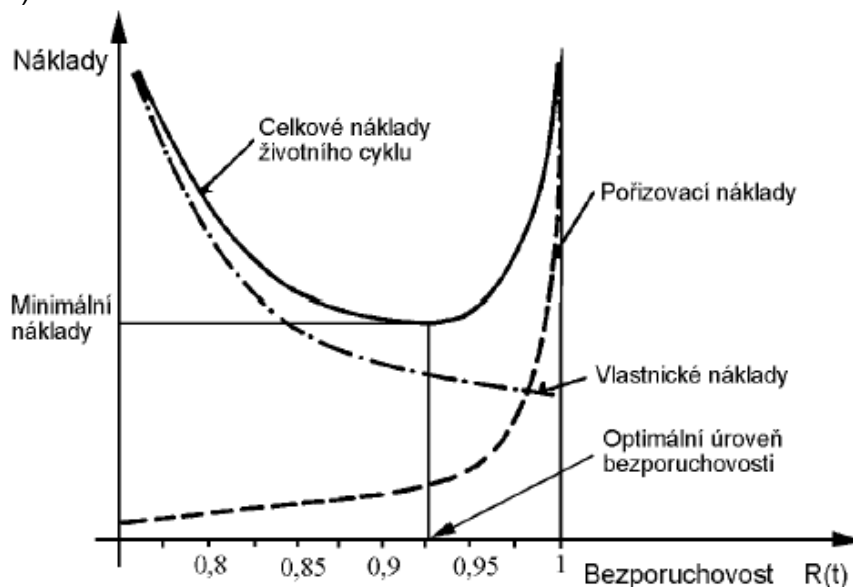
$$\text{LCC} = \text{Pořizovací náklady} + \text{Vlastnické náklady} + \text{Náklady na vypořádání}$$

Pořizovací náklady mohou být snadno vyhodnoceny před rozhodnutím o pořízení produktu. Do pořizovacích nákladů patří zpravidla cena pořízení, případně další náklady vynaložené ve fázi pořizování (např. u automobilu cena doplňků vybavení).

Ocenění vlastnických nákladů bývá problematictější. Tyto náklady je obtížné předpovědět, mohou do nich být zahrnuty např. náklady na dopravu a instalaci, u automobilu např. pojištění a dále všechny náklady související s provozem a se zajištěním spolehlivosti provozu.

Náklady na vypořádání (likvidaci) mohou představovat významnou část celkových nákladů LCC. V zákonech mohou být požadovány činnosti prováděné v etapě vypořádání, které u velkých projektů mohou vyžadovat značné výdaje (např. jaderné elektrárny, procesy dobývání nerostných surovin apod.).

U běžných zařízení však náklady na likvidaci nebývají rozhodující částí nákladů životního cyklu. Proto závislost mezi náklady životního cyklu a spolehlivostí (bezporuchovostí) zařízení lze znázornit dle obr. 1.



**Obrázek 1: Závislost nákladů na bezporuchovosti**

Metody, které se používají k odhadu nákladů životního cyklu:

- technická metoda odhadu nákladů (vychází z evidence),
- metoda odhadu nákladů na základě analogie (porovnává příbuzné výrobky),
- parametrická metoda odhadu nákladů (odvození funkčních závislostí nákladů na technologických parametrech).

### Současná praxe LCC

Pro metodu určování nákladů životního cyklu není k dispozici žádný všeobecný standard. Standardy existují jen v určitých specifických oblastech:

- ČSN EN 60300 - 3 - 3:2005 Management spolehlivosti – část 3-3: Pokyn k použití – Analýza nákladů životního cyklu.
- ČSN EN 60300 - 3 - 14:2005 Management spolehlivosti – část 3-14: Pokyn k použití – Údržba a zajištění údržby.

Pod záštitou EU se zpracovávají pilotní projekty (např. struktura nákladů životního cyklu pro budovy a stavební objekty), jejichž výsledkem má být jednotná celoevropská metodika hodnocení životního cyklu konkrétních typů objektů. Metodika by měla sloužit jako podklad pro tvorbu legislativních podmínek v jednotlivých oblastech a zároveň jako jeden z rozhodovacích faktorů.

## **2.2 Hodnocení efektivnosti údržby**

Protože vlastnické náklady jsou zpravidla největší položkou nákladů LCC, je jim věnována při optimalizaci investičního rozhodování značná pozornost. A jejich významnou součástí jsou náklady na údržbu a proto je hodnocena též efektivnost údržby. V souhrnu platí, že efektivní údržba může přispět ke zvyšování objemu výroby a snižování nákladů, následně pak ke zvyšování tržeb a zisku. Přispívá tedy značnou měrou ke snižování možných rizik zvýšením celkové spolehlivosti i efektivnosti výrobních procesů.

Efektivní údržba ovlivňuje:

- Výkonnost, spolehlivost a způsobilost výrobního zařízení:
  - výběrem a nákupem kvalitního výrobního zařízení (ověření a validace specifikované výkonnosti, bezporuchovosti, udržovatelnosti a zajištěnosti údržby i jeho způsobilosti),
  - udržováním výše uvedených znaků během provozu výrobního zařízení.
- Kvalitu produkce.
- Využití disponibilního časového fondu výrobního zařízení:
  - optimalizací intervalů, průběžné doby i pracnosti preventivní údržby,
  - minimalizací průběžné doby a pracnosti údržby po poruše,
  - minimalizací průběžné doby a objemu přestavování a seřizování zařízení,
  - udržováním specifické výkonnosti zařízení.
- Zálohování systému a jeho komponent:
  - eliminací přerušování výrobního procesu,
  - snížením rozpracovanosti a výrobních zásob,
  - minimalizací vázaného kapitálu v zásobách.
- Bezpečnost, environmentální profil, získání a udržení zákazníků, zajištěním:
  - bezpečnosti provozu výrobního zařízení,
  - dopadů provozu a údržby výrobního zařízení na personál i životní prostředí,
  - maximální spolehlivosti dodávek zákazníkům.

K rozhodujícím faktorům efektivní údržby patří:

- Výběr a pořízování výkonného, spolehlivého a způsobilého výrobního zařízení i dalšího hmotného majetku (představuje zesílené nároky na kvalifikované posouzení provozních i ekonomických vlastností zařízení při jeho obnově).

- Tvorba a poskytování optimálních zdrojů zajištěnosti údržby (s optimalizací zásobování a zálohování systému a jeho komponent, optimalizací jednotlivých zásahů údržby s akcentem na prediktivní formy).
- Uplatňování výkonného a kvalitního managementu údržby (uplatňování postupů plánování a optimalizace údržby, zavedení detailní evidence, analýza procesů údržby s technickými i ekonomickými ukazateli, prověřování zavedených postupů údržby podle aktuálních informací o systému ad.).

## 2.3 Investiční rozhodování

### 2.3.1 Efektivnost investic

K zajištění efektivnosti je žádoucí, aby výnosy z investice převýšily náklady na investici vynaložené.

#### Základní parametry posuzování investic

Pokud jde o posuzování investice, existuje řada různých úhlů pohledů na efektivnost investice a tedy i parametrů, kterými se investice posuzuje. Mezi nejznámější náležejí:

- výnosnost (rentabilita) - vychází z porovnání nákladů na investici s výnosy, které investice v budoucnu přinese,
- rizikovost - každá investice je spojena s nebezpečím, že nepřinese očekávaný výnos,
- likvidita (doba splacení) - doba návratnosti vynaložených prostředků.

#### Postup hodnocení investic

V souvislosti se základními parametry posuzování investice rozlišujeme 3 základní kroky postupu hodnocení investic:

- určení jednorázových nákladů na investici,
- odhad budoucích výnosů a rizik,
- výpočet současné hodnoty očekávaných výnosů (cash flow).

Při odhadu jednorázových nákladů na investici vycházíme z pořizovacích nákladů všech výrobních faktorů s investicí spojených. Tyto údaje jsou zpravidla k dispozici se značnou mírou přesnosti (např. pořizovací ceny strojního zařízení). Pokud se jedná o strojní zařízení, musíme k nákladům na jejich pořízení připočítat náklady na dopravu a instalaci zařízení, případně náklady na zaškolení personálu apod. Složitější bývá odhad ostatních nákladů spojených s investicí (náklady na stavební úpravy a následnou rekultivaci staveniště, projektovou přípravu, výzkum a vývoj, zkušební provoz aj.).

Budoucí výnosy z investice tvoří čistý zisk a odpisy, které z investice plynou. Čistý zisk je odhadován z budoucích tržeb a nákladů. Tržby závisí na objemu prodaného zboží a jeho ceně. Obě tyto položky jsou zatíženy jistou mírou nejistoty. Položku nákladů tvoří očekávané náklady přímé (materiálové, mzdové) i oportunitní. Investice dále souvisí s přírůstkem zásob všeho druhu, nárůstem zásahů údržby, servisními službami ad., s investicí tedy zpravidla vzrůstají také nároky na oběžný kapitál.

Všechny údaje budoucích období jsou odhady a jsou tedy zatíženy jistou mírou nejistoty. Předpokládané riziko zahrneme do odhadu budoucích výnosů (posuzujeme jejich úroveň z optimistického a pesimistického hlediska), nebo ho vyjádříme formou přepočtu budoucích hodnot na současné hodnoty očekávaných výnosů.

Současná hodnota očekávaných výnosů investice je přepočítaná budoucí hodnota peněžní sumy, kterou je třeba vynaložit, abychom dosáhli návratnosti investice vyšší o očekávané výnosy.

### 2.3.2 Metody hodnocení investic

Rozlišujeme metody statické a dynamické. Dynamické metody uvažují s vývojem situace v čase a počítají s diskontováním.

K hodnocení efektivnosti investic slouží tyto základní metody:

- metoda výnosnosti investic (ROI – Return on Investment),
- metoda likvidity (návrtnosti) investice (Payback Method),
- metoda čisté současné hodnoty (NPV – Net Present Value of Investment),
- metoda vnitřního výnosového procenta (IRR – Internal Rate of Return).

Ukazatel výnosnosti (rentability) investice ROI měří čistý výsledek podnikového snažení. Poskytuje rychlou a názornou představu o výnosnosti investice, jeho nevýhodou je nerespektování faktoru času (patří ke statickým metodám).

Ukazatel likvidity investice měří schopnost firmy uspokojit své splatné závazky, představuje dobu splácení jako čas, kterého je zapotřebí, aby tok výnosů (cash flow) přinesl hodnotu rovnající se původním nákladům na investici. Ani tento ukazatel nepočítá se změnou výnosnosti investice v čase, patří tedy k metodám statickým.

Čistá současná hodnota investice NPV je rozdílem mezi současnou hodnotou očekávaných výnosů (cash flow) a náklady na investici (vyjadřuje čistý přínos investice).

Vnitřní výnosové procento IRR předpokládá, že diskontní míra není daná, ale že hledáme takovou její hodnotu, při které se současné očekávané výnosy z investice rovnají současné hodnotě výdajů na investici.

### 2.3.3 Rozhodování o přijetí investice

Pokud máme jedinou možnost investování kapitálu, rozhodujeme podle výše uvedených ukazatelů efektivnosti investice a platí:

- doba splácení investice musí být kratší než doba životnosti investice,
- velikost čisté současné hodnoty musí být kladné číslo,
- vnitřní výnosové procento musí být vyšší než minimálně přijatelné procento (odpovídající např. hodnotě podnikové diskontní míry).

Při větším počtu investičních variant platí:

- Pokud kapitál stačí na jedinou akci, potom je nutné vybrat investici nejefektivnější.
- Pokud kapitál stačí na více akcí, je nutno stanovit pořadí jejich výhodnosti. Přitom lze použít metody matematického programování, rozhodovací metody aj.

Výhody a nevýhody jednotlivých metod hodnocení efektivnosti investičních variant uvádí následující tab. 1.

**Tabulka 1: Přehled metod hodnocení efektivnosti investičních variant**

Metoda hodnocení investičních variant	Výhody	Nevýhody
Index výnosnosti	vhodný pro rychlou orientaci	nebere v úvahu časovou hodnotu peněz
Metoda návratnosti investice	vhodný pro rychlou orientaci	nebere v úvahu časovou hodnotu peněz
Metoda čisté současné hodnoty	respektuje faktor času zohledňuje veškeré peněžní toky spojené s investicí	významný vliv zvolené hodnoty diskontní sazby
Metoda vnitřního výnosového procenta	respektuje faktor času poskytuje přesný údaj o výnosnosti investice	některé očekávané hodnoty cash flow mohou generovat stejnou hodnotu čisté současné hodnotě investice při dvou různých diskontních mírách



### 3 FAKTORY OMEZUJÍCÍ MOŽNOSTI OPTIMALIZACE SPOLEHLIVOSTI

Klasická úloha stanovení takové úrovně bezporuchovosti výrobku (nebo obecněji systému), aby byly minimalizovány náklady životního cyklu, vychází z předpokladu, že je možné zvolit téměř libovolnou úroveň bezporuchovosti. V průmyslové praxi je ale na výrobek obvykle kladena celá řada požadavků a podmínek, jež mohou mít významný omezující vliv na možnosti volby úrovně bezporuchovosti, resp. spolehlivosti výrobku. Stanovit úroveň bezporuchovosti proto většinou není možné jen podle výše nákladů životního cyklu, ale je nutné zohlednit existující omezující faktory. Je možné identifikovat několik základních druhů omezení:

#### 3.1 Legislativní omezení

Vlastnosti a parametry výrobu musí splňovat řadu požadavků plynoucích z obecně závazných dokumentů (zákony, vyhlášky, směrnice) a z dokumentů, jejichž závaznost je zakotvena ve smluvních ujednáních mezi výrobcem a odběratelem (technické normy). Těmito požadavky může být do značné míry omezen interval, ze kterého je možné volit úroveň spolehlivosti výrobku. Typickým příkladem jsou požadavky na bezpečnost výrobku a požadavky na omezení vlivu výrobku na životní prostředí, jež je nezbytné splnit bez ohledu na skutečnost, že jejich splnění může vylučovat možnost minimalizovat náklady životního cyklu výrobku. Dalším podobným omezením může být existující embargo, jež vyloučí možnost použít ve výrobku určitý materiál nebo technologii<sup>2</sup>, což může kromě jiného ovlivnit také spolehlivost výrobku.

#### 3.2 Technická omezení

Kromě legislativních požadavků a z nich plynoucích omezení je na výrobek kladena celá řada dalších požadavků technické povahy. Některé se mohou týkat spolehlivosti výrobku přímo (např. explicitní požadavky na pohotovost nebo udržovatelnost výrobku), jiné požadavky mohou ovlivňovat spolehlivost výrobku nepřímo a představovat pro volbu úrovně spolehlivosti výrobku omezující podmínky. Jako příklad lze uvést požadavky na maximální hmotnost a největší přípustné rozměry výrobku. Požadavek na hmotnost a rozměry výrobku nepředstavuje přímý požadavek na spolehlivost, přesto ve svém důsledku může znamenat vyloučení technického řešení, jež by zajistilo (ekonomicky) optimální úroveň spolehlivosti výrobku.

#### 3.3 "Politická" omezení

V některých případech je v etapě specifikace požadavků nutné zohlednit nejen žádané technické parametry a požadavky či omezení vyplývající z technických norem, zákonů a dalších závazných předpisů, ale také omezení "politické" povahy. Taková omezení mohou mít svůj původ jak na straně odběratele (investora, zadavatele), tak na straně výrobce. Odběratel například může požadovat, aby byl výrobek nebo jeho části vyráběny ve vybrané zemi nebo aby bylo při výrobě použito dílů pocházejících z vybrané země nebo od předem určených subdodavatelů. Naopak dodavatel (výrobce) může ze strategických důvodů volit jinou úroveň spolehlivosti svého výrobku<sup>3</sup>, než je úroveň optimální z pohledu minimalizace nákladů životního cyklu. Oním strategickým důvodem může být snaha o proniknutí na nový trh nebo snaha o získání lepší pozice na trhu.

---

<sup>2</sup> Omezení embargem může pro výrobce znamenat buď nedostupnost některých materiálů, dílů či technologií nebo omezení použití dostupných materiálů a technologií ve výrobku, jež má být exportován do země, pro niž platí embargo.

<sup>3</sup> Většinou se nevolí přímo úroveň spolehlivosti výrobku, ale jiné parametry, kterými je spolehlivost výrobku do značné míry determinována.

### 3.4 Ekonomická omezení

Náklady životního cyklu jsou tvořeny náklady na pořízení, vlastnickými (provozními) náklady a náklady na vypořádání (likvidaci) výrobku. Při hledání optimální úrovně spolehlivosti výrobku je často možné zanedbat náklady na vypořádání<sup>4</sup> a pro účely optimalizace přijmout předpoklad, že náklady životního cyklu jsou určeny jen pořizovacími a provozními náklady. Dalším běžným předpokladem při hledání minima nákladů životního cyklu bývá stejná váha pořizovacích nákladů a vlastnických nákladů. Tento předpoklad ovšem nemusí být vždy splněn. V některých případech jsou upřednostňovány nízké náklady na pořízení, v jiných případech je kladen důraz na minimální vlastnické náklady. Oba případy vedou k situaci, kdy zvolená úroveň spolehlivosti výrobku neodpovídá optimu z hlediska celkových nákladů.

## 4 OPTIMALIZAČNÍ ÚLOHA

### 4.1 Vymezení řešené úlohy

Při řešení praktických úloh spolehlivosti zařízení se nejčastěji požaduje vyhodnotit náklady a přínosy spojené s dosažením potřebné spolehlivosti. Takovou úlohou byla i problematika modernizace technologického celku dodávky vodíku v petrochemickém provozu. Jeho základní částí je recirkulační turbokompresor, jehož účelem je komprese vodíkového plynu, který vstupuje do reaktoru. Stáří tohoto kompresoru a souvisejícího zařízení (elektropohon, řídicí systém, elektrické napájení) je 30 let. Při jeho výpadku vznikají ekonomické ztráty v důsledku snížení výroby či odstavení navazující výrobní jednotky, viz následující popis.

Při poruše turbokompresoru je výrobní jednotka odstavována. Doba odstavení jednotky závisí na závažnosti poruchy turbokompresoru. Výpadky turbokompresoru a jeho příslušenství lze rozdělit na krátkodobé a dlouhodobé. Krátkodobé výpadky jsou vyvolány zpravidla výpadkem elektrického napájení, zapůsobením ochrany apod. Jejich odstranění je v řádu jedné hodiny či několika málo hodin. Dlouhodobé výpadky jsou zpravidla způsobeny poruchami mechanických komponent turbokompresoru a jeho příslušenství.

Při krátkodobém výpadku je po znovu najetí turbokompresoru (trvá více než 1 h) sjíždění jednotky přerušeno a plné obnovení provozu jednotky nastane za cca 8 h. Při dlouhodobém výpadku je odstavení a opětovné najetí jednotky otázkou několika dnů. Z údajů o poruchách za poslední 4 roky je zřejmé, že průměrná doba opravy činí 8 inženýrských dnů a doba odstávky jednotky pro poruchu turbokompresoru včetně sjetí a najetí jednotky trvá cca 13 kalendářních dnů. Při posílení kapacity údržby (oprava stroje na 2 směny či déle) lze předpokládat snížení doby odstávky výrobní jednotky na cca 10 dnů.

Řešením úlohy je nalézt takovou variantu modernizace, která by vedla ke snížení četnosti výpadků (prodloužila MTBF) a měla přijatelné náklady.

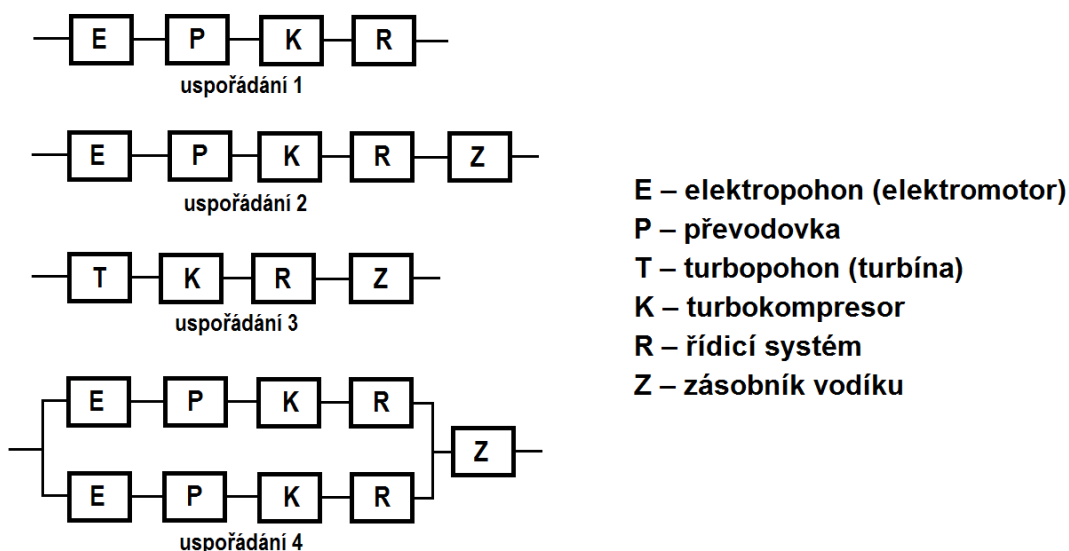
### 4.2 Varianty uspořádání technologie

V průběhu řešení byly analyzovány možné varianty uspořádání technologie. Varianty schematicky zachycuje obr. 2.

---

<sup>4</sup> Existují tři základní důvody, proč při optimalizaci úrovně spolehlivosti není nezbytné brát v potaz náklady na vypořádání:

- Náklady na likvidaci nejsou úrovní bezporuchovosti významně ovlivňovány.
- Náklady na likvidaci jsou u většiny výrobků významně nižší než pořizovací a provozní náklady.
- U výrobků s životností v řádu desítek let (30 - 50 let) je těžké náklady na vypořádání věrohodně odhadnout z důvodu značné nejistoty. (Nevíme, jaké budou za několik desetiletí legislativní požadavky na vypořádání výrobku a jak nákladné budou technologické postupy likvidace.)



**Obrázek 2: Uspořádání technologie**

Uspořádání 1 je výchozí zapojení technologie. Uspořádání 2 zahrnuje doplnění technologie o zásobník vodíku k překlenutí krátkodobých výpadků turbokompresoru. Uspořádání 3 představuje řešení, kdy elektromotor o výkonu 2,5 MW a převodovka jsou nahrazeny turbínou. Uspořádání 4 pak reprezentuje uspořádání, kdy je nainstalováno záložní soustrojí najížděné v případě poruchy.

#### **4.3 Parametry uvažované při posuzování modernizace**

Při posuzování modernizace bylo třeba uvažovat podstatné parametry, které rozhodují o výsledném efektu modernizace. Lze je rozdělit na parametry související se spolehlivostí a na parametry související se ekonomikou.

##### Ukazatele spolehlivosti

Za základní ukazatele byla zvolena střední doba provozu mezi poruchami MTBF a střední doba do obnovy MTTR.

##### Ekonomické parametry

Při hodnocení ekonomické stránky modernizace byly vyhodnocovány náklady životního cyklu v časovém horizontu 23 let při předpokládané době životnosti strojní technologie 25 – 30 let. Jako základní parametry modernizace vystupovaly:

- vyvolané náklady (stavební úpravy, úpravy zapojení technologie apod.),
- investice do technologie,
- celkové náklady na strategickou preventivní údržbu (výměna rozhodujících dílů technologie na mezi jejich životnosti),
- provozní náklady (elektrická energie a pára),
- náklady na běžnou preventivní údržbu.

Ostatní nákladové položky byly s ohledem na hodnotu výše uvedených parametrů hodnoceny jako nevýznamné.

#### **4.4 Postup řešení**

Při zvažování variant opatření k redukci výpadků turbokompresoru se postupovalo formou hodnocení variant technických řešení použitých k snížení pravděpodobnosti vzniku (roční četnosti) jak dlouhodobých, tak i krátkodobých odstavení výrobní jednotky. Jednotlivé varianty byly hodnoceny prostřednictvím analýzy nákladů životního cyklu LCC.

Analýza nákladů životního cyklu byla provedena podle ČSN EN 60300-3-3:2005 pro model LCC založený na pořizovacích a vlastnických nákladech a zahrnovala etapu instalace (uvažována při pořízení nového zařízení) a etapu provozu a údržby (uvažována ve všech případech). Celkově byly pořizovací a vlastnické náklady v analýze jednotlivých variant zvažovány jako náklady na investice, provoz a údržbu v této struktuře:

- jednorázové náklady na instalaci (uvažovány jako náklady vyvolané investicí do nového zařízení a spočívající v nákladech na stavební úpravy, na úpravy okolního technologického zařízení),
- investice do vlastního technologického zařízení,
- náklady na strategickou preventivní údržbu (náklady na výměnu a renovaci rozhodujících částí zařízení),
- náklady na běžnou preventivní údržbu (jen práce kontraktora),
- náklady na provoz (energie a média a ztráty z nepohotovosti).

Porovnání výhodnosti analyzovaných variant bylo založeno na hodnocení diskontovaných peněžních toků DCF (Discounted Cash Flow) a čisté současné hodnoty NPV různých budoucích toků nákladů. Hodnota diskontní míry byla u všech variant uvažována jednotně ve výši 10%. Všechny náklady byly uvažovány ve stálých cenách za celou předpokládanou dobu životnosti technologie (25 - 30 let).

Pro snížení pravděpodobnosti dlouhodobých odstavení výrobní jednotky se zvažovaly 2 kategorie řešení:

- zvýšení bezporuchovosti modernizací stávajícího turbokompresoru či jeho náhradou novým strojem,
- zálohování turbokompresoru dalším strojem.

Pro snížení nákladů na provoz turbokompresoru pak byla dále zvažována možnost záměny elektrického pohonu turbokompresoru pohonem parní turbínou. Celkem tedy byly pro snížení pravděpodobnosti dlouhodobých odstavení výrobní jednotky analyzovány tyto varianty řešení:

- Varianta 1: Modernizace turbokompresoru neprovedena.
- Varianta 2: Modernizace turbokompresoru neprovedena, pouze nový řídicí systém.
- Varianta 3: Celková modernizace turbokompresoru, pohon elektromotorem (provoz na jeden stroj).
- Varianta 4: Celková modernizace turbokompresoru, pohon turbínou bez převodovky (provoz na jeden stroj).
- Varianta 5: Nákup nového turbokompresoru, pohon elektromotorem a odstavení starého stroje (provoz na jeden stroj).
- Varianta 6: Nákup nového turbokompresoru, pohon turbínou bez převodovky a odstavení starého stroje (provoz na jeden stroj).
- Varianta 7: Celková modernizace turbokompresoru a nákup nového turbokompresoru ve shodné konfiguraci se starým (provoz dvou strojů - jeden provozní, druhý záložní).
- Varianta 8: Celková modernizace turbokompresoru a postavení dalšího turbokompresoru z náhradních dílů ve shodné konfiguraci se starým (provoz dvou strojů - jeden provozní, druhý záložní).

Pro snížení četnosti krátkodobých odstavení výrobní jednotky se zvažovaly 2 varianty technického řešení zálohování dodávky vodíku pro výrobní jednotku:

- Varianta 9: Pronájem tahače s vodíkem.
- Varianta 10: Zásobníkové pole pro skladování vodíku (vlastní investice).

Vzhledem k jednoznačně prokázané ekonomické výhodnosti zálohování dodávky vodíku byly do analýzy nákladů životního cyklu pro všechny varianty 1 až 8 zahrnuty i náklady na rozšíření zásobníkového pole pro skladování vodíku.

#### 4.5 Vstupní parametry analýzy nákladů LCC a zásadní předpoklady řešení

V analýze nákladů LCC pro jednotlivé varianty řešení jsou nejpodstatnější náklady na investice do vlastního technologického zařízení, náklady na výměnu a renovaci stávajícího zařízení a náklady na provoz. Jedná se o náklady, které jednorázově či opakovaně dosahují hodnoty v řádu desítek miliónů Kč<sup>5</sup> a jsou uvedeny v následujícím přehledu.

– nový řídicí systém	cca 10 mil. Kč
– zásobníkové pole vodíku	cca 10 mil. Kč
– modernizace ucpávek stávajícího turbokompresoru	cca 18 mil. Kč
– nový turbokompresor	cca 70 mil. Kč
– elektropohon pro turbokompresor	cca 6 mil. Kč
– turbína včetně příslušenství	cca 10 mil. Kč
– stavební úpravy, úpravy zapojení, kondenzátní hospodářství	cca 22,5 mil. Kč
– náklady na elektrickou energii (pro elektropohon)	cca 26 mil. Kč.rok <sup>-1</sup>
– náklady na páru (pro pohon turbínou)	cca 6 mil. Kč.rok <sup>-1</sup>
– výrobní ztráty při odstavení výrobní jednotky na 8 h	cca 2,3 mil. Kč
– výrobní ztráty při odstavení výrobní jednotky na 24 h	cca 6,5 mil. Kč
– výrobní ztráty při odstavení výrobní jednotky na 10 dnů	cca 40 - 60 mil. Kč

Volba hodnot ukazatelů spolehlivosti (frekvence výpadků stanovené z MTBF a MTTR) v analýze nákladů LCC byla založena na těchto východiscích:

##### Stávající zařízení (bez modernizace)

– krátkodobé výpadky (bez zásoby vodíku na překlenutí výpadku)	1 rok <sup>-1</sup>
– doba obnovy při krátkodobém výpadku	8 h
– výpadky starého řídicího systému (nedostupnost náhradních dílů)	0,1 rok <sup>-1</sup>
– doba obnovy při výpadku starého řídicího systému	24 h
– dlouhodobý výpadek kompresoru vč. pohonu a převodovky	0,25 rok <sup>-1</sup>
– doba obnovy při dlouhodobém výpadku	240 h

##### Modernizované zařízení

– krátkodobé výpadky (se zásobou vodíku na překlenutí výpadku)	0,2 rok <sup>-1</sup>
– doba obnovy při krátkodobém výpadku	8 h
– dlouhodobý výpadek turbokompresoru (modernizovaný, nový)	0,1 rok <sup>-1</sup>
– dlouhodobý výpadek dvojice turbokompresorů	0,025 rok <sup>-1</sup>
– doba obnovy při dlouhodobém výpadku	240 h

Při analýze nákladů LCC byly jako zásadní předpoklady, jejichž platnost je limitujícím faktorem pro porovnávání variant řešení, formulovány tyto podmínky:

- nejistota v odhadu ekonomických nákladů je u všech variant shodná,
- pára použitá k pohonu protitlaké turbíny vytěsňuje technologickou páru užívanou v ostatních technologických procesech,
- všechny varianty konstrukčního provedení turbokompresoru mají stejnou spolehlivost.

Podrobný rozpis nákladů LCC, jejich alokace v časové ose životnosti zařízení, způsob jejich odvození a zdrojová data byl zpracován v tabulkové formě a pro jeho rozsáhlost zde není uváděn.

<sup>5</sup> V cenové hladině platné v roce 2005.

#### 4.6 Výsledky vyhodnocení

Na hodnocení ekonomické výhodnosti jednotlivých variant technického řešení je možné pohlížet z několika hledisek.

- Z pohledu celkových (investičních i provozních) diskontovaných nákladů vynaložených za dobu uvažované životnosti technologie.
- Z pohledu diskontovaných nákladů na provoz a údržbu za dobu uvažované životnosti technologie.
- Z pohledu diskontovaných nákladů na investice za dobu uvažované životnosti technologie.
- Z pohledu diskontovaných úspor v nákladech na provoz a údržbu za dobu uvažované životnosti technologie.
- Z pohledu indexu výnosnosti investice <sup>6</sup>.

Výsledky hodnocení z výše uvedených hledisek (kritérií) jsou shrnuty v tab. 2. Souhrnný peněžní tok (cash flow) je v tabulce označen **CF** a čistá současná hodnota souhrnného peněžního toku je označena **NPV CF**. Efektivnost investice je hodnocena indexem výnosnosti **PI** (Profitability Index), kde:

$PI = \text{souhrn NPV CF úspory nákladů na provoz a údržbu} / \text{souhrn NPV CF nákladů na investice}$ .

U každého hlediska je pak udáno pořadí výhodnosti té či oné varianty. To umožňuje objektivizovat a optimalizovat rozhodnutí o výběru varianty k realizaci. Investice je efektivní při  $PI > 1$ . Index PI má podobnou konstrukci jako index ROI (Return on Investment)

---

<sup>6</sup> Zisk z modernizace turbokompresoru je uvažován jako rozdíl mezi náklady na provoz a údržbu varianty bez modernizace (varianta 1) a variant s modernizací (varianta 2 až 8).

**Tabulka 2: Hodnocení efektivnosti investičních variant podle kritérií**

		Varianta							
		1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Celkové náklady [tis. Kč]</b>	<b>C</b>	1	1	8	5	9	5	9	8
	<b>F</b>	183 080	093 305	62 035	02 435	47 620	70 290	16 395	58 395
	<b>N</b>	492	464	3	2	4	3	4	4
	<b>PV CF</b>	587	901	92 038	77 682	52 749	20 242	49 928	01 994
	<b>P</b>								
	<b>ořadí</b>	8	7	3	1	6	2	5	4
<b>Náklady na prov. a údržbu [tis. Kč]</b>	<b>C</b>	1	1	8	4	8	4	7	8
	<b>F</b>	183 080	083 305	23 835	31 735	47 620	63 790	88 195	25 995
	<b>N</b>	492	457	3	2	3	2	3	3
	<b>PV CF</b>	587	388	59 715	18 500	70 255	32 376	43 225	74 465
	<b>P</b>								
	<b>ořadí</b>	8	7	4	1	5	2	3	6
<b>Náklady na investice [tis. Kč]</b>	<b>C</b>		10	3	7	1	1	1	3
	<b>F</b>	0	000	8 200	0 700	00 000	06 500	28 200	2 400
	<b>N</b>		7	3	5	8	8	1	2
	<b>PV CF</b>	0	513	2 323	9 182	2 494	7 866	06 703	7 530
	<b>P</b>								
	<b>ořadí</b>	1	2	4	5	6	7	8	3
<b>Úspora nákl. na prov. a údržbu [tis. Kč]</b>	<b>C</b>		99	3	7	3	7	3	3
	<b>F</b>	0	775	59 245	51 345	35 460	19 290	94 885	57 085
	<b>N</b>		35	1	2	1	2	1	1
	<b>PV CF</b>	0	199	32 872	74 087	22 332	60 211	49 362	18 122
	<b>P</b>								
	<b>ořadí</b>	8	7	4	1	5	2	3	6
<b>Index výnosnosti investice</b>	<b>P</b>	0,0	4,6	4,	4,	1,	2,	1,	4,
	<b>I</b>	0	8	11	63	48	96	40	29
	<b>P</b>								
	<b>ořadí</b>	8	1	4	2	6	5	7	3

Z tab. 2 je zřejmé, že z hlediska nákladů na investice a rychlé návratnosti vynaložených investic je nejvýhodnější varianta 2. Rychle reaguje na hrozbu výpadků turbokompresoru pro poruchy zastaralého systému řízení a nemožnost jeho rychlého najetí z důvodu nedostatku originálních náhradních dílů. Jedná se o hledisko technické a je zapotřebí tuto skutečnost rychle řešit.

Z hlediska celkových nákladů, nákladů na provoz a údržbu a celkových úspor nákladů na provoz a údržbu se jako nejvýhodnější jeví varianta 4 a varianta 6. Jedná se o hlediska, beroucí v úvahu náklady za celou dobu životního cyklu a lze je pojímat jako hlediska strategická. Zde se nejvíce uplatňuje snížení nákladů na energii (přechod z pohonu elektromotorem o výkonu 2,5 MW na pohon parní turbínou) a zvýšení spolehlivosti turbokompresoru.

Přesto, že varianta 4 se jeví jako výhodnější než varianta 6, lze toto hodnocení přijmout jen za předpokladu, že jsou splněny podmínky stejné spolehlivosti modernizovaného a nového turbokompresoru. Vzhledem k relativně malému rozdílu mezi variantou 4 a variantou 6 a nejistotě spojené se splněním podmínky stejné spolehlivosti nelze jednoznačně rozhodnout o tom, která z variant má být preferována.

## **5 ZÁVĚR**

Záměrem příspěvku bylo seznámit s aplikacemi spolehlivosti, které vstupují do našeho každodenního života. A promítají se v nákladech, které za ně jako uživatelé výrobků a služeb platíme. Proto je užitečné dobře porozumět i celkem jednoduchým úlohám analýz nákladů životního cyklu, v nichž se spojují spolehlivost a ekonomika.

## **Poděkování**

Tato práce byla vytvořena s finanční podporou Ministerstva životního prostředí České republiky, projekt číslo SPII1A0/45/07 - Komplexní interakce mezi přírodními ději a průmyslem s ohledem na prevenci závažných havárií a krizové řízení.

## **Literatura:**

- Synek, M. A KOL. *Manažerská ekonomika*. 4. vyd. Praha: Grada Publishing, 2007, ISBN 978-80-247-1992-4.
- Gros, I.: *Kvantitativní metody v manažerském rozhodování*, Grada 2003, ISBN 80-247-0421-8.