



ČESKÁ SPOLEČNOST PRO JAKOST
Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1

ZABEZPEČOVÁNÍ SPOLEHLIVOSTI



materiály k setkání odborné skupiny pro spolehlivost

12. září 2001
Praha 1, Novotného lávka 5

OBSAH

METODY ANALÝZ SPOLEHLIVOSTI SYSTÉMŮ A JEJICH VÝBĚR	3
<i>Doc. Ing. Antonín Mykiska, CSc. Ing. Pavel Votava</i>	
CESTY K ZAJIŠTĚNÍ SPOLEHLIVOSTI V ETAPĚ NÁVRHU	10
<i>Prof. Ing. Jaroslav Menčík, CSc.</i>	
ROZBOR A ANALÝZA DAT PRO HODNOCENÍ PROVOZNÍ SPOLEHLIVOSTI	17
<i>Ing. Libor Obruča</i>	
UDRŽOVATELNOST A ZAJIŠTĚNOST ÚDRŽBY	24
<i>Prof. Ing. Václav Legát, DrSc.</i>	

METODY ANALÝZ SPOLEHLIVOSTI SYSTÉMŮ A JEJICH VÝBĚR

Doc. Ing. Antonín Mykiska, CSc.

Ing. Pavel Votava

Úvod

Základním nástrojem hodnocení spolehlivosti systémů jsou postupy a metody analýz spolehlivosti, které umožňují realizovat specifikované požadavky na spolehlivost v jednotlivých etapách životního cyklu objektů a zejména ve vývojových etapách jejich životního cyklu umožňují požadovanou úroveň spolehlivosti „vkonstruovat, vprojektovat“. Toho obvykle nelze dosáhnout intuitivně využíváním pouze rutinních znalostí a zkušeností projektantů či konstruktérů, obzvláště u objektů charakteru složitějších technických systémů nebo systémů s vyšší požadovanou spolehlivostí než je standardní apod. Výsledky aplikace metod analýz v různých fázích životního cyklu systému s rozdílnými úrovněmi a stupni rozkladu pak umožňuje přezkoumat plnění specifikovaných požadavků, vyhodnotit kvalitativní charakteristiky, provést odhad ukazatelů bezpečnosti, životnosti, bezporuchovosti, udržovatelnosti, pohotovosti atd. a doplněná ekonomickými analýzami umožňuje efektivně a hodnotit či srovnávat různé varianty řešení, různá opatření ke zvýšení spolehlivosti,.

Pro provádění systematických a reprodukovatelných analýz spolehlivosti je nutné používat jednotné postupy. Pro každý konkrétní případ analyzovaného objektu je nutné zvolit z množiny všech potenciálně možných metod analýz spolehlivosti vhodnou metodu, která umožní

- modelovat a hodnotit spolehlivostní problémy v širokém rozsahu,
- provádět přímou, systematickou, kvalitativní a kvantitativní analýzu (je-li požadována)
- předpovědět číselné hodnoty ukazatelů spolehlivosti, jsou-li dostupná data.

Obecně rozeznáváme dva typy (resp. stupně aplikace) metod analýz spolehlivosti:

- a) **kvalitativní**, která umožňuje vyjádřit stav analyzovaného objektu/systému pomocí verbálního vyjádření (např. klíčovými slovy, souslovími nebo stručnými větami) a nebo hodnotou parametru vyjádřeného pomocí logické funkce nebo reprezentace (např. ve formě přiřazení do jednotlivých tříd). Hodnoty parametry kvalitativních metod analýzy spolehlivosti mají charakter atributivních znaků a nabývají kladných celočíselných hodnot;
- b) **kvantitativní**, umožňující vyjádřit stav analyzovaného objektu/systému pomocí hodnoty parametru vyjádřeného ukazatele spolehlivosti a případně dalších statistických veličin. Parametry kvantitativních metod analýz spolehlivosti mají charakter variabilních znaků a jedná se o reálná čísla.

Dále u metod analýz spolehlivosti rozeznáváme dva druhy přístupů při analýze:

- a) **deduktivně**, tj. postup „shora dolů“,
- b) **induktivně**, tj. postup „zdola nahoru“;

Norma ČSN IEC 300-3-1:1993 - „Řízení spolehlivosti - Část 3: Návod k použití. Oddíl 1: Metody analýzy spolehlivosti. Metodický návod“ se zabývá obecnými principy přístupů při provádění analýz spolehlivosti a v této souvislosti vyjadřuje obecné vztahy metod k obecnému postupu analýzy spolehlivosti objektů. Dále uvádí charakteristiky nejčastěji používaných kvalitativních i kvantitativních metod analýz spolehlivosti. Na základě těchto informací a navazujících (resp. souvisejících) norem lze pro každou samostatnou metodu stanovit možnosti jejich aplikací pro jednotlivé konkrétní objekty.

Platí zásada, že při prvotních analýzách objektu se v první fázi aplikují kvalitativní metody analýzy spolehlivosti, a to zpravidla z důvodu, že není k dispozici datová základna v takovém rozsahu, v kterém jsou vyžadovány pro provádění kvantitativních analýz spolehlivosti. Tato první fáze aplikace, tzn. aplikace kvalitativních metod analýzy spolehlivosti, však velmi vhodně slouží k popisu a vymezení stavů analyzovaného objektu. Tím se uskuteční příprava k provádění druhé fáze - tj. provádění kvantitativních analýz spolehlivosti.

1. Přehled a stručné charakteristiky kvalitativních metod analýz spolehlivosti

Metoda FMEA (Fault mode and effect analysis)

Metoda FMEA - tj. Analýza druhů poruchových stavů a jejich důsledků - je induktivní kvalitativní metoda analýzy spolehlivosti. Je obzvláště vhodná ke studiu vzniku možných poruchových stavů objektu na nejbližší vyšší funkční úrovni systému.

Metoda FMEA je vhodná pro analýzu systémů, resp. přesně vymezených a definovaných částí systémů (subsystémů) s jednoduchou funkční strukturou. Metoda FMEA umožňuje analyzovat až několik tisíc prvků systému. Konkrétní limitní počet prvků předurčuje složitost struktury analyzovaného systému. Není způsobilá zpracovávat zálohované systémové struktury a jedná se o redukovatelnou strukturu. Není způsobilá zpracovávat kombinace poruch nebo událostí. Analýza není závislá na charakteru průběhu intenzity poruch. Neanalyzuje případné procesy obnovy a nezpracovává statisticky závislé situace oprav.

Při provádění analýzy FMEA se pomocí tzv. klasifikačních tabulek transformují verbálně a/nebo statisticky vyjádřené hodnoty na tzv. třídy významu, výskytu a odhalitelnosti pro každý potencionálně možný vzniklý poruchový stav a jeho příčinu.

Výstupem metody FMEA je výčet - seznam - všech možných druhů poruchových stavů, jejich příčin a následků a klasifikace závažnosti analyzovaných poruchových stavů tzv. rizikovým číslem (ve zkratce MR/P nebo RPN), dále přijatá opatření s příslušnými odpovědnostmi za plnění a termíny plnění.

Metodu FMEA jako metodu analýzy spolehlivosti definuje ČSN IEC 812:1992 nebo MIL 1629A:1984.

Metoda ETA (Event tree analysis) - kvalitativní

Metoda ETA je induktivní metoda analýzy spolehlivosti objektu, která se zabývá výskytem všech (potenciálně) možných událostí, tj. množinou všech možných jevů které mohou nastat. Je zaměřena na zjištění a analýzu podmínek a faktorů, které způsobují výskyt definované vrcholové události (angl. top event). Výsledky se zobrazují v podobě tzv. stromu událostí.

Metoda ETA umožňuje analyzovat od 2 až do 50 prvků systému. Je způsobilá zpracovávat zálohované systémové struktury. Je způsobilá zpracovávat kombinace poruch nebo událostí.

Metoda FTA (Fault tree analysis) - kvalitativní

Metoda FTA - tj. Analýza stromu poruchových stavů - je deduktivní metoda analýzy spolehlivosti systémů. V případě provedení aplikace pouze v rozsahu použití Booleovy logické funkce pro popis vzniku/nevzniku poruchového stavu je metodou kvalitativní. Je zaměřena na zjištění možností vzniku poruchových stavů a výskytu provozuschopných stavů, tj. na zjištění a analýzu podmínek a faktorů, které způsobují výskyt definované nežádoucí události.

Počínaje definovanou vrcholovou událostí se zjišťují její možné příčiny nebo druhy poruchových stavů na nejbližší nižší funkční úrovni systému. Následující postupné zjišťování nežádoucí činnosti systému na nejbližších nižších funkčních úrovních systému vede až na požadovanou nejnižší úroveň systému. Příčinami na této úrovni jsou obvykle druhy poruchových prvků elementárních prvků. Výsledky se zobrazují v podobě tzv. stromu poruchových stavů, který umožňuje přehledně zobrazit všechny možné stavy (události) k příslušné, předem stanovené vrcholové události.

Metoda FTA umožňuje analyzovat až několik tisíc prvků systému. Konkrétní limitní počet prvků předurčuje složitost struktury analyzovaného systému. Je způsobilá zpracovávat zálohované systémové struktury a jedná se o neredukovatelnou strukturu. Je způsobilá zpracovávat kombinace poruch nebo událostí. Analýza není závislá na charakteru průběhu intenzity poruch. Neanalyzuje případné procesy obnovy a nezpracovává statisticky závislé situace oprav.

Podrobněji je metodě FTA věnována ČSN IEC 1025:1994.

Metoda RBD (Reliability block diagram) - kvalitativní

Metoda RBD - tj. Metoda blokového diagramu bezporuchovosti – je více ve své aplikaci známá jako kvantitativní metoda analýza bezporuchovosti. Je nutným předstupněm k aplikacím své kvantitativní podoby. Bývá však využívána i jako vhodná „příprava“ ostatních kvantitativních metod analýzy spolehlivosti (bezporuchovosti).

Analýza blokového diagramu bezporuchovosti (RBD - Reliability Block Diagram) je deduktivní (shora dolů) metoda analýzy bezporuchovosti systému. Výsledek její aplikace je blokový diagram bezporuchovosti (RBD), který je grafickým zobrazením logické struktury systému v podobě podsystémů, popř. množiny elementárních prvků systému. To umožňuje zobrazit cestu úspěchu (bezporuchového stavu systému) tak, jak jsou bloky (tzn. vyjádření jednotlivých subsystémů a elementárních prvků) logicky propojeny. Struktura zapojení bloků (sériové, paralelní, smíšené atd.) blokového diagramu bezporuchovosti pak vyjadřuje závislost poruchy systému na poruchách jeho komponent (prvků).

Metoda RBD umožňuje analyzovat až několik tisíc prvků systému. Konkrétní limitní počet prvků předurčuje složitost struktury analyzovaného systému. Je způsobilá zpracovávat zálohované struktury a jedná se o neredukovatelnou strukturu. Je způsobilá zpracovávat kombinace poruch nebo událostí. Analýza není závislá na charakteru průběhu intenzity poruch. Neanalyzuje případné procesy obnovy a nezpracovává statisticky závislé situace oprav.

Výstupem analýzy pomocí metody RBD kvalitativní je pouze blokové schéma – blokový diagram bezporuchovosti (RBD). V případě jeho užití této metody pouze jako kvalitativní analýzy bezporuchovosti je zobrazena pouze cesta úspěšného „průchodu“ mezi vstupem a výstupem RBD, která modeluje bezporuchový stav analyzovaného systému. Metodu RBD charakterizuje ČSN IEC 1078:1993.

Metoda „Příčina - následek“ (Cause - consequence)

Metoda „Příčina - následek“ identifikuje místo vzniku možného druhu poruchového stavu, možný druh poruchového stavu a možný následek poruchového stavu za předpokladu vzniku poruchového stavu a možných příčin vzniku možného poruchového stavu. K tomu popisuje mechanismus vzniku poruchového stavu - zpravidla je toto vyjádření verbálního charakteru, avšak tam, kde je možné mechanismus poruchového stavu popsat matematickým modelem, je mechanismus poruchy popsán matematickým modelem.

Metoda „Příčina - následek“ umožňuje analyzovat až několik set prvků systému. Konkrétní limitní počet prvků předurčuje složitost struktury analyzovaného systému. Je způsobilá zpracovávat zálohované systémové struktury a je způsobilá zpracovávat kombinace poruch nebo událostí. Analýza není závislá na charakteru průběhu intenzity poruch.

Výstupem metody „Příčina - následek“ je tzv. „tabulka příčin/následků“, která obsahuje minimálně tyto položky:

- a) místo vzniku možného druhu poruchového stavu,
- b) možný druh poruchového stavu,
- c) možný následek poruchového stavu.

Metoda „Pravdivostní tabulka“ (Truth table)

Metoda „Pravdivostní tabulka“ je induktivní metoda analýzy spolehlivosti, která pomocí kombinačních logických funkcí definuje výskyt a vznik poruchového stavu. Metoda „Pravdivostní tabulka“ umožňuje analyzovat od 2 až do 50 prvků systému. Je způsobilá zpracovávat zálohované systémové struktury a jedná se o neredukovatelnou strukturu. Je způsobilá zpracovávat kombinace poruch nebo událostí. Analýza není závislá na charakteru průběhu intenzity poruch. Není způsobilá analyzovat případné procesy obnovy a zpracovávat statisticky závislé situace oprav.

Výstupem je pravdivostní tabulka, kde jsou s využitím aparátu Booleovy algebry popsány jednotlivé kombinace stavů jednotlivých prvků analyzovaného (sub)systému ve vztahu k

výslednému stavu celého analyzovaného (sub) systému. Výsledkem aplikace metody bývá popis vzniku poruchového, příp. bezporuchového stavu kombinační logickou funkcí.

Diagram stavových přechodů (State-transition diagram)

Metoda „Diagram stavových přechodů“ kvalitativně vymezuje určení všech možných stavů analyzovaného objektu prostřednictvím grafického znázornění stavových přechodů.

Tato metoda umožňuje analyzovat od 2 do 100 prvků objektu. Konkrétní limitní počet prvků předurčuje složitost struktury analyzovaného objektu. Je způsobilá zpracovávat zálohované systémové struktury a je způsobilá zpracovávat kombinace poruch nebo událostí.

Simulace událostí (Event simulation) - kvalitativní

Kvalitativní metoda analýzy spolehlivosti „Simulace událostí“ je metoda, která může nabývat případů, kdy může mít jak deduktivní, tak induktivní přístup. U aplikace metody „Simulace událostí“ jako u kvalitativní metody analýzy spolehlivosti probíhá simulace pouze na základě stochastického algoritmu.

Metoda „Simulace událostí“ umožňuje analyzovat až několik set prvků systému. Je způsobilá zpracovávat zálohované systémové struktury a je způsobilá zpracovávat kombinace poruch nebo událostí. Prakticky výhradně se při analýze spolehlivosti aplikuje pro podmnožinu událostí, které jsou poruchovými stavy.

Analýza není závislá na charakteru průběhu intenzity poruch. Je způsobilá analyzovat případné procesy obnovy a zpracovávat statisticky závislé situace oprav.

Výstupem metody je matematický model událostí při simulování různých kombinací stavů elementárních prvků analyzovaného (sub) systému.

2. Přehled a stručné charakteristiky kvantitativních metod analýz spolehlivosti

Metoda FMECA (Fault mode effects and criticality analysis)

Metoda FMECA - tj. Analýza druhů, důsledků a kritičnosti poruchových stavů - je induktivní kvantitativní metoda analýzy spolehlivosti. Je obzvláště vhodná ke studiu vzniku možných poruchových stavů objektu na nejbližší vyšší funkční úrovni systému.

Metoda FMECA rozšiřuje FMEA tím, že zahrnuje výsledky analýzy kritičnosti prostřednictvím kvantitativních ukazatelů spolehlivosti, které právě analýza kritičnosti přináší.

Ostatní základní charakteristiky této metody jsou shodné s metodou FMEA. Metodu FMEA jako metodu analýzy spolehlivosti definuje ČSN IEC 812:1992 nebo MIL 1629A:1984.

Metoda ETA (Event tree analysis) - kvantitativní

Metoda ETA - kvantitativní je induktivní metoda analýzy spolehlivosti systémů, která je ve své podstatě rozšířením kvalitativního stupně metody ETA o vyjádření ukazatelů spolehlivosti, které charakterizují pravděpodobnost vzniku události.

Ostatní základní charakteristiky této metody jsou shodné s metodou ETA - kvalitativní stupeň.

Metoda FTA - (Fault tree analysis) - kvantitativní

Metoda FTA - kvantitativní je deduktivní metoda analýzy spolehlivosti systémů, která je ve své podstatě rozšířením kvalitativního stupně metody FTA o vyjádření ukazatelů spolehlivosti, které charakterizují pravděpodobnost vzniku poruchového stavu.

Ostatní základní charakteristiky této metody jsou shodné s metodou FTA - kvalitativní stupeň. Metodu FTA definuje ČSN IEC 1025:1994.

Metoda RBD (Reliability block diagram) - kvantitativní

Metoda RBD - kvantitativní stupeň je možno chápat jako rozšířenou aplikaci metody RBD - kvalitativní o ukazatele bezporuchovosti. Z hodnot známých ukazatelů bezporuchovosti pro jednotlivé funkční bloky lze na základě známé struktury blokového diagramu bezporuchovosti (RBD) stanovit (většinou pomocí analyticky vyjádřené funkční závislosti) ukazatele bezporuchovosti analyzovaného objektu (systému).

Ostatní základní charakteristiky této metody jsou shodné s metodou RBD - kvalitativní stupeň. Metodu RBD charakterizuje ČSN IEC 1078:1993.

Markovova analýza (Markov analysis)

Metoda Markovovy analýzy je převážně induktivní (zdola nahoru) kvantitativní metoda analýzy spolehlivosti, která je vhodná pro vyhodnocení funkčně složitějších systémových struktur.

Metoda je založena na teorii Markovových řetězců. V principu se při ní podle matematických modelů vyhodnocují pravděpodobnosti, že jsou prvky objektu (elementární prvky, subsystémy) v určitém (funkčním) stavu, nebo že nastanou určité události ve specifikovaných časových bodech nebo intervalech. Metoda většinou bezprostředně navazuje na vytvořený diagram stavových přechodů, což je výsledek stejnojmenné kvalitativní metody analýzy spolehlivosti.

Pravděpodobnosti přechodu a způsob vzájemných vztahů mezi stavy znázorněný diagramem stavových přechodů umožňuje sestavit žádanou matici přechodů (matematický model) pro výpočty pravděpodobnosti bezporuchového provozu, resp. dalších ukazatelů bezporuchovosti, ale i ukazatelů udržitelnosti a zejména pohotovosti.

Ostatní základní charakteristiky této metody jsou shodné s metodou Stavový diagram přechodů. Metodu Markovova analýza charakterizuje ČSN IEC 1165:1996.

Metoda PC - Předpověď bezporuchovosti výpočtem z dílů (Parts count reliability prediction)

Metoda PC - Předpověď bezporuchovosti výpočtem z dílů je v zásadě induktivní (tj. zdola nahoru) kvantitativní metoda použitelná většinou během časných etap návrhu k odhadu přibližné intenzity poruch objektu.

Metoda poskytuje předpovědi ukazatele bezporuchovosti – intenzity poruch systému se sériovým zapojením bloků RBD na přijatelné úrovni přesnosti za předpokladu, že se provádí tzv. „analýza namáhání dílů“. Metoda PC se nejčastěji využívá pouze pro objekty, u nichž platí exponenciální zákona rozdělení pravděpodobnosti doby do poruchy.

Metoda PC umožňuje analyzovat až tisíc prvků systému. Není způsobilá zpracovávat zálohované systémové struktury. Není způsobilá zpracovávat kombinace poruch nebo událostí.

Simulace událostí (Event simulation) - kvantitativní

Kvantitativní metoda analýzy spolehlivosti „Simulace událostí“ může nabývat případů, kdy může mít jak deduktivní, tak induktivní přístup. U aplikace této kvantitativní metody probíhá simulace s hodnotami veličin a zadaným zákonem rozdělení pravděpodobnosti za účelem modelovat možnosti vzniku reálných stavů objektu a získat tak pomocí simulace hodnoty ukazatelů bezporuchovosti.

Ostatní základní charakteristiky této metody jsou shodné s metodou Simulace událostí - kvalitativní stupeň. Prakticky výhradně se při analýze spolehlivosti aplikuje pro podmnožinu událostí, které jsou poruchovými stavy.

3. Obecné zásady výběru metod analýzy spolehlivosti

Před zahájením analytické činnosti je nezbytné shromáždit údaje o analyzovaném systému ve tvaru odpovídající vstupům, bez kterých by nemohla být analýza předmětnou metodou provedena. S těmito vstupy lze pak provádět analýzy spolehlivosti pomocí metod analýzy spolehlivosti.

K analýze spolehlivosti je vhodné nejprve použít soubor kvalitativních metod jestliže:

- a) dosud nebyl příslušný objekt - z hlediska spolehlivosti - vůbec analyzován, nebo
- b) nejsou-li k dispozici pro aplikaci kvantitativních metod analýzy spolehlivosti příslušné vstupní kvantitativní parametry.

Proces výběru vhodných metod analýz spolehlivosti pro danou konkrétní situaci (tj. pro jejich následující aplikaci) lze rozčlenit do dvou elementárních fází:

1. fáze: Příprava množiny vstupních údajů pro proces systematického výběru vhodných metod analýz spolehlivosti

Ke každému objektu, který má být analyzován, musí náležet soubor kvalitativních a/nebo kvantitativních údajů o spolehlivosti. Pokud tento výrok neplatí, nemůže být provedena kvalitativní a/nebo kvantitativní analýza spolehlivosti.

Existující soubor kvalitativních a/nebo kvantitativních údajů o spolehlivosti **musí** být jednoznačně identifikován k jednotlivým etapám životního cyklu analyzovaného objektu, popř. v rámci jednotlivých etap životního cyklu analyzovaného objektu k jednotlivým významným časovým okamžikům (milníkům), v nichž se provádí např. upřesnění specifikace úkolů plánu spolehlivosti apod.

Z hlediska údajů o analyzovaném objektu je v této fázi nutné shromáždit veškerá dostupná data o analyzovaném objektu a realizovat proces jejich transformace. V rámci tohoto procesu se uskutečňuje:

- **selekcce údajů**, jejíž cílem je vyčlenit konkrétní údaje o analyzovaném objektu, která pro analýzy spolehlivosti nemají význam a jsou nepotřebná;
- **systemizace údajů**, jejíž cílem je systematicky uspořádat data nutná pro vznik výstupů procesu transformace veškerých dostupných dat o analyzovaném objektu.

Výstupy tohoto procesu jsou:

- a) vymezení příslušné etapy životního cyklu výrobku,
- b) jednotlivé údaje o spolehlivosti systému vztažené k dané etapě životního cyklu výrobku,
- c) soubor základních údajů o charakteru analyzovaného systému.

2. fáze: Systematický výběr množiny vhodných metod analýz spolehlivosti

Hlavní a nejdůležitější částí druhé fáze výběru vhodných metod analýz spolehlivosti je proces systematického výběru vhodných metod ze všech známých, možných nebo dostupných metod analýz spolehlivosti. Základním předpokladem pro uskutečnění tohoto procesu je existence relace, která vyjadřuje konstantní výčet vstupních parametrů obsahující nezbytně nutný počet a druh parametrů ve vazbě ke konkrétní zadané metodě. V případě, že by nebyl při realizaci analýzy dané metody dostupný jediný parametr z této množiny, není možné analýzu realizovat.

Výsledkem „Procesu systematického výběru vhodných metod analýz spolehlivosti“ je množina vhodných kvalitativních a kvantitativních metod pro daný analyzovaný objekt za daných, předem definovaných podmínek. Tuto množinu je vhodné nazývat „**Soubor možných kvalitativních a kvantitativních metod analýz spolehlivosti**“ a je možno ji rozčlenit na dvě podmnožiny/skupiny:

- a) skupina **metod schopných aplikace**,
- b) skupina **metod schopných aplikace s podmínkou**.

Podmnožina metod schopných aplikace obsahuje metody, u nichž je zabezpečena jejich aplikovatelnost, která není podmíněna nutností aplikace žádné jiné, předcházející metody v rámci jedné etapy životního cyklu analyzovaného objektu. Podmnožina metod schopných aplikace s podmínkou obsahuje metody, u nichž je zabezpečena aplikovatelnost za podmínky nezbytné aplikace alespoň jedné předcházející metody v rámci jedné etapy životního cyklu analyzovaného objektu.

Obecný postup výběru vhodných metod analýz spolehlivosti lze vyjádřit následující posloupností základních kroků:

- vytvoření (resp. naplnění) báze dat analyzovaného objektu,
- shromáždění dostupných údajů o spolehlivosti vztažených k dané etapě životního cyklu výrobku analyzovaného objektu,
- získání výsledného souboru možných kvalitativních a kvantitativních metod analýzy spolehlivosti.

Závěrečná poznámka

Uvedený přehled, stručná charakteristika a postup výběru možných metod analýz spolehlivosti je zaměřena zejména na analýzy bezporuchovosti, tj. schopnosti objektu plnit požadované funkce v daných podmínkách a v daném časovém období. Objektem se přitom rozumí jakákoliv část, součást, zařízení, část systému, funkční jednotka, přístroj, systém atd., s kterým je možno se individuálně zabývat. Objekt se může skládat z hardwaru, softwaru nebo obojího, mohou být do něho zahrnuti i pracovníci. Uvedený přehled a postup výběru metod analýz lze obdobně zpracovat a aplikovat na analýzy rizik pro hodnocení bezpečnosti objektu (přehled metod by bylo nutné mírně obměnit a doplnit o některé používané specifické, resp. k uvedeným metodám modifikované metody analýz rizik, jako jsou např. HAZOP – Studie nebezpečí a provozuschopnosti, PHA – Předběžná analýza nebezpečí, HRA – Posuzování spolehlivosti člověka apod.).

Je nutno zdůraznit, že po provedeném výběru vhodné/vhodných metod analýzy bezporuchovosti se souběžně s její/jejich aplikací na daný analyzovaný objekt provádějí analýzy udržitelnosti a nákladů.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČSN IEC 300-3-1 Řízení spolehlivosti - Část 3: Návod k použití - Oddíl 1: Metody analýzy spolehlivosti: Metodický návod. ČSNI, Praha 1993
- [2] MYKISKA, A.: Spolehlivost technických systémů. Vydavatelství ČVUT, Praha 2000
- [3] VOTAVA, P.: Metody analýzy spolehlivosti. Projekt I. Fakulta strojní ČVUT. Praha 1995
- [4] VOTAVA, P.: Systém výběru vhodných metod analýz bezporuchovosti. Doktorská práce. Fakulta strojní ČVUT. Praha 2001

CESTY K ZAJIŠTĚNÍ SPOLEHLIVOSTI V ETAPĚ NÁVRHU

Robustní design, citlivostní analýza a simulační pravděpodobnostní metody

Prof. Ing. Jaroslav M e n č í k, CSc., Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 53210 Pardubice, Studentská 95. E-mail: jarda.mencik@upce.cz

Úvod

Spolehlivost součástí a konstrukcí je definována jako schopnost plnit požadované funkce a zachovávat hodnoty vybraných parametrů v předepsaných mezích. Bohužel, většina činitelů, které mají na funkci konstrukce vliv, obvykle kolísá v určitém rozmezí, anebo může nabýt hodnoty jiné, než byly předpokládány při návrhu. To může mít za následek přerušení nebo zhoršení provozu zařízení. Uvedené odchylky mají řadu příčin:

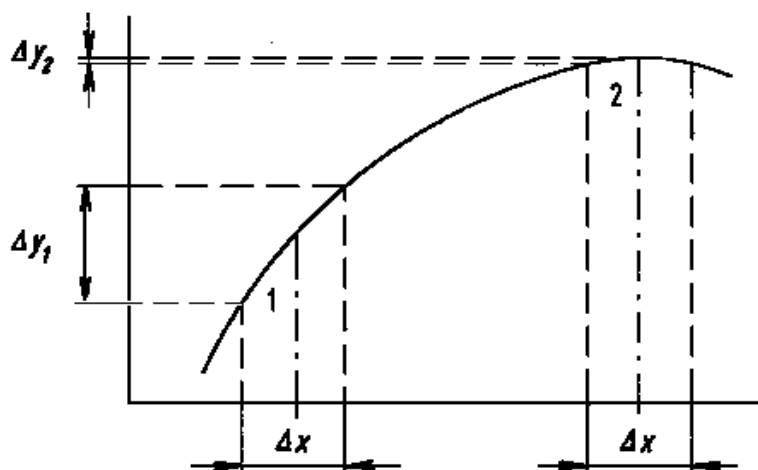
- náhodný charakter vstupních veličin (zatížení, materiálové vlastnosti, geometrie),
- nedostatečná znalost vstupních veličin (zatížení, přestup tepla, podmínky podepření konstrukce),
- zjednodušení modelů užitých při výpočtech (analytické modely, FEM, okrajové podmínky, pracovní diagramy materiálu),
- odchylky při výrobě nebo montáži (geometrie, materiály, zbytková napětí),
- proměnlivé podmínky provozu (zatížení, teplotní změny, klimatické vlivy),
- změny vlastností v průběhu života (opotřebení, koroze nebo jiné chemické změny, vliv ozonu nebo radiace).

Spolehlivost součástí, stroje nebo konstrukce je možné zajistit různými způsoby. Často se postupuje tak, že ve výrobě nebo při montáži se testují hotové výrobky, a vyřazují se ty, jejichž parametry překračují povolené meze. Tento přístup je však málo efektivní a znamená ztráty. Všeobecně se již uznává, že „klíčem ke kvalitě je pochopení příčin variability“ (W. E. Deming). Proto se dnes dává přednost filozofii, která klade důraz na etapu návrhu, a snaží se:

- definovat všechny možné způsoby selhání plnit požadované funkce a jejich příčiny, a to v průběhu celého života zařízení (FMEA, FTA),
- definovat všechny možné zdroje kolísání výstupních veličin,
- zjistit citlivost výstupních veličin na odchylky nebo kolísání vstupních veličin,
- určit přípustné tolerance všech vstupních veličin, které lze ovlivnit.

Etapa návrhu je mimořádně důležitá ještě z jednoho důvodu. Při návrhu se definují jmenovité hodnoty vstupních parametrů, jež dohromady tvoří tzv. návrhový (pracovní) bod. Vhodná volba pracovního bodu může někdy zajistit nízkou citlivost výstupní veličiny na kolísání nebo odchylky vstupních veličin, a tak zaručit vysokou spolehlivost - někdy dokonce i při nižších nákladech (obr. 1). Takovýto přístup se označuje jako **robustní design**. Jeho hlavním tvůrcem a propagátorem byl G. Taguchi; dnes však již existuje celá řada publikací na toto téma, např. [1 - 4].

Při každém návrhu je tedy nutno vyšetřit všeobecnou závislost mezi danými vstupními veličinami a výstupními veličinami, a provést citlivostní analýzu.



Obr. 1 Vliv polohy návrhového bodu (1, 2) na citlivost veličiny y na kolísání vstupní proměnné x .

Závislost mezi vstupními a výstupními veličinami

Závislost mezi výstupní veličinou y (tuhost součásti, dynamické nebo kinematické charakteristiky mechanismu, únosnost konstrukce, životnost, výkon stroje, spotřeba...) a vstupními veličinami x_1, x_2, \dots, x_n (modul pružnosti materiálu, geometrické veličiny, napětí v síti, teplota...) můžeme obecně vyjádřit ve tvaru $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Nejjednodušší situace je tam, kde pro y existuje (je znám) analytický výraz. U složitější úlohy provádíme výpočty pro vybrané kombinace hodnot vstupních veličin, a snažíme se proložit získané hodnoty vhodnou regresní funkcí (**odezвовá plocha**). V nejjednodušším případě uskutečníme několik skupin výpočtů, při kterých se vždy mění pouze hodnoty jediné veličiny (x_i), a ostatní veličiny si ponechávají svoje střední hodnoty $x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}$, odpovídající pracovnímu bodu (řezu odezвовou plochou), obr. 2. Potom hodnotami y_i pro jednotlivé skupiny proložíme například polynom,

$$y_i = a_{0i} + a_{1i} x_i + a_{2i} x_i^2 + \dots \quad (1)$$

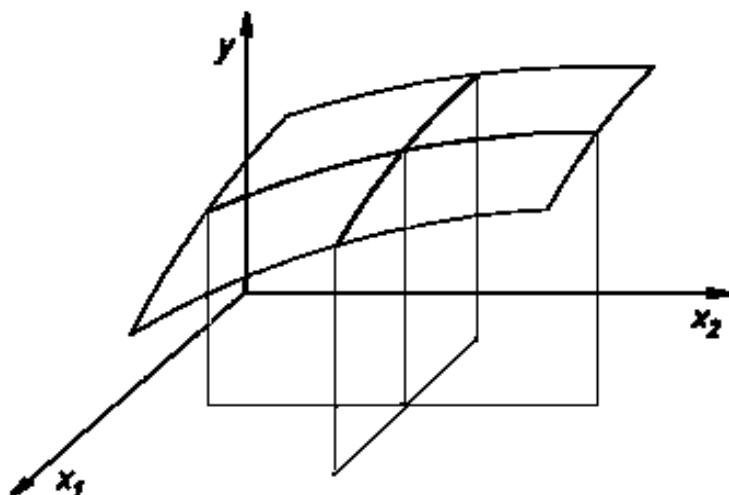
Grafické zobrazení pomůže nejen při volbě polynomu, ale i při posouzení vhodnosti polohy pracovního bodu. Výhodné je také vyjádření těchto polynomů ve tvaru

$$y_i = y_0 + a_i(x_i - x_{i0}) + b_i(x_i - x_{i0})^2 + \dots \quad (2)$$

který odpovídá Taylorovu rozvoji v okolí pracovního bodu. Index i značí i -tou proměnnou; y_i je aproximační vztah odpovídající této proměnné.

Popsaný způsob je jednoduchý, a můžeme při něm vystačit s nízkým počtem výpočtů. Jednotlivé funkce y_1, y_2, \dots, y_n však nemohou postihnout případné interakce některých vstupních veličin. Tam, kde můžeme interakce očekávat, je vhodnější prokládat odezвовou plochu body získanými pro současně se měnící všechny veličiny, např. ve tvaru

$$Y^* = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n + a_{n+1} x_1^2 + a_{n+2} x_2^2 + \dots \quad (3)$$



Obr. 2 Odezvová plocha $y(x_1, x_2)$
a řezy $x_1 = konst, x_2 = konst.$

nebo

$$y = y_0 + \sum a_i (x_i - x_{i0}) + \sum b_i (x_i - x_{i0})^2 + \dots \quad (4)$$

Vyjádření citlivosti výstupu na změny vstupních veličin

Základní informaci o citlivosti odezvy na změny jednotlivých činitelů v okolí pracovního bodu dostaneme prostřednictvím derivací,

$$c_i = \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)_{x_{i0}} \quad (5)$$

U analyticky vyjádřené odezvové plochy závisí tvar derivací na výrazu pro y . Pro lineární aproximaci odpovídají koeficienty c_i součinitelům a_i . Názornější představu získáme z relativních citlivostí,

$$c_{ri} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{x_{i0}}{y_0} \quad \left(\approx \frac{\Delta y}{y_0} / \frac{\Delta x_i}{x_{i0}} \right), \quad (6)$$

kde y_0 a x_{i0} jsou hodnoty odpovídající pracovnímu bodu, resp. středním hodnotám jednotlivých veličin. Koeficient c_{ri} vyjadřuje, kolikaprocentní změnu odezvy y způsobí jednaprocentní odchylka faktoru x_i od jmenovité hodnoty. Pro lineární aproximaci y platí $c_{ri} = a_i (x_{i0}/y_0)$.

Vliv náhodného kolísání vstupních veličin

Při vyšetřování vlivu náhodného kolísání vstupních veličin vycházíme z obecného vztahu pro rozptyl funkce více proměnných. Při menším rozptylu můžeme užít vztahu

$$s_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 s_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 s_{x_2}^2 + \dots, \quad (7)$$

kde $s_{x_i}^2$ je rozptyl i -té proměnné (čtverec směrodatné odchylky). Pro lineární aproximaci y platí

$$s_y^2 = a_1^2 s_{x_1}^2 + a_2^2 s_{x_2}^2 + \dots + a_n^2 s_{x_n}^2 + \dots \quad (8)$$

Jednotlivé složky, $s_{y_i}^2 = a_i^2 s_{x_i}^2$, udávají rozptyl y způsobený náhodným kolísáním pouze i -té veličiny. Vidíme, že příspěvek jednotlivých veličin k celkovému rozptylu je tím větší, čím větší je rozptyl příslušné veličiny ($s_{x_i}^2$), a čím větší je citlivost a_i výstupu y na změny x_i .

Někdy se pro posouzení vlivu kolísání vstupních činitelů užívá podíl variačního koeficientu i -té proměnné a variačního koeficientu výstupu odpovídajícího pouze kolísání této proměnné,

$$\omega_i = \frac{v_y}{v_{x_i}} = \frac{s_y}{y_0} \frac{s_{x_i}}{x_{i0}} \quad (9)$$

S ohledem na to, že pracujeme s omezenými velikostmi souborů, značí s_{x_i} , y_0 a x_{i0} výběrovou směrodatnou odchylku a výběrové průměry.

Výraz, který dostaneme vydělením vztahu (8) celkovým rozptylem s_y^2 , udává relativní podíly jednotlivých činitelů na celkovém rozptylu,

$$1 = a_1^2 \frac{s_{x1}^2}{s_y^2} + a_2^2 \frac{s_{x2}^2}{s_y^2} + \dots + a_n^2 \frac{s_{xn}^2}{s_y^2} + \dots \quad (10)$$

Ukazuje názorně, které vstupní veličiny způsobují největší kolísání výstupní veličiny, a může být základem pro předepisování tolerancí jednotlivých činitelů.

Posuzování citlivosti simulačními metodami

Vliv náhodného kolísání jednotlivých veličin můžeme posoudit i bez analytického vyjádření odezvové funkce, jestliže použijeme některou z pravděpodobnostních simulačních metod.

Nejstarší a nejjednodušší je tzv. **metoda Monte Carlo**. Její podstatou je mnohonásobné opakování „pokusů“ na počítači. Při každém pokusu se jednotlivým vstupním veličinám přiřadí náhodná hodnota, ovšem generovaná vhodným programem tak, aby odpovídala rozdělení pravděpodobnosti příslušné veličiny. Pro každou takovou kombinaci vstupních veličin (zatížení, mez kluzu, počáteční délka trhliny, vůle mezi čepem a pouzdrem apod.) se vypočítá hodnota výstupní veličiny. Po mnohonásobném opakování těchto výpočtů můžeme sestavit histogram, který odpovídá jejímu rozdělení pravděpodobnosti. Z něj můžeme zjistit aritmetický průměr a směrodatnou odchylku, ale také přibližné meze, ve kterých se bude sledovaná veličina vyskytovat např. s 95-procentní pravděpodobností, popř. extrémní hodnoty, které budou překročeny jen s pravděpodobností 0,001 apod. [5, 6]. Z těchto údajů pak vycházíme i při určování parametrů pracovního bodu a vstupních veličin a při stanovení jejich tolerancí.

Předpokladem pro simulační výpočty Monte Carlo je znalost rozdělení pravděpodobnosti jednotlivých vstupních veličin a vhodný počítačový program. Rozdělení pravděpodobnosti získáme buď pomocí experimentů a zkoušek (doba do poruchy určitého prvku), od výrobců (např. histogramy meze kluzu oceli), z podkladů o výrobě (kolísání rozměrů při sériové výrobě) apod. Základem počítačových programů pro metodu Monte Carlo je program pro generování pseudonáhodných čísel s různými rozděleními pravděpodobnosti. Podobné generátory má dnes prakticky každý programovací jazyk, a jednodušší simulační úlohy můžeme řešit například i pomocí Excelu. Protože ale zpravidla je nutno několik tisíc až několik set tisíc opakování pokusů, je vhodnější vyvinout si vlastní program nebo užít některý program komerční. U nás to jsou například programy M-Star a Ant-Hill [5], které umožňují modelovat výsledné rozdělení pravděpodobnosti funkce až třiceti náhodných veličin. Tyto programy jsou užívány například pro posuzování spolehlivosti stavebních konstrukcí, ale také pro předpověď délky života konstrukcí namáhaných na únavu. Lze je však používat i v mnoha dalších oblastech.

Důležitou otázkou při použití metody Monte Carlo je počet simulací N potřebný pro dosažení určité přesnosti, resp. věrohodnosti výsledků. Přibližně platí

$$N = \frac{4(1 - P)}{P \delta^2} \quad (11)$$

kde P je pravděpodobnost vyšetřovaného jevu (např. poruchy) a δ je relativní chyba ve stanovení P . S klesající hodnotou P proto potřebný počet simulací značně narůstá. Například pro posouzení určitého jevu očekávaného s pravděpodobností $P = 10^{-2}$, a při povolené desetiprocentní chybě při stanovení P , tj. $\delta = 0.1$, vychází $N \approx 40000$ simulací, při $P = 10^{-3}$ je to již 400000 simulací atd. Metoda Monte Carlo je proto při nízkých hodnotách P použitelná jen pokud lze závislost Y na X vyjádřit jednoduchým analytickým výrazem. V takovém případě trvají simulační výpočty několik sekund až minut. Často je však nutno zjišťovat $Y(X)$ poměrně zdoluhavým postupem, např. výpočet odezvy konstrukce metodou konečných prvků (MKP) či

úlohy s nelinearitami. V takovém případě není přímé použití metody Monte Carlo efektivní, a užívá se např. její kombinace s **metodou odezvové plochy**. Základní výpočty (např. MKP) provedeme pouze pro vybrané kombinace hodnot vstupních veličin, získané výsledky proložíme vhodnou analytickou (regresní) funkcí, a samotné simulační pokusy Monte Carlo provádíme již pouze s touto odezvoovou plochou [7].

Existují i další pravděpodobnostní metody, které vystačí s menším počtem simulačních pokusů, např. **Latin Hypercube Sampling** (LHS) nebo různé postupy označované jako **importance sampling**. Podrobnosti lze najít např. v [6, 8].

Při použití pravděpodobnostních simulačních metod můžeme vliv náhodného kolísání jednotlivých veličin posoudit i bez analytického vyjádření odezvové funkce. Stačí, uskutečnili-li metodou Monte Carlo nebo LHS m určité množství simulačních pokusů, kdy náhodnou proměnnou je pouze x_i , a pro takto získané rozdělení y vypočítáme rozptyl $s_{y_i}^2$. S použitím statistických charakteristik s_{x_i} , x_{i0} , y_0 můžeme potom také vypočítat podíly variačních koeficientů ω_i nebo součinitele citlivosti $a_i (= s_y/s_{x_i})$ a relativní citlivosti c_{ri} .

Přibližnou hodnotu celkového rozptylu obdržíme sečtením dílčích rozptylů,

$$s_y^2 = s_{y1}^2 + s_{y2}^2 + \dots + s_{yn}^2 + \dots \quad (12)$$

Přesnější hodnotu dostaneme, uvažujeme-li při simulacích jako náhodné proměnné současně všechny vstupní veličiny x_1, x_2, \dots, x_n , a rozptyl vypočítáme ze všech hodnot y_j . Vydělením výrazu (12) celkovým rozptylem s_y^2 získáme relativní podíly jednotlivých činitelů.

Výhodou těchto přístupů je, vycházejí z nezjednodušených (linearizovaných) výrazů. Jsou proto vhodné zejména při větších rozptylech a silně nelineárním charakteru závislosti $y(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Jestliže rozdělení některých vstupních proměnných a zejména výstupu y jsou výrazněji nesymetrická, není ani charakterizování prostřednictvím směrodatných odchylek nebo rozptylů dostatečně výstižné. Výhodnější může být např. posuzovat, jaký má náhodné kolísání jednotlivých vstupních veličin vliv na hranice intervalu spolehlivosti obsahujícího 90 nebo 99 procent všech hodnot y apod.

Stanovení optimálních tolerancí vstupních veličin

Jestliže kolísání veličiny y je větší než požadované, je nutno je zmenšit. Ze vztahu (8) vidíme, které faktory na ně mají největší vliv. V dalším budeme předpokládat, že rozmezí pravděpodobného výskytu y (tj. šířka $\square y_a$ alfa-procentního konfidenčního intervalu) je přímo úměrné směrodatné odchylce s_y , tj. odmocnině z rozptylu. (Tento předpoklad platí přesně pro normální rozdělení, přibližně jej však lze užít i pro další rozdělení.) Chceme-li zúžit toleranci y z $\square y_a$ na $\square y_a'$, musíme ve stejném poměru zmenšit i směrodatnou odchylku y z původní hodnoty s_y na s_y' .

Určování tolerancí jediné veličiny

Často převažuje vliv jediného činitele, např. x_k , a potom pro zmenšení rozptylu stačí omezit se na něj. Ze vztahu (8) vyplývá, že zmenšení rozptylu y můžeme dosáhnout např. zmenšením směrodatné odchylky s_{x_k} nebo zmenšením citlivosti y na změny x_k (součinitel a_k). Zmenšení kolísání x_k dosáhneme např. přesnější výrobou (přidáním operace broušení po soustružení apod.) nebo pečlivější kontrolou a vyřazováním dílů které budou mimo nové toleranční meze. To samozřejmě znamená zvýšení nákladů. Zmenšení citlivosti y na změny x_k můžeme docílit změnou parametrů pracovního bodu. Jako všeobecně známý příklad lze uvést předpjaté šroubové spoje: použitím dlouhých svorníků a rozpěrných trubek se zvětší poddajnost spoje a sníží citlivost předpětí na teplotní dilatace přírub. Někdy kombinujeme obě možnosti. Potřebnou upravenou hodnotu směrodatné odchylky s_{x_k}' nebo součinitele citlivosti a_k' určíme ze vztahu

$$a_k' s_{x_k}' = a_k s_k \sqrt{1 - \frac{s_y^2 - s_y'^2}{a_k^2 s_{x_k}^2}} = a_k s_k \sqrt{1 - \frac{s_y^2 - s_y'^2}{s_{y_k}^2}} \quad (13)$$

kteřý plyne z rozdílu výrazu (8) napsaného pro s_y , $a_k s_{xk}$ a pro s_y' a $a_k' s_{xk}'$. Maximální zlepšení, dosažitelné omezením kolísání jedné vstupní proměnné, zjistíme, jestliže do (8) dosadíme místo příslušné složky rozptylu nulu. Postup budeme ilustrovat na příkladu dle [9].

Příklad. V přesném přístroji je použita pružina ve tvaru pásku s jedním koncem vetknutým. Pásek o délce $l = 10$ mm, šířce $b = 1$ mm a tloušťce $h = 50$ mm, vyrobený z materiálu o modulu pružnosti $E = 200$ GPa, má poddajnost $C = 4l^3/(Ebh^3) = 0,16$ m/N. Každá ze vstupních veličin má variační koeficient $v_l = v_b = v_h = v_E = v = 0,01$. Variační koeficient poddajnosti, odvozený s použitím vztahu (5), je $v_C = (9v_l^2 + v_E^2 + v_b^2 + 9v_h^2)^{1/2} = 0,0447$, a směrodatná odchylka je $s_C = Cv_C = 0,00716$ m/N. Takovýto rozptyl poddajnosti je nepřijatelně velký a musí být snížen pod $s_C' = 0,004$ m/N.

Odpovídající snížený koeficient variace je $v_C' = s_C'/C = 0,004 / 0,16 = 0,025$. Je možné zmenšit rozptyl l , b a h (materiál se nemění). Nejsnadnější by bylo snížit rozptyl (pouze) l . Ale i kdyby tento rozptyl byl roven nule, variační koeficient poddajnosti by byl $v_C' = 0,033$, což je více než požadovaných 0,025. Je tedy nutno zmenšit rozptyl všech tří veličin (l , b a h). Pokud jejich nové variační koeficienty budou stejné, $v_l' = v_b' = v_h' = v_E' = v'$, odpovídající hodnota, kterou dostaneme užitím podobného postupu jako v rovnici (10), bude

$$v' = \sqrt{v^2 - (v_C^2 - v_C'^2) / (9 + 1 + 9)} = 0,005256$$

Je tedy nezbytné snížit variační koeficienty l , b a h na (přibližně) 0,005. Výsledné směrodatné odchylky jsou $s_l' = 0,05$ mm, $s_b' = 0,005$ mm, $s_h' = 0,25$ mm. V tomto případě bude $v_C' = 0,024$ a $s_C' = 0,0038$ m/N. Skutečné tolerance jednotlivých veličin je však možno přizpůsobit konkrétním výrobním možnostem, přičemž hlavní podmínkou je $s_C' \leq 0,004$ m/N.

Určování tolerancí více veličin

Pokud se uplatňuje kolísání několika vstupních veličin, musíme uvážit, které z nich budeme omezovat. Protože směrodatná odchylka je rovna odmocnině z rozptylu, je zřejmé, že u veličiny, která se na celkovém rozptylu y podílí pouze pěti nebo deseti procenty, přinese zmenšení kolísání jen malý efekt. Navíc se jedná o otázku nákladů, které obvykle narůstají se zmenšováním rozptylu. Při použití stejných výrobních technologií můžeme malou změnu nákladů vyjádřit přibližně jako:

$$N_i' = N_i + k_i (s_{xi} - s_{xi}') \quad , \quad (14)$$

kde N_i jsou náklady odpovídající výrobě zaručující směrodatnou odchylku i -té veličiny s_{xi} , a N_i' jsou náklady odpovídající směrodatné odchylce s_{xi}' . Pro stanovení konstanty k_i stačí znát velikost nákladů pro dvě přesnosti výroby v uvažovaném rozmezí.

Celkové náklady dostaneme sečtením položek odpovídajících jednotlivým veličinám,

$$N = \sum N_i \quad . \quad (15)$$

Přípustné rozptyly nebo směrodatné odchylky jednotlivých vstupních veličin dostaneme potom řešením obecné optimalizační úlohy, například lineárním programováním. Tento typ úloh lze snadno řešit i programem Excel, pomocí příkazu Řešitel. Sledovanou veličinou jsou celkové náklady (15), kde jednotlivé složky vyjádříme prostřednictvím výrazu (14). Jako kritérium optimalizace zadáme $N = \min$, a jako omezující podmínku $s_y \leq s_{dov}$. Měněnými veličinami jsou s_{x1} , s_{x2} , ... s_{xn} . Můžeme zadat i další omezující podmínky; například $s_{xj} > C_j$, jestliže není technicky možné snížit směrodatnou odchylku veličiny x_j pod hodnotu C_j .

Uvedenou optimalizační úlohu se vyplatí řešit i v případě, kdy rozptyl s_y^2 je již z prvního návrhu vyhovující, nebo by mohl být dokonce vyšší. Jednotlivým vstupním veličinám budou totiž přiřazeny tolerance tak, aby celkové náklady byly nejnižší. V některých případech lze tedy některé tolerance zvýšit a výrobní náklady tak snížit.

Někdy nelze spojitě měnit rozptyl jednotlivých faktorů, popřípadě je možné omezit jejich kolísání pouze kontrolou a vyřazováním mimotolerančních dílů. Rozdělení příslušné veličiny je potom cenzorované. V takových případech slouží uvedené vztahy jen pro hrubý odhad, a rozsah a účinek našich úprav musíme zkoumat pomocí simulací Monte Carlo nebo LHS. Protože ale

všechny postupy uvedené v tomto příspěvku vycházely z některých přibližných předpokladů, je vhodné šířku pravděpodobného rozmezí y pro navržené hodnoty $S_{x1,dov}$, $S_{x2,dov}$, ... $S_{xn,dov}$ nebo $\square_{x1,a}$, $\square_{x2,a}$, ... ověřovat simulací pokaždé.

Poznámka. Některé z uvedených poznatků byly získány v rámci výzkumných záměrů Dopravní fakulty Jana Pernera č. MSM 255100001 a MSM 255100002, a grantové úlohy GAČR 103/01/0243.

Literatura

1. Taguchi, G.: Taguchi on Robust Technology Development. ASME Press, New York, 1993.
2. Taguchi, G., Elsayed, E., Hsiang, T.: Quality engineering in production systems. McGraw-Hill, New York, 1989.
3. Fowlkes, W. Y., Creveling, C. M.: Engineering methods for robust product design. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 1995.
4. Dieter, G. E.: Engineering design. New York: McGraw-Hill, 1991.
5. Marek, P., Guštar, M., Anagnos, T.: Simulation based reliability assessment for structural engineers. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1995.
6. Teplý, B., Novák, D.: Spolehlivost stavebních konstrukcí. FAST VUT Brno, 1999.
7. Fridrich, F., Menčík, J.: elastostatická a citlivostní analýza pražové pružiny. Konf. Inženýrská mechanika, Svatka, 15. - 18. května 2000. Sborník, díl IV, s. 103 - 108. ÚTAM AVČR, Praha, 2000.
8. Florian, A.: Moderní numerické simulační metody - přehled. *Stavební obzor*, 7 (1998) No. 2, s. 60 - 64.
9. Menčík, J.: Spolehlivostní optimalizace parametrů a tolerancí v etapě návrhu. Konference Spolehlivost 2001, Vojenská akademie Brno, 18. - 19. září 2001.

ROZBOR A ANALÝZA DAT PRO HODNOCENÍ PROVOZNÍ SPOLEHLIVOSTI

Ing. Libor Obruča

Obsah

1. Úvod do problematiky
2. Cíl a vstupní podmínky k řešení
3. Proudý poruch
4. Data zatížená nepřesnostmi a jejich cenzura - analýza proudů poruch
5. Zjišťování provozní poruchovosti – ukazatele bezporuchovosti spolehlivosti výrobku
6. Odkazy na literaturu

1. Úvod

Všimněme si, že v naší republice v mnoha případech současné praxe systémů řízení jakosti probíhá zabezpečování jakosti výrobků v organizacích bez zvláštní péče o jejich spolehlivost. Významní odborníci a zejména mnozí ctihodní „misionáři“ systémů řízení jakosti (QMS –Quality Management Systems) tuto skutečnost často ignorují s tím, že „...spolehlivost výrobků vznikne přece automaticky tím, že jsou uplatňovány zásady QMS...“ nebo vznikající stav omlouvají, např. tím, že v mnoha organizacích byly zlikvidovány zkušebny, v mnoha organizacích chybí vývojové útvary, natož možnost výzkumu a zejména nejsou peníze a čas věnovat se systematickému zabezpečování požadované nebo potřebné úrovně spolehlivosti výrobků – a tím je pro ně spolehlivost vyřízena. Pak máme certifikované organizace produkující kvalitní výrobky i služby, ale poněkud poruchové nebo chybí údržba apod.

Je ovšem pravda, že existuje řada odvětví, výrobců, dealerů, ale zejména uživatelů, kteří tento významný aspekt použitelnosti výrobků – jejich úroveň provozní spolehlivosti, musí respektovat a vyžadovat. Těm se omlouvám, protože ti velmi dobře vědí, jak „snadno“ vzniká něco automaticky, obzvláště spolehlivost. Těch se tento článek týká jen informativně.

Poznamenejme, že nadpis článku je vědomě zjednodušen a teoreticky nepřesný, protože nebudeme zjišťovat „provozní spolehlivost“, ale „provozní poruchovost“ zjišťováním ukazatele bezporuchovosti spolehlivosti. Je to proto, že se ve veřejnosti často pod pojmem „spolehlivost výrobku“ rozumí „bezporuchovost výrobku“, resp. jeho poruchovost. Zavinily to chybné překlady slova „reliability“ a dosud nezažitý pojem „dependability“ = spolehlivost.

Obsah článku se nemůže zabývat celou šíří a rozmanitostí problému, jakým je analýza provozních dat. V tomto článku se soustřeďuji pouze na jedno hledisko vycházející z jednoduché grafické analýzy tzv. „proudu poruch“.

2. Cíl a vstupní podmínky k řešení

Připomeňme si tři základní problémy spojené se zabezpečováním spolehlivosti výrobků:

1. vědět jaké ukazatele spolehlivosti by měl náš výrobek mít, aby uspokojoval zákaznickovy představy a potřeby
2. vědět, jak je dosáhnout
3. vědět, jak se přesvědčit, že byly požadované ukazatele spolehlivosti dosaženy, resp. vědět jaké byly dosaženy.

Ad 1 – to znamená mít informace cizí i svoje o tom co náš zákazník potřebuje

Ad 2 – umět a mít potřebné prostředky a odborníky, kteří teorii a hlavně praxi spolehlivosti ovládají

Ad 3 – jako ad 2 s tím, že musíme navíc mj. umět využívat všechny dostupné možnosti, které praxe a zejména zpětné informační vazby nabízí.

Připomeňme rovněž, že v systémech řízení jakosti (QMS) existují stanovené pokyny v ČSN EN ISO 9001:2001 – viz § 7.5.2 „Validace procesů výroby a poskytování služeb“, které vyžadují po výrobci (ve smyslu citované normy) zvláštní pozornost ke spolehlivostním vlastnostem výrobku. Je to tam jenom jinak formulováno než, aby se mluvilo s spolehlivostí. Mj. „... Zahrnuje to všechny procesy, jejichž nedostatky se projeví až poté, co se výrobek používá nebo byla poskytnuta služba ...“.

V systémech řízení jakosti se často v analýzách systémů vyžadují rozbor rizik. Přitom zjišťování rizika vždy obsahuje nejméně dva aspekty – zjištění pravděpodobnosti vzniku nežádoucího rizikového jevu a zjištění důsledků, které z tohoto jevu vyplývají.

Pravděpodobnost jevu lze odhadovat, počítat a zjišťovat nejrůznějšími způsoby, vždy s určitými omezeními a přesností - konfidencí.

Celou šíři této problematiky nelze v tomto článku rozebírat. Důležité je začít s postupným využíváním dat, které poskytují informace o provozování našich výrobků. V prvním přiblížení se proto zaměříme na základní cíl – postupně získávat předběžné a později přesnější matematicko-statistické odhady pravděpodobnosti vzniku žádoucích i nežádoucích jevů. K tomu potřebujeme, alespoň s dostačující přiblížeností, znát některé ukazatele bezporuchovosti. To vždy vyžaduje určité zjednodušující předpoklady, protože realita je obvykle velmi rozmanitá.

Zjednodušující předpoklady:

1. Sledované výrobky (objekty) jsou opravitelné (obnovitelné) ⁺⁾
2. Příčiny poruch ve sledovaných objektech, nejsou systematické, ale mají náhodný charakter a jsou tzv. málo četné v průběhu použitelné fáze jejich technického života – jinými slovy lze matematicko-statisticky aproximovat fyzikálním exponenciálním rozdělením dob mezi poruchami. Takové předpoklady platí např. pro elektronické výrobky, ale také obecněji i pro složité obnovované výrobky (systémy) s mnoha součástkami.
3. Způsoby prováděné údržby (mj. provádění oprav po poruchách) jsou odborně na výši a lze proto s určitou pravděpodobností vyslovit předpoklad, že jednotlivé součástky (komponenty) výrobku jsou tzv. „nestárnoucí“ a po provedené údržbě „jako nové“.

⁺⁾ U neobnovovaných objektů (např. elektronických součástek, mechanických neopravitelných dílů apod.) je situace jednodušší a odhady ukazatelů spolehlivosti jsou obecně přesnější. Lze aplikovat jen tzv. teorii spolehlivosti, zatímco u obnovovaných výrobků je nutné se řídit i pravidly tzv. teorie obnovy.

Důvody uvedených zjednodušení jsou zřejmé. Počítání pravděpodobností, za předpokladu platnosti vysloveného předpokladu o exponenciálním rozdělení dob do poruchy, vyžaduje jednoduchou aritmetiku. Takový předpoklad vyslovený v prvním přiblížení je lepší než bezradné mrhání časem a přešlapování, jak začít.

Po získání dostatečného počtu informací je nezbytné postupně provádět test uvedené hypotézy a zjištění, jaké fyzikální nebo jiné rozdělení lze na daný objekt použít. V mnoha případech zjišťujeme, že je pro vlastnosti bezporuchovosti tento „exponenciální“ předpoklad dostačující. Naopak pro úlohy zjišťování dob života, dob obnovy apod. nikoliv.

3. Proudý poruch

Poznamenejme, že dále uvedená analýza proudu poruch se používá i při laboratorních nebo hangárových zkouškách spolehlivosti, tj. v uměle simulovaných provozních podmínkách. Výhodou takových zkoušek je, že získaná data jsou méně zatížena nepřesnostmi a jsou úplnější a lze zjišťovat všechny potřebné ukazatele spolehlivosti výrobku (nejen bezporuchovosti, ale i obnovitelnosti = udržitelnosti, zajištěnosti údržby, pohotovosti apod.). Nevýhodou je, že skutečné provozní podmínky jsou vytvořeny pouze částečně a že takové zkoušky jsou ekonomicky mnohem náročnější ve srovnání s tzv. provozními zkouškami spolehlivosti.

Základním problémem zjišťování provozní spolehlivosti výrobku je získávání vhodných dat o provozu. Z praxe vím, že tento problém je vždy řešitelný. Nebývá to snadné a zejména to chce často vhodná zainteresování provozních pracovníků.

Z naší strany pak platí následující zásady, které musíme dodržovat:

- Provozní pracovníci musí vždy počítovat náš zájem o poskytovaná data a je vhodné je informovat o výsledcích na nichž se podílejí.

- Jimi získaná data musíme pravidelně odebírat, aby počítávali svoji důležitost v akci na níž se zúčastňují a musí vědět, že případné „vymyšlenosti“ v poskytovaných datech lze dříve nebo později odhalovat.

Důležitým nástrojem pro zjišťování nenormálností v provozních datech nebo ve stavu sledovaného výrobku jsou analýzy proudů poruch.

Proud obnovy - „proud poruch“

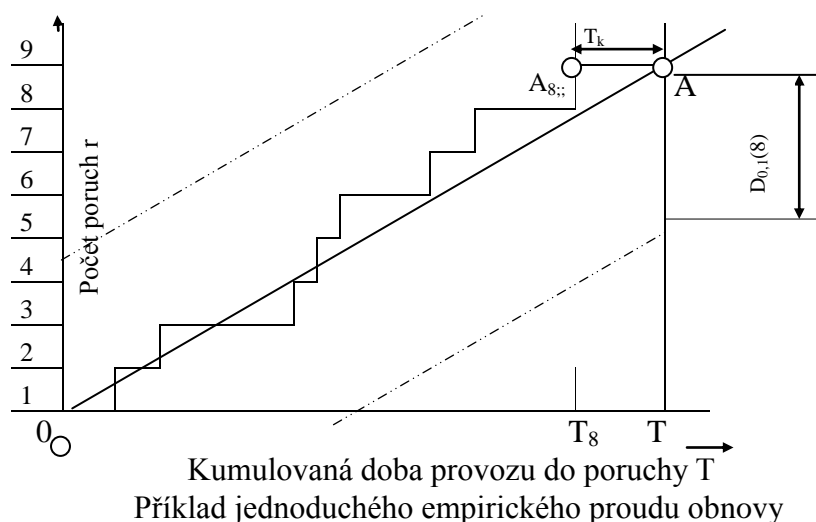
Vznikající poruchy v průběhu provozní doby ve sledovaném výrobku a po nich následující doby obnovy a další provozní doby do poruchy nazýváme **proudem poruch obecného procesu obnovy**. Pokud si doby prováděných obnov nebo jiných přerušení provozu (např. vypnutí výrobku) z tohoto proudu vypustíme – virtuálně budeme předpokládat, že jsou obnovy okamžité - dostáváme tzv. **proud jednoduchého procesu obnovy**. Označíme si ho jako funkci $H_n(T)$.

Dobou T označíme

$$T = \sum_{i=1}^n T_i + T_k \quad \dots (1)$$

T je kumulovanou dobou tvořenou sečtením jednotlivých úseků provozních dob mezi jednotlivými poruchami T_i , do vzniku n -té poruchy ($i = 1, 2, \dots, n$) a časový úsek provozu do ukončení sledování T_k .

Zdvih (pořadnice) funkce $H_n(T)$ od prvé do n -té poruchy je n jednotkových skoků (tj. ve zvoleném měřítku se na pořadnici počtu poruch, např. při $n = 8$ nabývá $H_9(T_9)$ hodnotu 8 jednotkových skoků.



Úsečku (obvykle nepřesně „přímku“) OA označíme jako tzv. teoretickou spojitou funkci $H(T)$ proudu poruch v intervalu $0 \leq T \leq T_9$.

Tato úsečka odpovídá případu virtuálního výrobku, jehož provozní doby mezi poruchami odpovídají exponenciálnímu rozdělení a je to tedy teoretická funkce rozdělení jednoduchého proudu obnovy.

Pokud schodovitá empirická funkce sleduje teoretickou úsečku OA a statisticky významně se od ní neodklání, lze prohlásit, že sledovaný výrobek (resp. výrobky) jsou v tzv. „normálním“ provozním stavu a výsledky lze věrohodně vyhodnotit ze získaných údajů – tj. podle pravidel platných pro exponenciální rozdělení dob do poruchy. *)

Registrováno celkem poruch $r = n = 8$... (2)
 Kumulovaná doba sledování T (např. 21900 h).**) ... (3)

Odtud tzv. „bodový odhad“ střední hodnoty MTBF $m_{P.E.} = T / n = 21900/8 \approx 2700$ h

kde bodový odhad vyznačíme indexem P.E. Point Estimate), $m_{P.E.} = MTBF_{P.E.}$ (Mean operational Time Between Failures).

Bodový odhad MTBF odhadem střední hodnoty. Při předpokladu exponenciálního rozdělení je nejlepším odhadem této střední hodnoty náhodné veličiny $\tau = T$ výběrový aritmetický průměr,

$$MTBF_{P.E.} = m_{P.E.} = \bar{x}_n = T / n = 1/n \left(\sum_{i=1}^n T_i + T_k \right) \quad \dots (4)$$

*) Pro statistické odhady, vycházející z předpokladu (statistické hypotézy), že sledovaný výrobek, resp. výrobky vykazují poruchovost, kterou lze modelovat exponenciálním rozdělením dob do poruchy, je třeba hypotézu ověřit a provádět, kromě popsaného testu, např. statistické testy tzv. „dobré shody“. Viz např. podle normy [2].

**) Nepřetržitá doba provozu za rok je 8760 h. Z uvedeného příkladu vidíme, že by šlo o dvou a půlleté sledování jednoho výrobku. Metoda dovoluje kumulaci napozorovaných hodnot i při více sledovaných objektech, za předpokladu, že pracují za přibližně stejných podmínek. Zde např. bylo sledováno $N = 5$ výrobků po dobu cca půl roku.

Co to znamená, že se empirická funkce {schodovitá funkce $H_n(T)$ } „statisticky významně neodklání od teoretické funkce $H(T)$ – přímky (úsečky) OA“?

Na zvolené úrovni významnosti α , při zjištěném počtu jevů (poruch) n vyhledáme ve statistických tabulkách kritických hodnot největšího odklonu empirického rozdělení od teoretického a zakreslíme do grafu na Obr. 1 tzv. „kritickou přímku“ jednostranného testu, resp. dvě „kritické přímky“ při dvoustranném testu. Na Obr. 1 jsou tyto „kritické přímky“ zakresleny čerchovanou čarou, resp. čerchovanými čarami. Ty jsou rovnoběžné s teoretickou funkcí $H(T)$ a jsou svisle posunuty o tabelovanou (viz tabulku 6.2 v [1]) kritickou hodnotu α (při jednostranném testu), resp. o $\alpha/2$ na obě strany od $H(T)$.

V daném příkladu při $r = n = 8$ poruch; $\alpha = 0,2$ pro jednostranný test, resp. pro oboustranný test $\alpha/2 = 0,1$...
 $D_{0,1}(8) = 0,41$.

Poznámka:

Hodnotu úrovně významnosti α volíme podobně jako úroveň konfidence γ (které jsou ve vzájemném vztahu $\alpha = 1 - \gamma$) při statistických odhadech MTBF, v závislosti na tzv. velikosti výběru, tj. na počtu pozorovaných jevů – na počtu registrovaných poruch r . Při vyšších hodnotách α jsme přísnější, protože kritická oblast se zužuje.

Při normálně prováděných statistických odhadech, např. v popisné statistice, se volí úroveň významnosti $\alpha = 0,01$ apod. V těchto případech výběrových statistických odhadů, při malých výběrových souborech bychom dostali kritické meze velmi široké a test by neměl žádnou vypovídací hodnotu. Navíc podle tzv. teorie „růstu bezporuchovosti v čase“, provádíme jakousi predikci v odhadu, za předpokladu normálního technického vývoje výrobku, který sledujeme. Mlčky předpokládáme, že po delší době sledování většího počtu provozovaných výrobků, kdy budeme registrovat v kumulovaných datech větší počet jevů (obdržíme větší výběry), že se

bezporuchovost výrobku povolna zvyšuje. Statistické odhady budeme zpřesňovat a hodnotu úrovně významnosti α zmenšovat, respektive meze konfidence γ zvyšovat. Při vyhodnocování ukazatele bezporuchovosti (MTBF) z provozních zkoušek používáme např. v počátečních odhadech konfidenční meze $\gamma = 0,6$ (60%). Při laboratorních (hangárových) zkouškách bezporuchovosti, jsou vyžadovány normou hodnoty konfidence $\gamma = 0,1$ nebo $0,05$.

Doporučuji používat v počátcích a prvých odhadech odklonu empirické funkce od teoretické, testovací úroveň významnosti volit $\alpha = 0,20$ (20%) při jednostranném odhadu, resp. $\alpha/2 = 0,1$ (10%) při oboustranném odhadu.

Při kumulování dat z většího počtu registrovaných a sledovaných výrobků $\alpha = 0,05$ (5%) a méně.

4. Data zatížená nepřesnostmi a jejich cenzura - analýza proudů poruch

V průběhu proudu poruch se setkáváme nejméně se dvěma důvody nenormálností.

A. Nepřesnostmi zavlečenými zdrojem informací

B. Nenormálními průběhy, způsobenými technickým stavem sledovaných výrobků

Ad A) Je to zaviněno nepozorností, někdy i úmyslem a lze to obvykle napravit administrativně-organizačními zásahy.

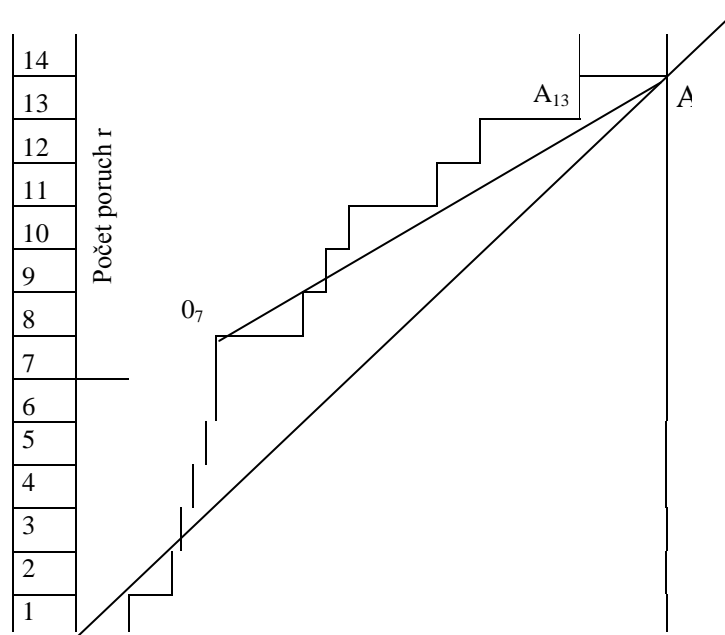
Ad B) • B1– Výrobky nebo jen některý mají poruchy ze systematické příčiny, mezi něž patří i přechodné poruchové stavy způsobené např. neodstraněnými příčinami a opakovaně se projevujícími závislými poruchami

- B2– Ve výrobku se projevují tzv. „časné poruchy“ – early mortality failures

- B3– Výrobek je na konci svého technického života a četnost poruch se zvyšuje

v čase.

V průběhu proudu poruch se projevují naznačené nenormálnosti následujícím způsobem:



Na Obr. 2 je nakreslen případ odpovídající odstavci 4.B1 a B2.

Pro případ ad 4.B1, po provedené analýze příčin poruch a odstranění skutečné primární příčiny (situace po projevu 7. poruchy v pořadí) lze uměle odstranit (cenzurovat) prvý úsek sledování a nový počátek zvolit v časovém okamžiku T_7 .

Pro případ ad 4.B2 by obdobně mohlo být vyřazeno počáteční období většího výskytu poruch v počátečním období používání výrobku. Charakter empirické funkce je vypuklý – probíhá většinou nad teoretickou přímkou. Ze zjištěných skutečností lze např. provést ve výrobě opatření ke zkrácení zjištěné doby výskytu časných poruch apod.

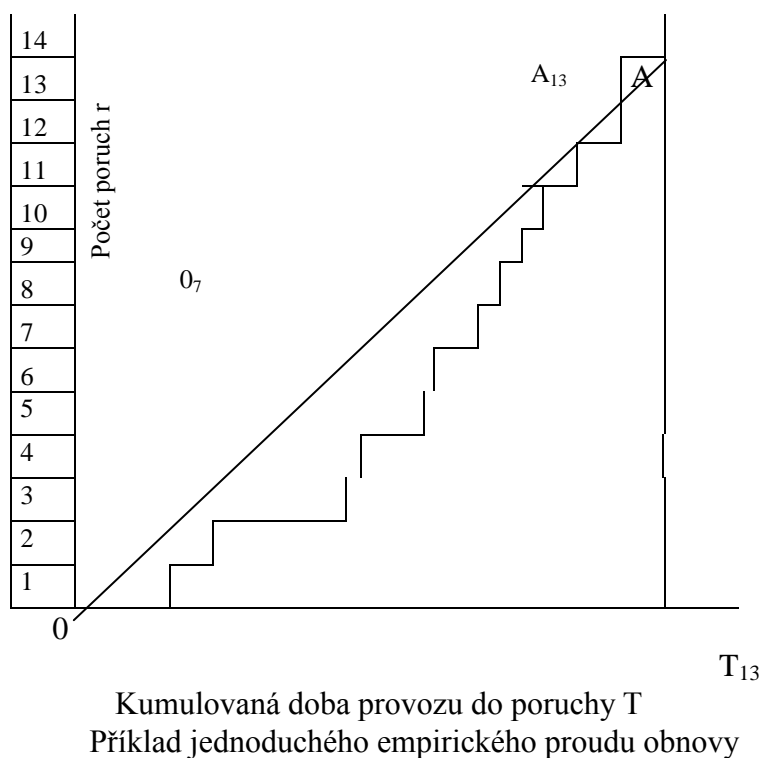
Případ 4.B3 na konci období použitelného života výrobku, by měl průběh proudu poruch s časem narůstající poruchovost, tj. zkracující se intervaly a empirická funkce by byla vydutá a probíhala pod teoretickou přímkou. Viz Obr.3.

5. Zjišťování provozní poruchovosti – ukazatele bezporuchovosti spolehlivosti výrobku

K výpočtům bodových a intervalových odhadů používáme normu [3] ČSN IEC 605-4:1992 ZKOUŠKY BEZPORUCHOVOSTI ZAŘÍZENÍ. Část 4: Postupy pro stanovení bodových odhadů a konfidenčních mezí z **určovacích zkoušek bezporuchovosti** (01 0644) Idt IEC 605-4:1986.

Vzhledem k časovým omezením nebudu tyto výpočty provádět, protože citovaná norma je názorná. Vypočítáváme v námi naznačených případech ukazatele bezporuchovosti

$$\text{MTBF, resp. } \Lambda = 1/m = (\text{MTBF})^{-1}$$



Je nutné jenom dodat, že např. výpočty pravděpodobností (např. pro odhady rizik) počítáme např. ze vzorců

$$\text{RISK}_{\text{Prob}}(t) = (1 - \exp \Lambda t) \cdot 100\%, \quad \dots(5)$$

Kde t je časový interval provozu v němž zjišťujeme pravděpodobnost vzniku nežádoucího jevu (poruchy sledovaného výrobku)

$$\Lambda = 1 / m,$$

kde m je buď bodový odhad MTBF nebo některá z konfidenčních mezí MTBF apod.

6.Odkazy na literaturu

[1] L.N. Boľšov , N.V. Smirnov Tablícý matěmaticeskoj statistiki; Moskva NAUKA 1983

[2] ČSN IEC 60605-6:1998 ZKOUŠKY BEZPORUCHOVOSTI ZAŘÍZENÍ. Část 6: Testy platnosti předpokladu konstantní intenzity poruch nebo konstantního parametru proudu poruch

[3] ČSN IEC 605-4:1992 ZKOUŠKY BEZPORUCHOVOSTI ZAŘÍZENÍ. Část 4: Postupy pro stanovení bodových odhadů a konfidenčních mezí z **určovacích zkoušek bezporuchovosti** (01 0644) Idt IEC 605-4:1986.

UDRŽOVATELNOST A ZAJIŠTĚNOST ÚDRŽBY

Prof. Ing. Václav Legát, DrSc., Technická fakulta ČZU Praha, katedra jakosti a spolehlivosti strojů, 165 21 Praha 6 – Suchbát, E-mail: legat@tf.czu.cz

Jestliže **program spolehlivosti** je jednou významnou součástí **systému jakosti**, potom **udržovatelnost a zajištěnost údržby** je rovněž významnou součástí spolehlivosti, přičemž podle ČSN IEC 50 (191) je:

♦ **udržovatelnost** definována jako *schopnost objektu v daných podmínkách používání setrvat ve stavu nebo vrátit do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci, jestliže se údržba provádí v daných podmínkách a používají se stanovené postupy a prostředky*

♦ **zajištěnost údržby** je definována jako *schopnost organizace poskytující údržbářské služby zajišťovat podle požadavků v daných podmínkách prostředky potřebné pro údržbu podle dané koncepce údržby. Dané podmínky se vztahují jak na vlastní objekt, tak i na podmínky používání a údržby*

1. Znaky udržovatelnosti výrobku a zajištěnosti údržby

Z uvedených definic je zřejmé, že udržovatelnost stroje nebo zařízení je dána jednak *konstrukčním provedením* (technologičností konstrukce), které podmiňuje nízké nároky na objem preventivní údržby a ulehčuje vykonávání oprav a jednak celým souborem *provozních* (logistických) *opatření*, kam především patří kvalifikovaný a vycvičený údržbářský personál, optimální systém údržby a technická dokumentace, zkušební a údržbářské zařízení, zásobování náhradními díly, údržbářské objekty a jejich vybavení.

Jak se projevuje výrobek s vysokou udržovatelností? Na tuto otázku již v obecné rovině odpovídá uvedená definice udržovatelnosti. Příklady několika praktických znaků, opatření a situací spojených s udržovatelností danou problematiku ještě více přiblíží:

- a) **požadavky na udržovatelnost** jsou uvedeny ve specifikacích a smlouvách;
- b) výrobek je **konstruován** tak, že se snadno *udrzuje* (nízké požadavky na mazání, sortiment maziv, malý počet mazacích míst, dobrá přístupnost maznic, hrdel a zátek, dlouhé intervaly pro operace preventivní údržby, snadné a nenáročné seřizovací operace, malá pracnost údržbářských operací, malé požadavky na kvalifikaci údržbářů, nízké náklady na údržbu aj.), *diagnostikuje* (zamontované konektory, odbočky pro měření tlaku vzduchu a oleje, vestavěné autodiagnostické přístroje, vypracované detailní diagnostické postupy, minimální náročnost na demontážní operace, dostupné a nenáročné diagnostické přístroje, malé

požadavky na kvalifikaci diagnostiků, malá pracnost diagnostických operací, nízké náklady na diagnostiku apod.) a *opravuje* (maximální využití technické normalizace, unifikace a dědičnosti konstrukce, snadná vyměnitelnost strojních součástí a skupin, prvky s nízkou životností musejí být zvláště snadno a rychle vyměnitelné, umístění bezpečných úchytů pro zvedací zařízení, označení správné montážní polohy součástí, modulární a snadno vyměnitelné uspořádání elektronických systémů, srozumitelné dílenské příručky a dostupné náhradní díly, nízké požadavky na kvalifikaci opravářů, malá pracnost a nízké náklady na opravy apod.);

- c) existuje vypracovaný **komplex provozních opatření**, který je dobře připraven a spolehlivě funguje.

Na většinu těchto problémů poskytuje odpověď v metodické rovině v současné době postupně zaváděná a poměrně rozsáhlá, relativně komplexní norma ČSN IEC 706 **Pokyny pro udržovatelnost zařízení**, která se skládá z devíti oddílů [1]:

1. Úvod do udržovatelnosti	ČSN IEC 706-1
2. Požadavky na udržovatelnost ve specifikacích a smlouvách	
3. Program udržovatelnosti	
4. Diagnostické zkoušení	ČSN IEC 706-5
5. Studie udržovatelnosti v etapě návrhu	ČSN IEC 706-2
6. Ověřování udržovatelnosti	ČSN IEC 706-3
7. Sběr, analýza a prezentace údajů vztahujících se k udržovatelnosti	
8. Plánování údržby a jejího zajištění	ČSN IEC 706-4
9. Statistické postupy v udržovatelnosti	ČSN IEC 706-6

2. Ukazatele udržovatelnosti

Požadavky na udržovatelnost je třeba specifikovat na začátku navrhování a v jeho průběhu se studie o udržovatelnosti musejí aktualizovat a doplňovat o nové poznatky a zkušenosti a měly by být specifikovány nejenom ve smlouvách, ale současně i ověřována prokazována.. Norma ČSN IEC 706-1 rozlišuje kvantitativní a kvalitativní ukazatele udržovatelnosti. **Kvantitativní ukazatele** se nejčastěji vztahují k časovému úseku, po který výrobek není provozuschopný z důvodu vykonávání údržby. Přehled jednotlivých dob stavů výrobku a dob jeho údržby, vypracovaný podle ČSN IEC 50(191), je uveden na obr. 1.

Doba použitelného stavu			Doba nepoužitelného stavu			
Doba využitého (obsazeného) stavu	Doba nevyužitého stavu	Doba provozuneschopného stavu z vnějších příčin	Doba provozuneschopného stavu z vnitřních příčin			
			Doba poruchového stavu			Doba preven- tivní údržby
			Doba nezjištěné- ho poru- chového stavu	Doba administra- tivního zpoždění	Doba údržby po poruše	
					Doba údržby	
Doba provozuschopného stavu		Doba provozuneschopného stavu				

Pokračování detailního rozkladu doby údržby:

Doba údržby					
Doba preventivní údržby		Doba údržby po poruše			
Doba Logistického Zpoždění	Doba aktivní údržby				Doba logistického zpoždění
	Doba aktivní preventivní údržby	Doba aktivní údržby po poruše			
		Doba technického zpoždění	Doba Lokalizace Porouchané části	Doba aktivní opravy	
Doba opravy					

Obr. 1 Přehled jednotlivých dob stavů výrobku a dob jeho údržby - podle ČSN IEC 50(191)

Vedle těchto časových ukazatelů udržovatelnosti se používají tyto další kvantitativní ukazatele udržovatelnosti:

- **časový interval** mezi preventivními údržbami (mezi plánovanými diagnostickými prohlídkami);

- **pracnost údržby** (má být stanovena pro všechny činnosti, které tvoří údržbu v kumulativním i v jednotkovém vyjádření);
- **kumulativní náklady** na údržbu za dobu užitečného života výrobku;
- **průměrné jednotkové náklady** na údržbu (kumulativní náklady vztažené na jednotku doby provozu);
- **náklady na zajištění údržby** za celý životní cyklus výrobku;
- **náklady životního cyklu** výrobku (za dobu definování, návrhu, vývoje, výroby, instalace, provozu a likvidace).

Vedle kvantitativních požadavků (ukazatelů) je nezbytné také používat i kvalitativní požadavky, jejichž příklady jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Příklady kvalitativních požadavků (ukazatelů) na udržovatelnost

<ol style="list-style-type: none"> 1. Požadavky na kvalifikaci pracovníků údržby 2. Potřeby speciálního nářadí, přípravků a diagnostických 3. Požadavky na seřizování (nastavení) a stanovení postupů přístrojů a zařízení 4. Normalizace, unifikace a dědičnost součástí a skupin 5. Jasně určené správných funkcí jednotlivých strojních skupin nebo dílčích sestav 6. Přístup pro vizuální kontrolu pomocí okének nebo snadno snímatelných krytů 7. Vestavěná diagnostická (zkušební) zařízení a přístroje 8. Řádné označení všech diagnostických (zkušebních) bodů 9. Použití barevného kódu a odpovídajícího značení např. pro mazací místa apod. 10. Použití modulových jednotek zejména v elektronickém i zařízení 11. Použití spolehlivých upínek, rychlospojek apod. 12. Použití držadel (závěsných ok) na vyměnitelných prvcích 13. Obsah a rozsah technických příruček a informací 14. Omezení návrhu (konstrukce) spojená s lidským faktorem
--

3. Udržovatelnost v procesu návrhu

Východiskem je studie o udržovatelnosti v etapě návrhu a její úlohou je zabezpečit, aby dodávané výrobky splňovaly požadavky na udržovatelnost. V průběhu této studie se provozní požadavky transformují do podrobných kvalitativních a kvantitativních požadavků na udržovatelnost a ty se dále promítají do konkrétního konstrukčního řešení. Stanovené požadavky se dokumentují ve formě:

- a) **konstrukční směrnice a kontrolních seznamů**, které mají zabezpečit, aby návrh obsahoval požadované ukazatele udržovatelnosti,
 - b) **seznamu základních údržbářských operací** a požadavků na zabezpečení údržby.
- Požadavky na udržovatelnost se uvádějí ve formě různých ukazatelů udržovatelnosti.

4. Úlohy udržovatelnosti a zajištění údržby v programu spolehlivosti

V průmyslově vyspělém světě značnou část těchto úloh a činností *zabezpečují přímo výrobci a provozovatelé* techniky využívají služeb z jejich pestré nabídky. Přesto je účelné, aby i zákazník (majitel či uživatel) měl k dispozici základní informace z dané oblasti zabezpečování spolehlivosti strojů v provozu.

Úplná sestava požadavků na udržovatelnost zahrnuje čtyři významné oblasti:

- a) **ukazatele udržovatelnosti**, které mají být dosaženy návrhem výrobku;
- b) **omezení** pro umístění výrobku, jež mají vliv na jeho údržbu (např. v určitých časových obdobích nesmí probíhat žádná preventivní údržba, eliminace nákladných přístrojů, limitování kvalifikace a počtu údržbářů apod.);
- c) požadavky na **program udržovatelnosti**, které má dodavatel splnit, aby bylo zaručeno, že dodávané zařízení vyhovuje požadovaným ukazatelům udržovatelnosti; k podstatným prvkům programu udržovatelnosti patří:
 - příprava plánu programu udržovatelnosti;
 - zavedení systému přezkoumání programu včetně hlediska nákladů;
 - určení kritéria pro návrh a rozdělení požadavků na udržovatelnost na podsestavy výrobku;
 - hodnocení a předpověď udržovatelnosti;
 - zahrnutí požadavků na udržovatelnost do specifikací pro subdodavatele;
 - vytvoření systému sběru a analýzy dat a opatření k nápravě;
 - účast na přezkoumání návrhu;
 - studie o pracnosti údržby výrobku;
 - příprava údajů pro plánování údržby;
 - zavedení řídicího systému pro změny v návrhu nebo ve výrobě;
 - ověřování udržovatelnosti;
- d) opatření pro **plánování zajištění údržby**, k nimž např. patří:
 - informace o intenzitách poruch a pracnostech oprav;
 - seznam speciálního nářadí a přístrojů;
 - seznam a ceník náhradních dílů;
 - specifikace potřebných zkoušek;
 - požadavky na výcvik pracovníků atd.

Dodavatel odpovídá za vytvoření plánu programu udržovatelnosti a za jeho plnění. Odběratel se má výrazně podílet na formulaci požadavků na udržovatelnost. Podrobněji viz ČSN ISO 706-1.

5. Optimalizace preventivní údržby

Stanovení strategie preventivní údržby je důležitou úlohou plánování údržby a jejího zajištění. Základem optimalizace preventivní údržby je nalezení takové okamžiku, takové hodnoty diagnostického signálu (doby používání, doby provozu, provozního parametru, strukturního parametru, nákladového ukazatele), kdy provedená obnova (za předpokladu, že v tomto okamžiku prvek žil) zajišťuje dosažení minimálních průměrných jednotkových nákladů na provoz a obnovu daného objektu v průběhu jeho celého užitečného života.

Konkrétní objekty, např. automobily, výrobní linky apod., jsou tvořeny zpravidla velkým počtem strojních prvků s různými funkčními a spolehlivostními vlastnostmi, s rozdílnou složitostí, cenou apod. Z hlediska obnovy je můžeme rozdělit do dvou velkých skupin [2]:

- a) dvoustavové prvky, u nichž probíhající vnitřní změny technického stavu v důsledku jejich provozu nemají pozorovatelný, měřitelný nebo významný průběžný vnější projev ve změnách technicko-ekonomických parametrů stroje jako celku (např. tlakově mazaná kluzná ložiska motoru); jediným důvodem obnovy těchto dvoustavových prvků je riziko poruchy, která je vyvolána působením vnějších i vnitřních příčin; stavy prvků - označené (1, 0) - znamenají úplně provozuschopný a úplně neprovozuschopný stav,
- b) vícestavové prvky, u nichž probíhající změny technického stavu mají, kromě náhodné složky, průběžný, významný a měřitelný vnější projev ve změnách technicko-ekonomických parametrů stroje jako celku (např. pístní skupina motoru); důvodem k obnově je průběžné zhoršování provozně-ekonomických parametrů, přičemž riziko poruchy je velmi nízké až zanedbatelné.

K obnově charakterizovaných strojních prvků může dojít třemi základními systémy údržby:

- a) **údržbou po poruše** (neplánovanou údržbou, kdy obnova je vždy vykonána až po poruše),
- b) tradiční **preventivní periodickou údržbou** založenou na pevném intervalu pro obnovu,
- c) moderní **preventivní diagnostickou údržbou** založenou na sledování technického stavu.

Dále pouze naznačíme optimalizaci periodické a diagnostické údržby dvoustavových strojních prvků.

Pro **výpočet optimálního intervalu preventivní údržby** (obnovy, seřízení, opravy, výměny, renovace apod.) jsou nezbytné tyto vstupní údaje:

- a) náklady na preventivní údržbu N_O ,
- b) ztráty způsobené havarijní poruchou (rozdíl nákladů na údržbu po poruše a na preventivní údržbu) Z_H ,
- c) pravděpodobnost výskytu havarijní poruchy v závislosti na intervalu preventivní údržby $F(t_p)$ resp. na diagnostickém signálu $F(S_p)$,
- d) funkční závislost středního intervalu preventivní údržby na prostém intervalu preventivní údržby $\bar{t}(t_p)$ resp. na diagnostickém signálu $\bar{t}(S_p)$,

- e) funkční závislost středních kumulativních nákladů na provoz objektu vyvolaných narůstajícím opotřebením sledovaných funkčních ploch součástí a skupin v závislosti na intervalu preventivní údržby $N_{Pe}(t_p)$ resp. na diagnostickém signálu $N_{Pe}(S_p)$,
- f) funkční závislost středních kumulativních nákladů na provoz objektu vyvolaných jeho diagnostikou (monitorováním technického stavu) v závislosti na intervalu preventivní údržby $N_{Pd}(t_p)$ resp. na diagnostickém signálu $N_{Pd}(S_p)$.

Z rozboru uvedených podkladů je zřejmé, že údržba prvku, vykonaná při různé hodnotě intervalu pro údržbu t_p , resp. při různé hodnotě diagnostického signálu S_p , má tyto ekonomické dopady:

- a) je-li údržba vykonána při malé hodnotě t_p , resp. S_p dojde na jedné straně k nízkému relativnímu počtu poruch a tím i k vynaložení malých provozních nákladů ve formě poruchových ztrát $Z_h \cdot F(t_p)$, resp. $Z_h \cdot F(S_p)$ a na druhé straně při odpovídající nízké hodnotě střední doby mezi obnovovacími zásahy (preventivními i vynucenými) $\bar{t}(t_p)$, resp. $\bar{t}(S_p)$ náklady na preventivní údržbu N_O více zatěžují jednotku střední doby provozu mezi údržbami;
- b) je-li údržba vykonána při vysoké hodnotě t_p , resp. S_p , dojde sice k lepšímu využití nákladů na preventivní údržbu N_O (jednotkové náklady na údržbu klesají), ale rostou náklady z rizika poruchy $Z_h \cdot F(t_p)$, resp. $Z_h \cdot F(S_p)$.

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

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

resp.

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

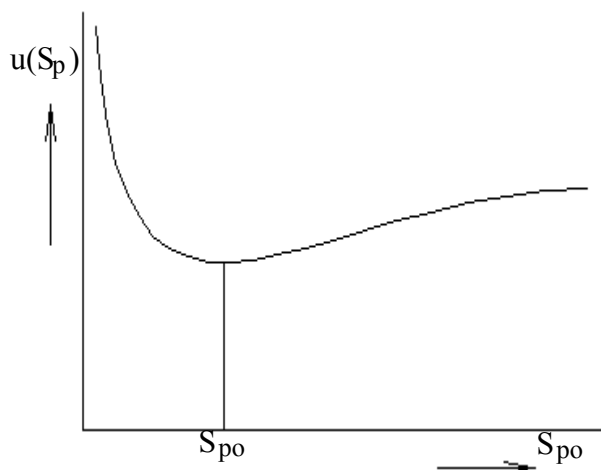
Funkční závislost středního intervalu preventivní údržby na prostém intervalu preventivní údržby $\bar{t}(t_p)$ resp. na diagnostickém signálu $\bar{t}(S_p)$ můžeme stanovit z experimentálně zjištěných údajů ze vztahu

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

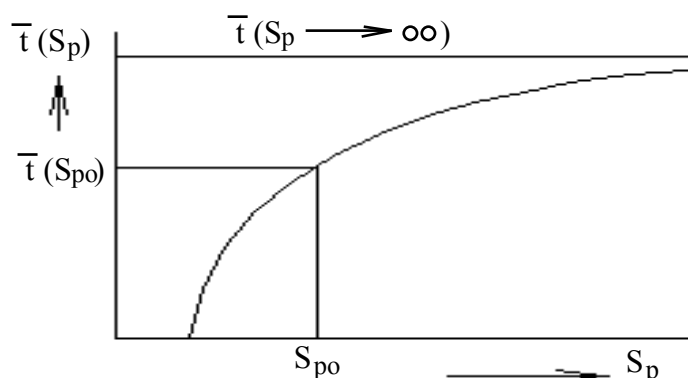
resp.

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

kde $t_i(t_p)$ resp. $t_j(S_p)$ je doba provozu i -tého strojního prvku, žijícího při stavu t_p resp. S_p ; $t_j(t_p)$ resp. $t_j(S_p)$ je doba provozu (fyzický život) j -tého strojního prvku, který při stavu t_p resp. S_p již nežije; $m(t_p)$ resp. $m(S_p)$ je počet prvků žijících při stavu t_p resp. S_p a n je počet všech sledovaných strojních prvků daného typu.



Obr. 2 Princip stanovení optimální hodnoty diagnostického signálu S_{po} pro preventivní diagnostickou obnovu



Obr. 3 Princip stanovení optimální střední hodnoty intervalu doby provozu $\bar{t}(S_{po})$ do preventivní diagnostické obnovy (příklad degresivní funkce $\bar{t}(S_p)$)

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

Optimální hodnotu diagnostického signálu S_{po} pro obnovu můžeme nejnázorněji stanovit graficky nebo pomocí výpočetní techniky, přičemž grafické řešení je zřejmé z obr. 2 a stanovení optimální střední doby provozu $\bar{t}(S_{po})$ je zřejmé z obr. 3. Možnost analytického řešení je závislá na konkrétním typu funkcí $F(S_p)$ a $\bar{t}(S_p)$.

6. Ověřování, prokazování a zkoušky udržitelnosti

Při zkouškách udržitelnosti je třeba vycházet z normy ČSN IEC 706-3. Podstatou zkoušení je buď:

- a) **ověřování udržitelnosti** pomocí sledování, kontroly či obojího za účelem zjištění, jak dodavatel plní specifikované požadavky na udržitelnost výrobku, nebo

b) **prokazování udržovatelnosti** spočívající v činnosti, která je vykonávána v rámci jednotlivých výrobků nebo jejich výběru s cílem prokázat soulad s určitým požadavkem na udržovatelnost a/nebo získat údaje o udržovatelnosti.

Cílem zkoušek udržovatelnosti je tedy ověřit, že jsou splněny jak kvalitativní, tak kvantitativní požadavky na udržovatelnost včetně ověření, že určitá činnost údržby navrátila zařízení na specifikovanou úroveň provozuschopnosti.

Kvalitativní i kvantitativní aspekty a metody ověřování udržovatelnosti jsou přehledně uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2 Kvalitativní a kvantitativní postupy ověřování udržovatelnosti

Metody a postupy ověřování		Analýza a přezkoumání	Studie návrhu a zkoušky	Prokazování	V průběhu provozního využívání
Kvalitativní postupy ověřování	Přezkoumání návrhu	*			
	Přezkoumání zkušeností ze zkoušek	*	*	*	
	Studie o snadnosti údržby		*		
	Přezkoumání analýzy úkolů údržby	*		*	
	Přezkoumání provozních zkušeností				*
Kvantitativní postupy ověřování	Předpověď udržovatelnosti	*	*		
	Ověřování založené na údajích ze zkoušek		*	*	
	Ověřování založené na údajích z provozu				*

7. Diskuse a závěr

Uvedené pojetí udržovatelnosti se vztahuje na všechny etapy životního cyklu výrobku, tj. na etapy koncepce a návrhu, konstrukce a vývoje, instalace, provozu a likvidace. Rozhodující odpovědnost za udržovatelnost má výrobce strojů a zařízení. Část odpovědnosti nese i konečný uživatel výrobku. Ten by měl zejména při uzavírání kontraktů klást požadavky i na udržovatelnost dodávaného unikátního zařízení.

Každý inženýr pro spolehlivost by měl dobře znát výsledky práce svého podniku i v oblasti udržovatelnosti navrhovaných výrobků a každý dodavatel, jeho servis a uživatel výrobku by měl dobře znát problematiku kladení požadavků na udržovatelnost a koncepci údržby a jejího zajišťování v provozu.

Literatura:

[1] Soubor norem ČSN IEC 706 Pokyny k udržovatelnosti zařízení

[2] LEGÁT, V., ŽALUDOVA, A., ČERVENKA, V., JURČA, V.: Contribution to optimization of preventive replacement. Reliability Engineering and System Safety 51, 1996 Elsevier Science Limited, s. 259 - 266. ISSN 0951-8320.